



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E**  
**MEIO AMBIENTE**



**MARCOS GUEDES DO NASCIMENTO**

**PROPOSTA DE SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO EM ESTRUTURA  
URBANA COM USO DE TECNOLOGIA EMBARCADA E RECURSOS  
RENOVÁVEIS DE ÁGUA E ENERGIA**

JOÃO PESSOA

2022

**MARCOS GUEDES DO NASCIMENTO**

**PROPOSTA DE SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO EM ESTRUTURA  
URBANA COM USO DE TECNOLOGIA EMBARCADA E RECURSOS  
RENOVÁVEIS DE ÁGUA E ENERGIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Desenvolvimento e Meio  
Ambiente da Universidade Federal da Paraíba,  
para obtenção do título de Mestre.

Orientador: RAIMUNDO APRÍGIO DE  
MENEZES JÚNIOR

JOÃO PESSOA

2022

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

N244p Nascimento, Marcos Guedes do.

Proposta de sistema de detecção de incêndio em estrutura urbana com uso de tecnologia embarcada e recursos renováveis de água e energia / Marcos Guedes do Nascimento. - João Pessoa, 2022.

125 f. : il.

Orientação: Raimundo Aprígio de Menezes Júnior.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCEN.

1. Incêndio urbano. 2. Detecção de incêndio. 3. Sensoriamento por satélite. 4. Sustentabilidade. 5. Arduino. I. Menezes Júnior, Raimundo Aprígio de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 614.84(043)

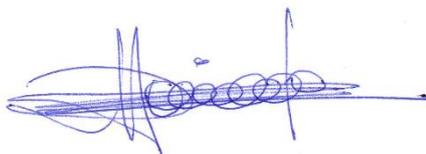
**MARCOS GUEDES DO NASCIMENTO**

**PROPOSTA DE SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO EM ESTRUTURA  
URBANA COM USO DE TECNOLOGIA EMBARCADA E RECURSOS  
RENOVÁVEIS DE ÁGUA E ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA – da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Trabalho Aprovado. João Pessoa, 16 de dezembro de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Raimundo Aprígio de Menezes Júnior  
Universidade Federal da Paraíba



---

Maria Cristina Basílio Crispim da Silva  
Universidade Federal da Paraíba



---

Charlie Salvador Gonçalves  
Universidade Federal da Paraíba

À minha querida esposa, com carinho

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a oportunidade de realizar esta pesquisa sobre um tema que é de suma importância para os profissionais da área da segurança pública e de engenharia de segurança contra incêndio e Pânico, bem como para a sociedade como um todo, visto que, ao mesmo tempo que abrirá caminhos para o aprimoramento dos sistemas de segurança contra incêndio, otimizará o uso de recursos naturais para este fim.

Devo gratidão também a todos os meus familiares, em especial, à minha querida mãe Maria José, ao meu sogro José Laurentino, à minha sogra Joseane da Silva e, sobretudo, à minha digníssima esposa Amanda, pois eles foram fundamentais para a concretização deste trabalho, dando-me todo o suporte psicológico e emocional do qual tive necessidade de receber para percorrer este extenso e difícil caminho até a consolidação de todo o processo.

À coordenação do curso, ao corpo docente e ao secretariado do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba, bem como a todos os amigos mestrandos, deixo o meu muito obrigado, pois foi com vocês que estive durante boa parte desta caminhada, dividindo momentos de alegrias e de dificuldades, os quais foram essenciais para nosso enriquecimento e formação pessoal e profissional.

Não poderia deixar de reconhecer o trabalho do professor Raimundo, que se empenhou incansavelmente para assessorar-me na realização desta pesquisa, preparando-me para enfrentar os desafios que me nortearam durante todo este processo. Seria igualmente injusto não agradecer ao Professor Bruno César, técnico do Laboratório de Física da Universidade da Paraíba (UFPB), que foi peça basilar, tanto na construção teórica, quanto prática desta pesquisa.

Gratidão também ao Sr. coordenador do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da UFPB, Professor Dr. Givanildo Alves de Azevedo, por nos permitir utilizar o espaço externo do referido laboratório para montagem do simulador físico, bem como para realização dos testes experimentais. Tão importantes quanto, foram os serviços prestados pelo técnico em mecânica do mesmo laboratório, o Sr. Sebastião Leandro Filho, que de maneira incansável nos apoiou em todos os momentos das atividades práticas realizadas.

Finalmente, agradeço ao Comandante do Corpo de Bombeiros Militar da Paraíba, o Senhor Coronel Marcelo Augusto de Araújo Bezerra, em nome do qual agradeço aos demais integrantes da corporação que de maneira direta ou indireta tenham me auxiliado de algum modo na construção e consolidação deste sonho que neste momento está sendo possível materializar, que é a inserção deste mestrando no campo da análise científica enquanto pesquisador.

“A satisfação está no esforço e não apenas na  
realização final”

Mahatma Gandhi

## RESUMO

Os riscos de incêndio nas cidades estão aumentando e a demanda por recursos hídricos e energéticos para as atividades de segurança contra incêndio cresce à medida que a população aumenta e o adensamento populacional se intensifica. Mediante este contexto, a presente pesquisa busca desenvolver um sistema de detecção de incêndio (SDI) eficiente e sustentável, baseado em tecnologias embarcadas e em recursos renováveis de água e energia, de modo que possa detectar de maneira precoce o incêndio e disponibilizar recursos renováveis à atividade de detecção e controle do sinistro. Num primeiro momento, busca-se estimar a capacidade de abastecimento da reserva técnica de incêndio (RTI) prevista para o edifício PRODEMA/UFPB por meio de águas pluviais, bem como prever a geração de energia de um Sistema Híbrido de Geração de Energia (SHGE), composto por um painel fotovoltaico e uma turbina eólica, para suprir a demanda energética do SDI proposto. Para tanto, foram utilizadas informações contidas em bancos de dados de satélite sobre precipitação, irradiância solar e velocidade do vento na cidade de João Pessoa, referente ao período de 2015 a 2020. No que diz respeito ao SDI, foi estruturado um conjunto de *software* e *hardware* baseado na plataforma Arduino, no qual foram conectados sensores de gás, temperatura e chama, e a partir do emprego do método de árvore de decisão e submissão dos dados obtidos pelos sensores a uma rotina do *Matrix Laboratory* (MATLAB), foi determinada uma heurística capaz de identificar precocemente padrões de incêndio. Os resultados mostraram que é viável montar um sistema de captação de água pluvial no PRODEMA/UFPB para suprimento da RTI. Quanto à geração de energia para o SDI, tanto as previsões do modelo matemático de SHGE quanto o modelo físico mostraram-se capazes de atender à necessidade de energia demandada pelo sistema de detecção proposto. Finalmente, com relação ao desempenho do SDI, calibrado a partir de análise de testes de resposta dadas pelos sensores a queimas controladas de papel e fibras de madeira de média densidade (MDF), feitas em simulador físico de dimensões proporcionais a uma edificação residencial, o sistema conseguiu detectar o incêndio de forma satisfatória, sendo capaz de identificá-lo entre 15 a 40 segundos após o início do incêndio, apresentando o tempo de resposta ao incêndio menor que o do chuveiro automático, quando submetidos a uma mesma situação de teste. Quanto à eficiência, após testes de comparação entre o que se viu por meio de inspeção visual e o que foi previsto pela heurística implementada, o nível de assertividade ficou em torno de 94%.

**Palavras-Chaves:** Incêndio urbano. Detecção de Incêndio. Sensoriamento por satélite. Sustentabilidade, Arduino.

## ABSTRACT

Fire risks in cities are increasing and the demand for water and energy resources for fire safety activities grows as population increases and population density intensifies. In this context, this research seeks to develop an efficient and sustainable fire detection system (SDI), based on embedded technologies and renewable water and energy resources, so that it can detect fire early and provide renewable resources for the activity of detecting and controlling the sinister. At the first moment, it seeks to estimate the supply capacity of the technical fire reserve (RTI) provided for the PRODEMA/UFPB building through rainwater, as well as predict the energy generation of a Hybrid Power Generation System (SHGE), composed of a photovoltaic panel and a wind turbine, to supply the energy demand of the proposed SDI. For this purpose, information contained in satellite databases on rainfall, solar irradiance and wind speed in the city of João Pessoa, from 2015 and 2020, was used. With regard to SDI, a set of software and hardware was structured based on the Arduino platform, in which gas, temperature and flame sensors were connected, using the decision tree method and submitting the data obtained by the sensors to a Matrix Laboratory (MATLAB) routine, a heuristic capable of early identification of fire patterns was determined. The results showed that it is feasible to set up a rainwater catchment system at PRODEMA/UFPB to supply the RTI. As for energy generation for the SDI, both the predictions of the mathematical model of the SHGE and the physical model proved to be able to meet the energy requirement demanded by the proposed detection system. Finally, regarding the performance of the SDI, calibrated from the analysis of response tests given by sensors to controlled burning of paper and Medium Density Fiberboard (MDF), carried out in a physical simulator with dimensions proportional to a residential building, the system was able to satisfactorily detect the fire, being able to identify it between 15 to 40 seconds after the start of the fire, presenting a response time to the fire less than that of the automatic shower, when submitted to the same test situation. As for efficiency, after comparison tests between what was seen through visual inspection and what was predicted by the implemented heuristic, the level of assertiveness was around 94%.

**Key-words:** Urban fire. Sustainability. Satellite sensing. Renewable energy. Arduino.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Crescimento da População Mundial de 1800 a 2021 .....	27
Figura 2: Consumo diário de energia por pessoa de diferentes épocas.....	28
Figura 3: Populações urbana e rural entre 1950 à 2050.....	29
Figura 4: Evolução de Pegada Ecológica e Biocapacidade de 1961 a 2017.....	30
Figura 5: Capacidade global de produção de energia eólica de 2010 a 2020.....	37
Figura 6: Participação e previsão das principais fontes de energia na matriz energética brasileira de 2016 a 2024.....	38
Figura 7: Variação de $C_p$ em função de $\lambda$ e $\beta$ .....	39
Figura 8: Fluxo de corrente do ar antes e depois do rotor.....	40
Figura 9: gráfico a ( $C_p$ versus $\lambda$ ), gráfico b ( $P$ versus $v$ ) .....	41
Figura 10: Capacidade global de geração de energia solar fotovoltaica de 2010 a 2020.....	42
Figura 11: Circuito equivalente a uma célula de painel fotovoltaico.....	43
Figura 12: Gráficos de $I$ em função de $V$ – (a) e (c) – e de $P$ em função de $V$ - (b) e (d).....	45
Figura 13: Princípio de funcionamento de detectores de fumaça iônico (a) e de fumaça ótico (b).....	49
Figura 14: funcionamento de um detector linear de fumaça.....	50
Figura 15: Detectores de temperatura térmico (a) e termovelocimétrico (b).....	51
Figura 16: Detector por amostragem de ar (HSSD).....	52
Figura 17: Curva Característica de um Incêndio.....	55
Figura 18: Esquema de montagem do Hardware do SDI proposto.....	58
Figura 19: representação de um tipo de Arduino Uno.....	59
Figura 20: Faixa de comprimento de onda captado pelo sensor de chamas LM 393.....	60
Figura 21: Circuito elétrico de funcionamento do sensor de gases MQ-2.....	61
Figura 22: Curva característica de sensibilidade do MQ-2 em relação a vários gases.....	62
Figura 23: Sensor de temperatura MLX 90614 (a), ângulo de visão e variação de sensibilidade de acordo com a posição da fonte em relação ao sensor (b).....	63
Figura 24: Vista aérea e frontal do PRODEMA/UFPB.....	66
Figura 25: Imagem do ponto geográfico onde foi instalado o SHGE/EF.....	68
Figura 26: SHGE/EF instalado sobre o prédio do PRODEMA/UFPB.....	71
Figura 27: Sistema montado para medição da corrente necessária ao uso do SDI.....	72
Figura 28: Estrutura em alvenaria destinada à realização dos testes com o SDI.....	73

Figura 29: Dispositivos eletrônicos utilizados para montagem do SDI.....	74
Figura 30: Estrutura física do SDI com seu suporte feito em MDF.....	74
Figura 31: Processo de conversão do sinal analógico em sinal digital – sensor de chamas LM 393 .....	75
Figura 32: Relação entre intensidade luminosa e escala adimensional adotada para o sensor de chamas LM 393.....	75
Figura 33: Relação entre concentração gasosa e escala adimensional adotada para o sensor de gases MQ-2.....	76
Figura 34: Instrumentos de medida de temperatura e de massa utilizados durante os testes do SDI.....	79
Figura 35: Queima de MDF e papel A4 realizada durante os testes do SDI.....	80
Figura 36: Modelo de <i>sprinkler</i> utilizado para teste de validação dos dados.....	82
Figura 37: Gráficos de precipitação média anual das bases TERRACLIMATE, PFLDAS e PGLDAS referentes ao município de João Pessoa de 2015 a 2020.....	84
Figura 38: Gráficos <i>box-plot</i> sobre precipitação média mensal do município de João Pessoa de 2015 a 2020, a partir de dados extraídos das bases TERRACLIMATE, PFLDAS e PGLDAS .....	85
Figura 39: Gráficos de precipitação e volume médios mensais do município de João Pessoa de 2015 a 2020 calculados a partir de dados extraídos das bases TERRACLIMATE, PFLDAS e PGLDAS.....	86
Figura 40: Volume médio anual acumulado a cada 100 m <sup>2</sup> em projeção horizontal _2015 a 2020.....	87
Figura 41: Gráfico <i>box-plot</i> da média mensal de velocidade dos ventos no município de João Pessoa, para um ano qualquer, com uso de dados de satélite da base TERRACLIMATE_2015 a 2020.....	88
Figura 42: Gráficos de média mensal de velocidade dos ventos, corrente e potência obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa_2015 a 2020.....	89
Figura 43: Gráficos de média mensal de velocidade dos ventos, corrente e potência obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa para um ano qualquer.....	90
Figura 44: Gráfico <i>box-plot</i> sobre média mensal de irradiância solar no município de João Pessoa para um ano qualquer, com uso de dados de satélite da base TERRACLIMATE_2015	

2015 a 2020.....	91
Figura 45: Dados de média mensal de irradiância, corrente e potência obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa_2015 a 2020.....	92
Figura 46: Dados de média mensal da irradiância, corrente e potência para um ano qualquer, obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa.....	92
Figura 47: Gráfico de média mensal de potência solar fotovoltaica, potência eólica e potência eólica fotovoltaica obtidas pelo uso de dados da base TERRACLIMATE acerca de João Pessoa_2015 a 2020.....	94
Figura 48: Gráfico da média mensal de potência solar fotovoltaica, potência eólica e potência eólica fotovoltaico para um ano qualquer, obtidas pelo uso de dados da base TERRACLIMATE de João Pessoa.....	94
Figura 49: Sensor de chamas envolto por invólucro preto e filtro vermelho.....	97
Figura 50: Ângulo de varredura do MQ-2 e distância entre o sensor e o piso.....	98
Figura 51: Sensor de temperatura envolto por condutor de ondas (tubo metálico) .....	99
Figura 52: Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 1ª combustão de papel.....	101
Figura 53: Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 2ª combustão de papel.....	102
Figura 54: Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 3ª combustão de papel.....	103
Figura 55: Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 1ª combustão de MDF.....	104
Figura 56: Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 2ª combustão de MDF.....	105
Figura 57: Gráfico v2 MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 3ª combustão de MDF.....	106
Figura 58: Fluxograma da heurística escolhida para programa, obtida pelo método da árvore de solução .....	107
Figura 59: Instrumentação para testes com o SAD.....	113
Figura 60: SDFC com visualização térmica e ótica e transmissão de dados via internet.....	114

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Diferentes níveis de tratamento da água da chuva a depender da destinação.....	32
Quadro 2: Classificação e tipo de uso de acordo com o tipo da área de coleta.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: valores de coeficiente de escoamento C para superfícies urbanas.....	34
Tabela 2: especificações dos chuveiros automáticos de acordo com a coloração do líquido contido na ampola .....	54
Tabela 3: Principais características do Arduíno Uno .....	59
Tabela 4: Principais características do sensor de chamas LM 393.....	60
Tabela 5: Principais características do sensor de gases MQ-2.....	62
Tabela 6: Principais características do sensor de temperatura MLX 90614 .....	63
Tabela 7: Principais características da Placa Solar utilizado no SHGE/EF (para $T = 25^{\circ} C$ e $I = 1000 W/m^2$ ).....	70
Tabela 8: Principais características do Aerogerador Vertical utilizado no SHGE/EF.....	70
Tabela 9: Descrição dos estados lógicos dos sensores.....	77
Tabela 10: Descrição dos estados lógicos dos sensores.....	77
Tabela 11: Medidas de grandezas elétricas e da turbina eólica .....	95
Tabela 12: Medidas de grandezas elétricas do SHGE/EF .....	96
Tabela 13: Medidas de grandezas elétricas SDI proposto .....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES – Associação Brasileira de Energia Solar

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEN – Comité Européen de Normalisation

CFC – Clorofluorcarboneto

CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

DOL – Distúrbios Ondulatórios de Leste

DNI – Direct Normal Irradiance

DS – Desenvolvimento Sustentável

FEWS NET - Famine Early Warning Systems Network

FLDAS – FEWSNET Land Data Assimilation System

FMA – FM Approvals

GEE – Google Earth Engine

GEI – Green Economy Initiative

GLDAS – Global Land Data Assimilation System

GREEN IT – Green Technologies

HSSD – High Sensitivity Aspirating Smoke Detection

ISO – International Standard Organization

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa e Estatística

IPT/USP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo

IoT – Internet of Things

ISO – International Standard Organization

IT – Information Technology

IT CBPMESP – Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo

LABEME/UFPB – Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba

LED – light-emitting diode

MATLAB – Matrix Laboratory

NASA – National Aeronautics and Space Administration  
NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras  
NFPA – National Fire Protection Association  
NT/CBMPB – Normas Técnicas do Corpo de Bombeiros Militar da Paraíba  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PMMT – Pluviosidade Mensal Média Total  
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
PPM - Partes por milhão  
PRODEMA/UFPB – Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba  
REN – Renewables Now  
RTI – Reserva Técnica de Incêndio  
SAD – Sistema de Aquisição de Dados  
SCA – Sistema de Chuveiros Automáticos  
SCAP – Sistema de Captação de Água Pluvial  
SCI – Segurança Contra Incêndio  
SDAI – Sistema de Detecção e Alarme de Incêndio  
SDC – Sistema de Detecção Convencional  
SDE – Sistema de Detecção Endereçável  
SDEA – Sistema de Detecção Endereçável Analógico  
SDEAA – Sistema de Detecção Endereçável Analógico Algorítmico  
SDFC – Sistema de Detecção de Fonte de Calor  
SDI – Sistema de Detecção de Incêndio  
SDMI - Sistema de Detecção e Monitoramento de Incêndio  
SHGE – Sistema Híbrido de Geração de Energia  
SHGE/EF – Sistema Híbrido de Geração de Energia Eólico-Fotovoltaico  
SSCI – Sistema de Segurança Contra Incêndio  
TerraClimate – Monthly Climate and Climatic Water Balance  
UFPB – Universidade Federal da Paraíba  
UL – Underwriters Laboratories  
VGA – Video Graphics Array

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1 OBJETIVOS .....	20
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	20
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	20
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	22
2.1 ENTENDENDO O CONCEITO DE FOGO.....	22
2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIO URBANO .....	23
2.3 SUSTENTABILIDADE E SCI .....	26
2.4 ÁGUA PLUVIAL PARA RESERVA TÉCNICA DE INCÊNDIO (RTI).....	32
2.5 SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO NA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	36
<b>2.5.1 Estimativa de geração de energia elétrica a partir do uso de aerogerador</b> .....	37
<b>2.5.2 Estimativa de geração de energia elétrica pelo modelo de painel fotovoltaico</b> .....	42
2.6 EMPREGO DE TECNOLOGIAS EMBARCADAS EM SDI.....	46
<b>2.6.1 Sistemas de Detecção e Alarme de Incêndio normatizados</b> .....	47
2.6.1.1 Principais tipos de detectores utilizados no SDAI.....	48
<b>2.6.1.1.1 Detectores de fumaça</b> .....	48
<b>2.6.1.1.2 Detectores de temperatura</b> .....	50
<b>2.6.1.1.3 Detectores multissensoriais (fumaça + temperatura)</b> .....	51
<b>2.6.1.1.4 Detectores pontuais de chama</b> .....	51
<b>2.6.1.1.5 Detector por amostragem de ar (HSSD)</b> .....	52
<b>2.6.1.1.6 Chuveiros automáticos ou sprinklers</b> .....	52
2.7 OUTROS SISTEMAS DE DETECÇÃO DE INCÊNDIOS.....	55
<b>2.7.1 Sistema de detecção baseados em tecnologias embarcadas</b> .....	56
<b>2.7.2 Sistema de detecção proposto</b> .....	57
2.7.2.1 Conceitos relacionados ao Hardware.....	58
<b>2.7.2.1.1 Arduino uno</b> .....	58
<b>2.7.2.1.2 Sensor de chamas LM 393</b> .....	60
<b>2.7.2.1.3 Sensor de gases MQ-2</b> .....	61
<b>2.7.2.1.4 Sensor de temperatura MLX 90614</b> .....	63

2.7.2.2 Conceitos relacionados ao Software.....	64
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>66</b>
3.1 RECURSO HÍDRICO PARA RESERVA TÉCNICA DE INCÊNDIO.....	66
3.2 SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	68
<b>3.2.1 Geração de energia elétrica a partir de modelo de aerogerador e de painel fotovoltaico .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.2 Previsão de geração de energia pelo modelo de Sistema Híbrido de Geração de Energia .....</b>	<b>69</b>
<b>3.2.3 Sistema Híbrido de Geração de Energia.....</b>	<b>70</b>
3.3 SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO COM TECNOLOGIA EMBARCADA.....	72
<b>3.3.1 Montagem da estrutura de alvenaria.....</b>	<b>72</b>
<b>3.3.2 Montagem do Hardware do SDI.....</b>	<b>73</b>
<b>3.3.3 Montagem do Software do SDI.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3.4 Fase de calibragem.....</b>	<b>79</b>
<b>3.3.5 Métodos para realização da fase de validação dos resultados.....</b>	<b>82</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>83</b>
4.1 COLETA DE ÁGUA PLUVIAL PARA RESERVA TÉCNICA DE INCÊNDIO.....	83
4.2 CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA EÓLICO-SOLAR.....	87
<b>4.2.1 Geração de energia elétrica a partir de aerogerador .....</b>	<b>87</b>
<b>4.2.2 Geração de energia elétrica a partir de modelo matemático de painel fotovoltaico ..</b>	<b>90</b>
<b>4.2.3 Geração de energia elétrica pelo Sistema Híbrido Eólico-Solar .....</b>	<b>93</b>
4.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS COM O SDI PROPOSTOS.....	97
<b>4.3.1 Fase preliminar.....</b>	<b>97</b>
<b>4.3.2 Fase de calibração.....</b>	<b>99</b>
4.3.2.1 Resultados das queimas com papel.....	100
4.3.2.2 Resultados das queimas com MDF.....	103
<b>4.3.3 Fase de validação.....</b>	<b>108</b>
<b>4.3.4 Comparações do resultado obtido com outros trabalhos.....</b>	<b>109</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>111</b>
5.1 PRINCIPAIS AVANÇOS.....	111
5.2 FATORES LIMITANTES.....	112
5.3 DESDOBRAMENTOS DA PESQUISA.....	112

5.4 PRÓXIMOS PASSOS.....	114
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e arquitetônico da contemporaneidade, assim como o aumento populacional, sobretudo após a Revolução Industrial, tem feito as cidades experimentarem um expressivo crescimento, resultando na ascensão acelerada do adensamento urbano e na ampliação da concentração de materiais combustíveis em um mesmo espaço físico, principalmente em razão da verticalização das edificações, elevando a probabilidade de ocorrência de incêndios (NEGRISSOLO et al., 2019).

Para reduzir estes riscos, foram estabelecidas normatizações acerca da Segurança Contra Incêndios – SCI – em edificações, durante o século XIX (GRANT, 2020). Atualmente, a SCI é uma área que cresce continuamente, visto que, ano após ano, as cidades em geral elevam suas populações e densidade demográfica, e tal crescimento demanda maior quantidade de recursos para o emprego em ações de prevenção e controle dos sinistros, realizadas pelos Sistemas de Segurança Contra Incêndios – SSCI, ou mesmo pelas atividades de controle desenvolvidas pelas equipes de bombeiros locais.

A contrariedade em torno deste contexto se encontra no fato de que, à medida que se vê a ampliação da demanda, a escassez de recursos se mostra cada vez maior, sendo, portanto, urgente a adesão de iniciativas que otimizem o uso dos mesmos. Para isto, agentes públicos e privados envolvidos em SCI estão imbuídos em buscar novas relações de emprego de recursos naturais nestas atividades, com adoção de soluções técnicas sustentáveis que possam mitigar e otimizar a utilização deles, os quais sabidamente estarão escassos em um futuro próximo, em particular, água potável e energia (SILVA; BRAGANÇA; COELHO, 2014).

Desta maneira, organizações de combate a incêndios e empresas da área de SCI têm estabelecido métodos, procedimentos e tecnologias que primam pela prevenção dos sinistros, através do monitoramento e detecção precoce, a fim de evitar a ocorrência do incêndio e a necessidade do combate, pois esta é a mais dispendiosa das fases do SCI em termos de recursos, e em caso de ser preciso realizá-la, a presença de sistemas de detecção proporcionará o controle rápido, atenuando o uso de recursos e os prejuízos causados pelas chamas (SILVA; BRAGANÇA; COELHO, 2014).

A problemática em torno deste trabalho é saber como estabelecer um sistema fixo de segurança contra incêndio que seja capaz de detectá-lo com alto nível de eficiência e, concomitantemente, reduzir a utilização de recursos hídricos e energéticos, tanto por otimizar os recursos quanto por possibilitar o uso de fontes alternativas renováveis. Acredita-se que seja

possível estabelecer um Sistema de Detecção de Incêndio – SDI – eficiente e sustentável, através da adoção de tecnologias embarcadas, uso de água pluvial como recurso hídrico e de fonte eólica e fotovoltaica como recursos energéticos. Para se estabelecer diretrizes acertadas na busca por soluções suficientemente eficientes e sustentáveis, serão adotados os objetivos descritos a seguir.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor um sistema de detecção de incêndio – SDI – eficiente e sustentável para edificações urbanas, baseado em tecnologia embarcada e recursos renováveis de água e energia, estabelecendo como modelo de edificação o Prédio do Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA – situado nas dependências da Universidade Federal da Paraíba.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Estimar, por meio de dados de satélites, a capacidade de suprimento da Reserva Técnica de Incêndio – RTI – pela utilização de água pluvial, prevista para as instalações do PRODEMA/UFPB.

Estimar, com base em dados de satélite, a geração de energia pelo uso de um modelo de Sistema Híbrido de Geração de Energia Eólico-Fotovoltaico (SHGE/EF) para suprimento da demanda do SDI que se propõe.

Constituir o SDI pretendido, que ofereça elevado grau de assertividade na detecção e sustentabilidade hídrica e energética, com abastecimento da RTI por meio de água pluvial e suprimento de energia para funcionamento do SDI, com emprego de energia eólico-solar.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para melhor compreensão do estudo, esta dissertação foi dividida em cinco seções, sendo a primeira delas composta por uma abordagem geral sobre o assunto, apresentando a justificativa, a problemática e a hipótese em torno do trabalho, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos que serão seguidos a fim de alcançá-los.

A segunda seção, por sua vez, traz todo o arcabouço científico que embasou a pesquisa. Esta seção inicia-se com a história da prevenção e controle de incêndios nas urbes, as mudanças de paradigmas nas últimas décadas em torno do conceito de desenvolvimento e a concepção de sustentabilidade presente na estruturação de SSCI na atualidade. Após isto, foram apontados conceitos sobre a coleta de água pluvial e de modelagem matemática de turbina eólica e de placa fotovoltaica, bem como da obtenção dos dados hidroclimáticos utilizados na pesquisa.

Ainda na segunda seção, tratando-se do desenvolvimento do SDI sugerido, falou-se dos principais dispositivos de Sistemas de Detecção e Alarme de Incêndio – SDAI, dentre eles o chuveiro automático, que será utilizado como meio de comparação com o modelo sugerido, além de exemplos de SDIs em desenvolvimento, dotados de tecnologia embarcada, para obtenção de método de detecção mais eficiente. Por fim, foram abordados os conceitos envolvidos na estruturação do SDI, realizada sob a plataforma eletrônica de prototipagem rápida Arduino, e sensores de gases, temperatura e chamas utilizados.

A terceira seção traz os materiais e métodos presentes no desenvolvimento deste estudo, sendo enfatizados os locais usados na pesquisa, que foi o Prédio do Programa de Pós-Graduação e Meio Ambiente – PRODEMA – e a área externa do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas – LABEME – da Universidade Federal da Paraíba. Também foram indicados os meios de levantamento de dados, que para o estudo sobre recursos renováveis, foram utilizadas informações sobre pluviosidade, velocidade dos ventos e irradiância solar da cidade de João Pessoa – Brasil – contidas nos satélites dos sistemas de aquisição de dados hidroclimáticos *Famine Early Warning Systems Network* (FEWS NET), *Land Data Assimilation System* – FLDAS, *Global Land Data Assimilation System* – GLDAS – e Terraclimate, através do uso da ferramenta de computação em nuvem *Google Earth Engine* – GEE. Para a parte do SDI, por conseguinte, foram descritas as etapas do levantamento através de procedimentos experimentados em simulador físico de dimensões proporcionais ao tamanho real.

A quarta seção aborda os resultados do trabalho, sendo dividida em três partes, com a primeira delas dedicada a expor os resultados sobre coleta de água pluvial, a segunda voltada para discussão sobre viabilidade de emprego de SHGE/EF para funcionamento do SDI, e a terceira dedicada aos resultados alcançados nos testes de queimas realizados para construção do SDI. Após a discussão em torno dos resultados, a quinta e última seção constitui a parte final do trabalho, trazendo uma análise acerca dos objetivos alcançados e descrevendo os principais problemas que limitaram o aprofundamento da pesquisa, além das perspectivas futuras, indicando os próximos passos que poderão ser dados para continuidade do estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ENTENDENDO O CONCEITO DE FOGO

A parte essencial do problema ao qual se busca solução por meio desta pesquisa é a detecção de incêndios em edificações urbanas, e para se encontrar recursos técnicos que permitam a realização desta detecção de modo suficientemente precoce é primordial que se entenda o conceito de fogo e as principais grandezas a ele associadas. Este fenômeno é entendido como sendo uma reação química de combustão, resultante da oxidação das partículas de combustível pelo material comburente, a partir da concessão de calor chamada de energia de ignição, apresentando, em geral, água e dióxido de carbono entre os produtos da queima (CHANG; GOLDSBY, 2013).

Entretanto, há casos em que esta reação é dita incompleta, pois há pouco comburente se comparado ao número de partículas de combustível possíveis de entrarem em reação ante o calor fornecido para o processo de combustão, apresentando como produtos, além de água e dióxido de carbono, o monóxido de carbono (CHANG; GOLDSBY, 2013). Seja completa ou incompleta, esta reação de oxidação, da qual resulta o fogo, é também caracterizada por liberar energia térmica em forma de calor e energia luminosa, o que se conhece como chama (SEITO et al., 2008). Quando ocorre a propagação do fogo no tempo e no espaço, sem a existência de controle prévio, o fogo é denominado de incêndio (SEITO et al., 2008).

De modo geral, existem dois grandes grupos de incêndios: florestais e urbanos. O monitoramento de área para se constatar um incêndio e fornecer pronta resposta nos ambientes urbanos acontece com maior presteza, se comparado às respostas dadas pelas ferramentas de detecção e controle de incêndio em florestas, pois na cidade este sinistro ocorre em área bem delimitada, com menos irregularidades no terreno e menor cobertura vegetal impeditiva de visibilidade e detecção.

No caso particular desta pesquisa, a mesma se prontifica a estudar o incêndio ocorrido em edificações urbanas, não trazendo, portanto, abordagem alguma acerca de incêndios florestais. Foca-se especificamente naquelas edificações que acumulam grande quantidade de material celulósico, a exemplo de acervos culturais, tais como tribunais, cartórios, bibliotecas, museus, dentre outros, cujos materiais predominantes são livros com folhas de papel e móveis constituídos de madeira ou MDF. A seguir, um breve histórico sobre o desenvolvimento do combate e da prevenção ao incêndio nas urbes.

## 2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIO URBANO

A estruturação das primeiras civilizações, como Babilônia e Egito, estabeleceu grandes conglomerados populacionais, formando cidades de milhares de habitantes, tal como Memphis (ROSENBERG, 2019). O incêndio era um dos problemas das cidades, fosse por ação natural ou antrópica, podendo ser citados dois casos emblemáticos: a destruição da Biblioteca de Alexandria (ROBERTSON, 2016) e o grande Incêndio de Roma em 64 d.C., que matou milhares e destruiu parte da cidade (SILVA, 2014). Ante o risco de incêndio, os povos desenvolveram formas de preveni-lo e combatê-lo.

Na Grécia, certas cidades-estados tinham guardas para avisar sobre incêndios e combatê-los (MENEZES, 2007). Em Roma, César Augusto criou a Família Pública, feita por escravos que vigiavam a urbe e combatiam incêndios (WARD, 2020). Frente ao insucesso, o Imperador fez as cortes de vigia em 6 d.C., tidas como as primeiras organizações de combate a incêndios do mundo, formadas por vigias urbanos para combater incêndios (MAXFIELD, 1981). Ações preventivas eram pontuais, tal como exigir reserva de água em andar superior ou proibir uso de madeira na construção de edifícios de diversos andares, caso não houvesse meios de conter o fogo (WATSON, 2009; PINTO, 2001).

No ocidente medieval, manteve-se vigias e guardas para combater incêndios e alertar cidadãos. Os riscos eram altos, tanto que cidades foram destruídas pelo fogo, como Veneza em 1106 (PIRENNE, 2014). Para reduzir o risco de incêndio criminoso, muitas eram erguidas em lugares elevados e cercados por muralhas, para dificultar ataques. As catedrais passavam por vistorias periódicas nas colunas centrais, tinham escadas em caracol ao redor delas e punham guardas em períodos de tormentas e seca, para melhorar a prevenção e o combate ao incêndio (SCHOFIELD, 2016).

Os orientais, na antiguidade e período medieval, usaram métodos de combate e prevenção análogos aos mencionados até aqui. Isto se deu, porque a maioria destes povos viveram regimes dinásticos, como na Índia e China, e assim seguiu até o século XIX. Havia uso de técnicas e métodos pouco sofisticados nas várias atividades, inclusive no combate e prevenção a incêndio, sem propiciar otimização de recursos, com adoção de medidas de prevenção isoladas, o que fazia com que os incêndios fossem frequentes e facilmente propagados (MASON, 2014).

O aumento do número de incêndios elevou o uso de água e energia para controlá-los. O modelo simplista de prevenção e combate ao incêndio perdurou milhares de anos

entre orientais e ocidentais, até ocorrer o renascimento científico e o desenvolvimento da sociedade moderna, momento de plena expansão tecnológica que séculos depois culminou na Revolução Industrial, quando as cidades ganharam dimensões ainda maiores, majorando a necessidade de se criar grupamentos que pudessem atuar especificamente na atividade de prevenção e combate ao incêndio, que se mostrava cada vez mais recorrente e catastrófico.

Após o grande incêndio de Londres, em 1666, surgiu na Inglaterra a primeira normativa nacional de segurança contra incêndio (PINTO, 2001). Um ano depois, a lei de reconstrução da cidade previu medidas que reduzissem a ocorrência e propagação de incêndios (MODERN MASONRY, 2016). Nos Estados Unidos, foi criada em Maryland, em 1638, a lei da Assembleia Geral, que punia incendiários com penas severas (EVERSTINE, 1951). Em Massachussets, ainda no século XVII, o Tribunal Geral passou a punir incendiários com o dobro do valor do prejuízo (SCHUTZ, 1997).

Além do estabelecimento de normas, neste período houve a profissionalização da atividade de combate a incêndio, que era até então considerada um ato voluntário de civismo. O aumento da complexidade das ocorrências e a necessidade de se ter conhecimento cada vez mais aprofundado sobre o tema resultaram na inauguração de departamentos profissionais compostos por pessoal treinado e dedicado apenas a este fim. Em 1678, após grave incêndio em Boston, foi criado o primeiro departamento municipal contra incêndios da América do Norte, de dedicação exclusiva (BRAYLEY, 2011). Em Cincinnati, o departamento profissional de bombeiros foi fundado em 1853, também com dedicação única às atividades (CINCINNATI FIRE MUSEUM, 2020).

Na França, Napoleão Bonaparte fundou o Batalhão de *Sapeurs-Pompiers* em Paris em 1811, que é considerado o primeiro Corpo de Bombeiros regido por disciplina e hierarquia aos moldes atuais (BRIGADE DE SAPEURS-POMPIERS DE PARIS, 2020). Em 1841, em Meissen, região da Saxônia, Alemanha, foi criado o primeiro corpo de bombeiros do país, que no início foi voluntário. Mas em 1851 o governo instituiu o Corpo de Bombeiros Profissional de Berlim de dedicação única (SALVADOR; MADEIRA, 2008). No Brasil, o primeiro grupo de combate surgiu no Rio de Janeiro, em 1797, no Arsenal da Marinha; só em 1856 é que foi criado por Dom Pedro II o Corpo de Bombeiros Provisórios da Corte, organização profissional e de ações restritas (FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DO CONTESTADO, 1999).

Entre os séculos XVIII e XIX, a área de prevenção ao incêndio ganhou força, gerando estudos para produção de tecnologia que o detectasse e desse a primeira resposta. Ambrose fez o primeiro dispositivo automático para debelar incêndios, o qual agia por abafamento

(GODFREY, 2018). Já no século XIX, John Carey criou o primeiro sistema de chuveiros contra incêndios, que após melhorado por William Congreve, foi instalado no *Theatre Royal de Drury Lane*, Reino Unido. Muitos prédios adotaram este sistema até meados deste século, quando Stuart Harrison criou um sistema de chuveiros cuja barreira física de fluxo era um elemento fusível que rompia em certa temperatura; tal dispositivo serviu de base para os chuveiros automáticos atuais. Philip Pratt, então, fez o primeiro Sistema de Chuveiros Automáticos – SCA – e Henry Parmelee criou o primeiro corpo aspersor (RICHARDSON, 2003).

Também foram criados órgãos de normatização para estabelecer regras sobre SSCI, como a *National Fire Protection Association* – NFPA, em 1896 (GRANT, 2020), a *International Standard Organization* – ISO – e o *Comité Européen de Normalisation* – CEN, do século XX (CEN, 2020; ISO, 2020). Foram feitos laboratórios para testes de certificação, tal qual a *FM Approval* – FM – e a *Underwriters Laboratories* – UL, ambas estadunidenses (FMA, 2020; UL, 2020; QRFS, 2019). No Brasil, a principal instituição normatizadora é a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT –, e os laboratórios aptos a realizarem testes para certificação são o Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo – IPT/USP – e o laboratório do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2020).

As normas fornecem informações sobre materiais adequados a depender da edificação que será feita, os dispositivos e equipamentos de segurança necessários a cada tipo de edificação e outras definições sobre procedimentos e equipamentos do SSCI fundamentais para prevenir e mitigar os incêndios em edifícios. No contexto brasileiro, as instituições de bombeiros de cada Estado da federação são responsáveis por estabelecer as regras que direcionam a estruturação dos SSCI e fiscalizar a execução das mesmas. A execução das regras de SCI somada ao desenvolvimento de equipamentos e tecnologias têm sido fundamentais para evitar que incêndios ocorram e para que, caso aconteçam, os danos sejam reduzidos.

Apesar de todos estes esforços, nos últimos anos a ausência ou a falha de SSCI tem causado incêndios notáveis e de grande proporção, tal qual o que aconteceu em Teerã, capital iraniana, em 2017, quando as chamas atingiram diversos andares de um prédio empresarial (HAFEZI, 2017), acarretando em falência de empresas e perda de empregos. Em caso de incêndio em prédio residencial, como o *Grenfell Tower*, em Londres, atingido pelas chamas no mesmo ano (KIRKPATRICK; HAKIM; GLANZ, 2017), além das perdas econômicas, famílias têm suas moradias destruídas e sofrem transtornos de natureza física, psicológica e sequelas sociais gravíssimas, pois amigos e entes queridos são mutilados ou mortos nestes sinistros.

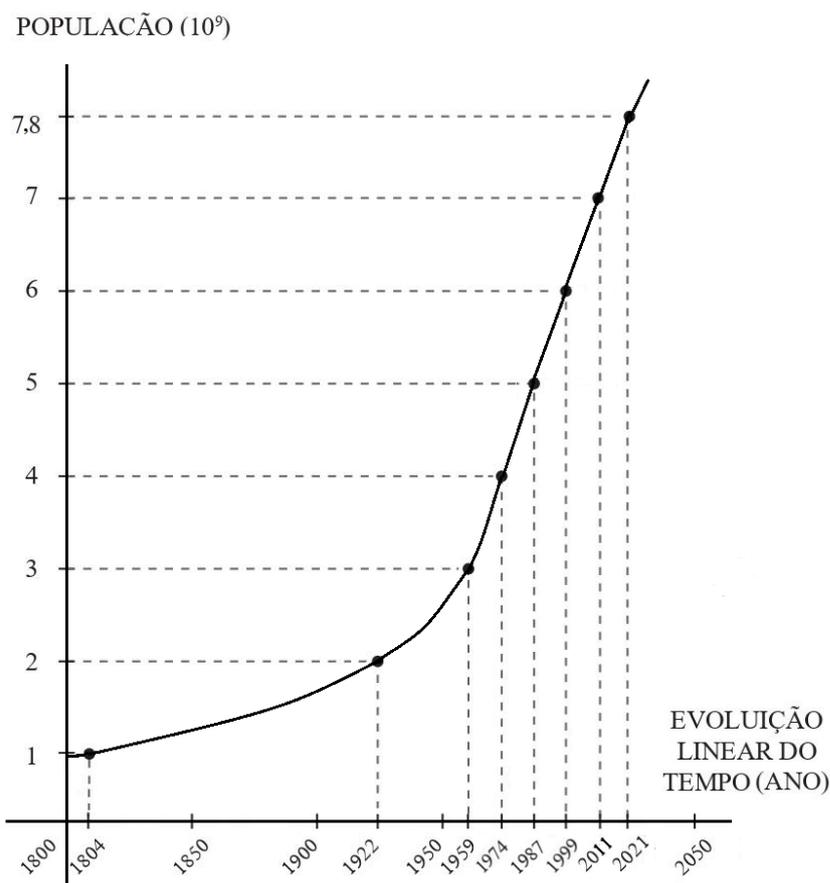
Podem advir ainda danos de ordem ambiental, a exemplo da liberação de partículas suspensas e gases tóxicos na atmosfera e o lançamento de resíduos poluentes no solo e lençóis freáticos. Caso os incêndios atinjam edificações históricas, bibliotecas, laboratórios, museus e outros espaços que guardem identidade cultural, haverá danos patrimoniais de valor desmedido, como ocorrido no incêndio do Museu de História Natural da Índia, em 2016, pelo mau funcionamento do SSCI (DOSHI, 2016); no incêndio do Museu Nacional da Quinta da Boa Vista, em 2018, no Rio de Janeiro, devido a um curto circuito no sistema de ar (FIORAVANTI, 2018); e o incêndio na Catedral de Notre-Dame na França, no ano de 2019, em razão da deficiência do SSCI (OELZE, 2020).

Assim, percebe-se que o incêndio foi e continua sendo um problema para a vida cidadina e, no contexto contemporâneo, além da necessidade de pesquisas dedicadas ao aprimoramento de SSCI e a melhoria de eficiência em sua atuação na prevenção e no combate ao incêndio, também é preciso voltar-se a realização de estudos com a proposição de estabelecer formas sustentáveis de utilização dos recursos naturais destinados a este fim, uma vez que a quantidade disponível é cada vez menor, exigindo que iniciativas favoráveis ao estabelecimento de relação de beneficiamento mútuo entre sociedade e natureza sejam estimuladas (GOLLNER; KIMBALL; VECCHIARELLI, 2012).

### 2.3 SUSTENTABILIDADE E SCI

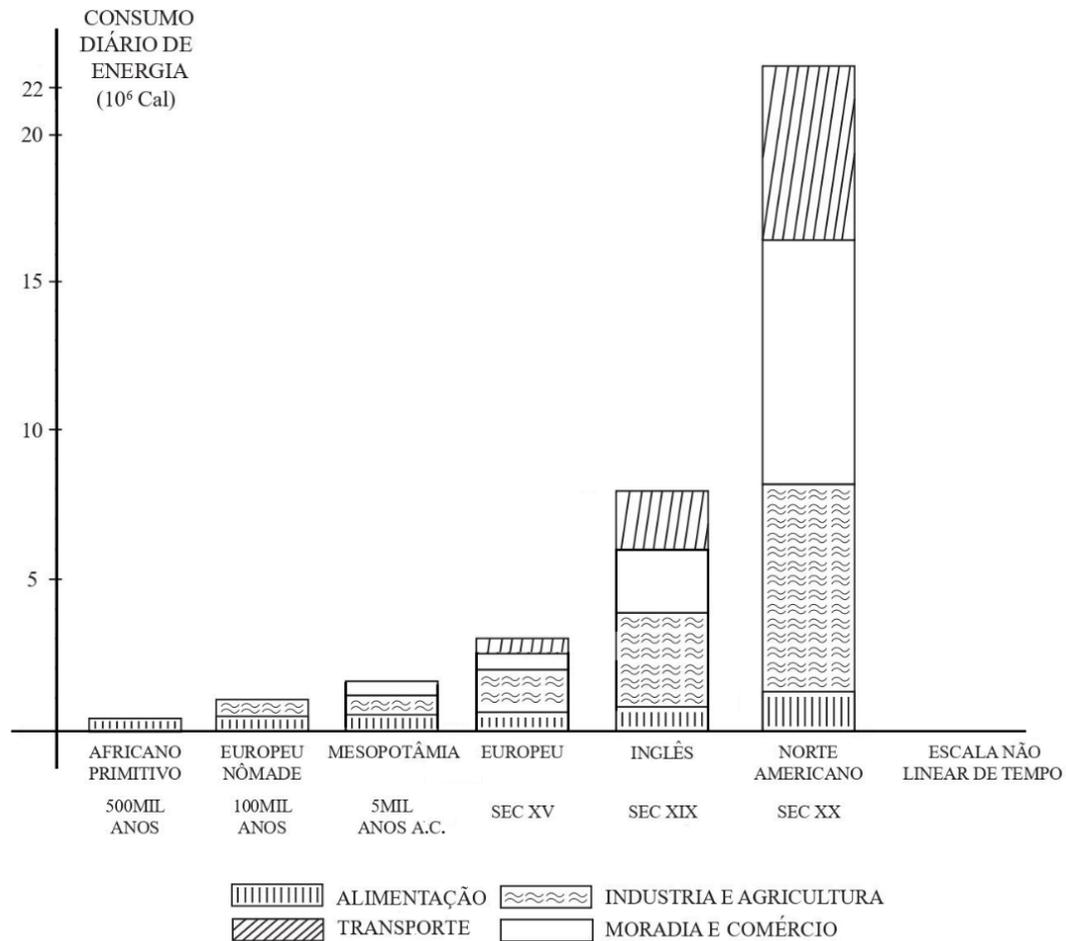
Desde a segunda metade do século XX, têm ocorrido debates em torno das relações entre crescimento populacional, disponibilidade de recursos e desenvolvimento econômico, não só em meio acadêmico, mas na sociedade como um todo, com o envolvimento dos diversos setores. As principais preocupações levantadas são no tocante à capacidade de se estabelecer uma relação sustentável nas esferas social, econômica e ambiental, de modo que se garanta atendimento às necessidades humanas do hoje e do futuro.

Sabe-se que o aumento da população em função do tempo, nas últimas cinco décadas, forma uma curva exponencial. O gráfico da figura 1 expõe o aumento populacional entre os anos de 1800 e 2021. Do ano de 1959 em diante, a cada período correspondente a pouco mais de uma década, tem sido adicionada a quantidade de cerca um bilhão de habitantes ao total populacional (ONU, 1995b apud U.S. CENSUS BUREAU, 2004), indo a 7 bilhões em 2012 (ONU, 2011) e a 7,8 bilhões em 2021 (WORLD DATA LAB, 2021). Este rápido crescimento elevou abruptamente a pressão advinda da demanda sobre as fontes de recursos naturais.

**Figura 1:** Crescimento da População Mundial de 1800 a 2021

Fonte: ONU, 1995b apud U.S. CENSUS BUREAU, 2004; ONU, 2011; WORLD DATA LAB, 2021

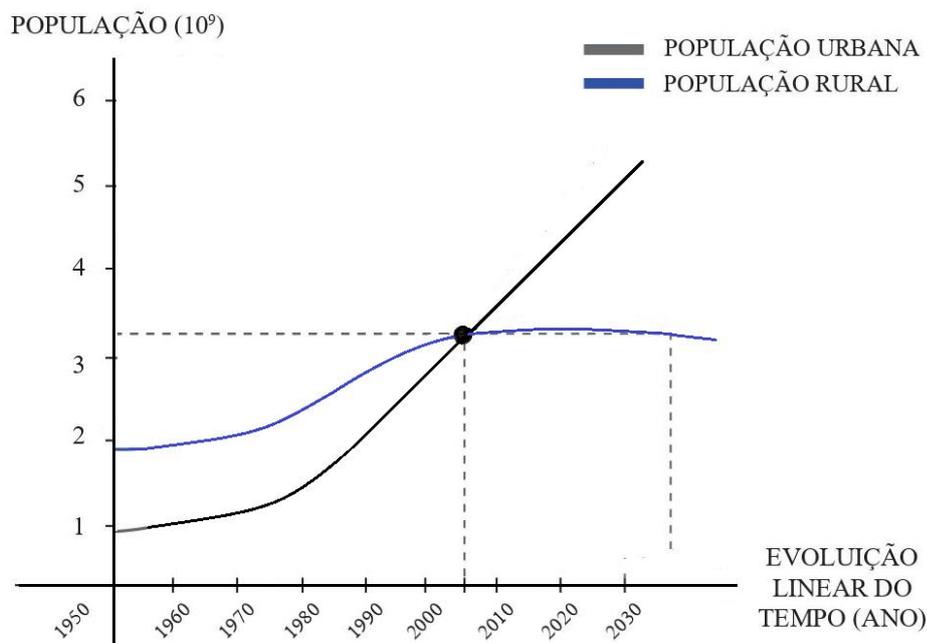
Também houve mudança nos padrões de consumo, sobretudo após a Segunda Guerra Mundial, com a implantação do Plano Marshall para restauração da economia do Oeste Europeu (HOGAN, 1989) e a adoção da prática do consumo em massa, elevando o emprego dos recursos (COLOMBO; FAVOTO; CARMO, 2008; BAUDRILLARD, 1995). O gráfico da figura 2 mostra o padrão de consumo de energia em diferentes épocas, tendo na vertical o número de calorias usadas por uma pessoa média, e na horizontal a classificação destas pessoas de acordo com a época em que viveram, sendo associado a cada uma delas uma barra vertical que traz o total de energia média consumida em um dia. Nota-se que a pessoa do século XX, tomando por base um norte-americano, consome cerca de cem vezes mais que o homem primitivo, empregando mais de 22 mil Kcal para suprir suas demandas diárias.

**Figura 2:** Consumo diário de energia por pessoa de diferentes épocas

Fonte: COOK, 1976

Outro processo que apresentou grande aceleração após a Revolução Industrial e que intensificou, sobremaneira, os problemas citadinos, foi o adensamento populacional, impulsionado principalmente pelo êxodo rural, quando o homem do campo passou a trocar o trabalho agrícola pelo trabalho nos parques fabris instalados nos grandes centros urbanos. O gráfico da figura 3 traz a evolução e projeção das populações urbana e rural, em milhões de habitantes, entre os anos de 1950 e 2030.

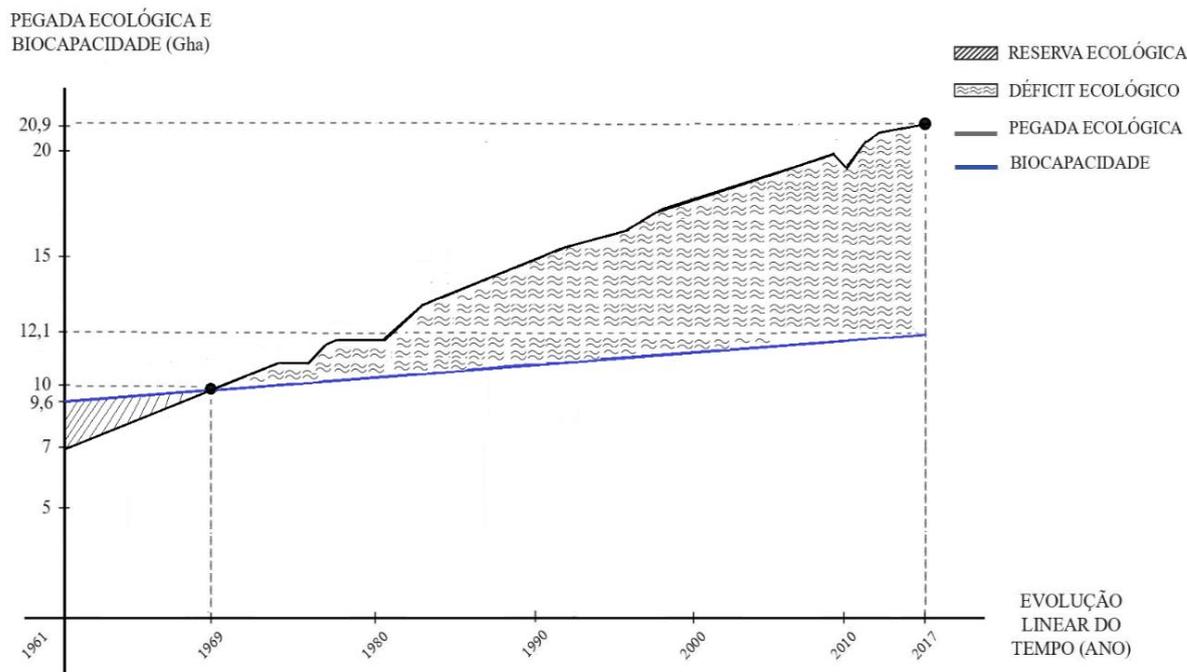
Analisando o referido gráfico, conclui-se que meados do século XX a população camponesa representava cerca de 70% do total populacional, enquanto apenas 30% vivia nas cidades. A partir de 1980, porém, a população urbana passou a crescer mais rapidamente que a rural, a qual chegou à estagnação no ano de 2014, quando correspondia a 46%. A tendência é que a população do campo diminua e que as urbes cresçam, podendo chegar a 70% da população mundial até 2050 (RITCHIE; ROSER, 2018).

**Figura 3:** Populações urbana e rural entre 1950 a 2050

Fonte: ONU, 2015

A pressão sobre recursos naturais cresceu tanto que, há mais de meio século, a demanda por recursos tem sido maior que o poder de regeneração que o planeta possui (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2021). Para se ter a dimensão deste desequilíbrio, dois indicadores importantes a serem considerados são a pegada ecológica, que mede a pressão de consumo sobre a natureza por indivíduo ou coletividade, e a biocapacidade, que mede a área produtiva usada para atender as demandas de uma pessoa ou grupo, ambas em hectare global (gha), que é entendida para esta como unidade de hectare de ecossistema regenerada sobre o que é exigido, enquanto para aquela é unidade de hectare de produtividade média usada por ano para suprir certa demanda (WWF BRASIL, 2015; GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2021; GOGONEA; GUITA; SASEANU, 2020).

O gráfico da figura 4 revela a variação da pegada ecológica e da biocapacidade desde o ano de 1961 até 2017. Percebe-se que de 1961 a 1969 ainda havia um saldo positivo de Reserva Ecológica, ou seja, a capacidade produtiva da terra estava em um patamar acima da quantidade de recursos demandados pela humanidade. Entretanto, a partir do ano de 1970 o mundo entrou em um déficit ecológico contínuo e crescente, de tal maneira que, em 2017, a pegada ecológica já era de, aproximadamente, 20,9 bilhões de hectares globais, correspondendo a quase o dobro da biocapacidade mundial naquele ano, que era de cerca de 12,1 bilhões de hectares globais (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2021).

**Figura 4:** Evolução de Pegada Ecológica e Biocapacidade de 1961 a 2017

Fonte: GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2021

Foi compreendendo tais questões e percebendo a tão flagrante degradação ambiental, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, que especialistas das mais diversas áreas do conhecimento trouxeram esta temática ao debate, de maneira notória e profunda, como ocorrido no Clube de Roma, o qual resultou na produção do Relatório “Os Limites do Crescimento”, que é considerado até os dias atuais um marco sobre desenvolvimento e meio ambiente. A partir de então, eventos internacionais para tratar sobre o assunto foram sendo feitos periodicamente, com a participação de especialistas e lideranças econômicas e políticas mundiais, sob coordenação da Organização das Nações Unidas – ONU.

Ao constatar a insustentabilidade do modelo de desenvolvimento vigente até aquele momento, a Primeira Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, colegiada pela ONU, publicou o Relatório de Brundtland, chamado de “Nosso Futuro Comum”, no qual definiu o Desenvolvimento Sustentável – DS – como sendo um modelo a ser seguido, pois por meio dele é possível garantir o suprimento das necessidades da atual geração de indivíduos sem afetar o atendimento às necessidades das gerações futuras (ONU, 1987). Dentre as várias ações a serem adotadas para viabilizar o DS, destaca-se a adoção de fontes alternativas para fins de ampliação dos recursos disponíveis, a promoção de tecnologias que visam otimizar a utilização de recursos e a implementação de medidas que propiciem a redução do consumo.

A substituição de fontes não renováveis por renováveis é uma opção a ser considerada, pois reduz impactos ambientais e amplia a possibilidade de recursos. Entende-se por renovável o recurso que pode ser repostado naturalmente em curto espaço de tempo, comparado ao tempo de recomposição dos não renováveis, como combustíveis fósseis. Tal desempenho possibilita a busca por equilíbrio entre tempo de regeneração e demanda sobre o recurso, sendo contornados impactos ambientais em razão da ação antrópica, pelo não esgotamento na natureza, fácil obtenção e menor dano à natureza devido a seu emprego (PINHO; GALDINO, 2014; NASCIMENTO; ALVES, 2016; BAGDADDE; ZHANG, 2020).

Neste sentido, esta pesquisa busca promover a substituição do uso de água potável por água da chuva (PALA, 2021), para que a mesma componha de forma parcial ou total a RTI exigida à edificação em estudo (MAY; PRADO, 2004; LIMA; RESSUREIÇÃO, 2018). No que diz respeito ao consumo de energia elétrica necessária ao funcionamento do SDI proposto, será estudada a possibilidade de substituição da energia convencional por aquela advinda do SHGE/EF, para atendimento total ou parcial da quantidade demandada.

Outro conceito relevante lançado pela ONU, através do Programa das Nações Unidas ao Meio Ambiente – PNUMA e da Conferência sobre Desenvolvimento Sustentável conhecida por Rio +20, foi o *Green Economy Initiative* – GEI (ONU, 2012), em lugar da expressão “ecodesenvolvimento” (ONU, 1972; ONU, 1992). A Iniciativa Economia Verde é entendida como sendo uma estrutura feita de processos produtivos que promovem estabilidade ambiental e social, constituindo meios que permitem a execução de tarefas que corroboram com o DS. Estão inseridas entre estes meios as tecnologias verdes – GREEN IT, assim chamadas por minimizarem impactos sociais, ambientais e econômicos da produção e dos produtos que delas fazem uso (DASTBAZ et al., 2015; COLOMBELLI et al., 2020).

Tecnologias embarcadas podem ser implementadas em um objeto ou um sistema de objetos, proporcionando melhorias em sua usabilidade e eficiência. Caso estas tecnologias otimizem o uso de recursos, podem ser consideradas GREEN IT. Estudos sobre adoção de tecnologias embarcadas em SSCI, particularmente em SDI, têm acontecido com frequência, mirando alcançar sustentabilidade social, econômica e ambiental. No caso deste trabalho, há utilização de tecnologias no SDI proposto, a fim de torná-lo capaz de realizar detecção com alta eficiência e resposta imediata ao sinistro, permitindo o controle rápido e preciso, e reduzindo consideravelmente o uso de recursos hídricos e energéticos, pois se os incêndios ocorrerem menos vezes, a água necessária para debelá-lo será menor, e a energia empregada para o funcionamento de detectores, bombas e geradores sofrerá redução.

## 2.4 ÁGUA PLUVIAL PARA RESERVA TÉCNICA DE INCÊNDIO (RTI)

Este tópico traz os conhecimentos científicos que nortearão este trabalho para cálculo do volume médio de água da chuva a ser coletado em um determinado Sistema de Captação de Água Pluvial – SCAP. Sabe-se que a escassez de água potável tem feito a coleta de água pluvial ser adotada em diversos países como políticas para sua captação e manejo, para fins potáveis e não potáveis (LY et al., 2017). Em casas dos Estados Unidos, Japão e Alemanha, a água pluvial é coletada para consumo humano (COOMBES et al., 2000; HERRMANN; SCHMIDA, 2000; ZAIZEN et al., 2000). Em Barcelona, a captação e o armazenamento adequados de água pluvial já são capazes de suprir todas as demandas não potáveis (DOMENECH; SAURÍ, 2011). Em 2014, cerca de 15% dos franceses utilizavam a água da chuva em atividades que dispensam potabilidade, economizando água potável em cerca de 11% (BELMEZITI et al., 2014).

Para se fazer este tipo de coleta, é preciso ver a origem da água, pois há poluentes no solo e no ar que prejudicam seu uso para certos fins. É recomendado por normas brasileiras o seu uso para fins que não exijam potabilidade, exceto se for submetida a tratamento adequado. É igualmente necessário o correto dimensionamento do reservatório, observando-se, para isto, a área do telhado e o índice pluviométrico (ABNT NBR 15.527, 2019). Um dos destinos não potáveis desta água é a Reserva Técnica de Incêndio – RTI, que é constituída pelo volume de água a ser mantido para pronto emprego em caso de ocorrência deste sinistro (NEVES; BERTOLO; ROSSA, 2006; NEGRISSELO et al., 2019). A depender do uso, é recomendado que a água pluvial passe por tratamento específico, conforme expresso no quadro 1.

**Quadro 1:** diferentes níveis de tratamento da água da chuva a depender da destinação

USO DE ÁGUA DA CHUVA	TRATAMENTO DA ÁGUA
Rega de Jardins	Não é necessário
Irigadores, combate a incêndio, ar condicionado	É necessário para manter os equipamentos em boas condições
Fontes e lagoas, banheiros, lavação de roupas e carros	É necessário, pois a água entra em contato com o corpo humano
Piscina/banho, para beber e para cozinhar	Desinfecção necessária, pois a água é ingerida direta ou indiretamente

Fonte: GROUP RAINDROPS, 2002

O uso não potável da água dispensa técnica apurada de tratamento, sendo suficiente o emprego de processos de sedimentação e filtração simples (MAY; PRADO, 2004). Quando destinada à RTI, o tratamento exigido só serve à contenção de resíduos, com propósito de manter equipamentos em boas condições (Quadro 1). Descartar água das primeiras chuvas, usar

telas de retenção de resíduos e empregar decantação à deposição de particulados são medidas que atendem tais exigências. Quanto aos telhados, os não ocupados por animais e pessoas são mais indicados para coleta, pois acumulam menos resíduos (Quadro 2).

**Quadro 2:** Classificação e tipo de uso de acordo com o tipo da área de coleta.

GRAU DE PURIFICAÇÃO	ÁREA DE COLETA DA CHUVA	USO DA ÁGUA DA CHUVA
A	Telhados (lugares não ocupados por pessoas ou animais)	Lavar banheiros, regar as plantas, a água filtrada é potável.
B	Telhados (lugares frequentados por pessoas e animais).	Lavar banheiros, regar as plantas, a água não pode ser usada para beber
C	Terraços e terrenos impermeabilizados, áreas de estacionamento	Mesmo para os usos não potáveis, necessita de tratamento.
D	Estradas, vias férreas elevadas	Mesmo para os usos não potáveis, necessita de tratamento.

Fonte: GROUP RAINDROPS, 2002

É exigido nas normas brasileiras que o reservatório de RTI tenha chave de nível ou alarme para indicar se o nível está abaixo do previsto e garantir uma reposição da capacidade efetiva a taxa mínima de 1 L/min por metro cúbico para o combate. Quanto ao seu local de instalação na edificação, o reservatório pode ser ao nível do solo, subterrâneo ou elevado, tendo este a vantagem de suprir os hidrantes mesmo sem a bomba hidráulica. Se a RTI for junta à reserva de consumo, a capacidade total é obtida pela soma dos dois volumes; a saída do volume de consumo deve ficar acima do nível da água da RTI (ABNT NBR 13.714, 2000), a fim de que esta não seja consumida para outras finalidades. As recepções de água pluvial e de água da rede devem ser independentes, garantindo-se a potabilidade pela execução de tratamento antes do reservatório principal (ABNT NBR 5.626, 2020).

No Brasil, cada Estado Federativo tem uma norma própria para definir qual a RTI adequada, que varia a depender do tipo de Edificação, cuja classificação, neste caso, tem como critérios principais: a natureza da ocupação, a altura, a carga de incêndio e área construída (NEGRISSELO et al., 2019). No caso do município de João Pessoa, a legislação vigente que concerne à segurança contra incêndio é aquela definida pelas Normas Técnicas do Corpo de Bombeiros Militar da Paraíba. A nível de legislação brasileira, em termos gerais, considera-se a quantidade mínima de água prevista para RTI, o volume  $V$  definido pela expressão:

$$V = Q * t \quad (1)$$

Onde  $Q$  é a vazão de duas saídas do sistema de hidrantes (tipo 1, 2 e 3) em litros por minuto e  $t$  é o tempo de 60 minutos para sistemas dos tipos 1 e 2 e de 30 minutos para sistema do tipo 3 (ABNT NBR 13.714, 2000).

Para cálculo do volume para dimensionar do reservatório, é mister que se saiba da dimensão da área da superfície sobre a qual a água irá escoar ao sistema de calhas, além do tipo de material usado na superfície e da pluviosidade da região. Para cálculo do volume afluente  $V_{\text{afl}}$ , observa-se a área de projeção horizontal  $A$  da superfície de captação, visto que o nível pluviométrico  $H$ , em milímetros, é medido a partir do plano horizontal. O coeficiente  $C$ , relativo à perda de volume no escoamento, assume valores de 0 a 1 (NEVES; BERTOLO; ROSSA, 2006). O volume utilizável é obtido,  $V_{\text{util}}$ , subtraindo-se do volume afluente  $V_{\text{afl}}$  o volume rejeitado nas primeiras chuvas  $V_{\text{rej}}$  e o volume descarregado  $V_{\text{desc}}$ , extravasado quando o reservatório chega ao limite. Assim, a expressão matemática calcula o volume utilizável é:

$$V_{\text{util}} = (C * A * H) - V_{\text{rej}} - V_{\text{desc}} \quad (2)$$

$$V_{\text{afl}} = C * A * H \quad (3)$$

Onde  $V_{\text{util}}$  é o volume acumulado no reservatório;  $V_{\text{rej}}$  é o volume rejeitado;  $V_{\text{afl}}$  é o volume afluente e  $V_{\text{desc}}$  o volume descartado (NEVES; BERTOLO; ROSSA, 2006). Neste trabalho, os volumes rejeitados e descartados são considerados nulos; logo, o volume utilizável será igual ao volume afluente. Quanto ao coeficiente  $C$ , nota-se que não há variações relevantes nos tempos de retorno usados na microdrenagem, nem com a mudança de intensidade nas precipitações. Os possíveis valores do coeficiente de escoamento, em conformidade com o tipo de superfície considerado, seguem relacionados na tabela 1 (PARANÁ, 2002).

**Tabela 1:** valores de coeficiente de escoamento  $C$  para superfícies urbanas

TIPO DE SUPERFÍCIE	VALOR RECOMENDADO	FAIXA DE VARIAÇÃO
Concreto, asfalto e telhado	0,95	0,90 – 0,95
Paralelepípedo	0,70	0,58 – 0,81
Blockets	0,78	0,70 – 0,89
Concreto e asfalto poroso	0,03	0,02 – 0,05
Solo compactado	0,66	0,59 – 0,79
Matas, parques e campos de esporte	0,10	0,05 – 0,20
Gramma solo arenoso	0,10	0,08 – 0,18
Gramma solo argiloso	0,20	0,15 – 0,30

Fonte: PARANÁ, 2002.

Tendo a área de projeção horizontal  $A$  da superfície de captação e o coeficiente de escoamento  $C$  da superfície do telhado, resta apenas calcular ou adquirir o dado sobre o nível

pluviométrico da região, para então poder projetar o volume de água passível de ser captado. Para obtenção do referido nível, há basicamente “...dois métodos ...: os medidores pontuais (pluviômetros e pluviógrafos) e os radares meteorológicos” (MOL, 2005, p. 7). Pluviógrafos e pluviômetros são medidores físicos, contudo, estes medem só a pluviosidade, enquanto aqueles registram, além desta medida, a duração da precipitação e a espessura da lâmina de água precipitada. Os radares, por sua vez, aferem a pluviosidade pela medição da intensidade reflexiva de pulso eletromagnético advindo de uma antena, que varia se este pulso encontra gotas de água e cristais de gelo na atmosfera. Todos captam a distribuição espacial da precipitação, mas apresentam erros ligados ao efeito de curvatura da terra sobre a reflexão e a calibração (BARRETT; MARTIN, 1981; CALVETTI; BENETI; FILHO, 2003).

Para superar interferências e inconsistências encontradas nas aferições em medidores pontuais e em radares, existe o método de aquisição de informações por meio de satélites de monitoramento de dados hidroclimáticos (SCOFIELD; KULIGOWSKI, 2003), os quais possuem a capacidade de acompanhar um sistema físico ou virtual em meio material ou evento, com aquisição de dados a distância acerca deles. No que se refere a dados hidrológicos e climáticos, este recurso possibilita monitoramento de áreas em escalas espaciais e temporais diversas (JENSEN, 2009). Dados de bases de satélites têm sido usados para estimar eventos hidrológicos, como a evapotranspiração real em bacias hidrográficas (SILVA, MANZIONE; ALBUQUERQUE FILHO, 2019a; ANA, 2020), para estudos de balanço hídrico.

Apesar do alto potencial do sensoriamento por satélite em estudos hidroclimáticos, é preciso armazenar organizadamente os dados, tratá-los e operacionalizá-los, para que pesquisadores adquiram dados. O Google Earth Engine – GEE – é a ferramenta computacional em nuvem que realiza bem tais ações e tem sido muito utilizada pela comunidade acadêmica da área da geotecnologia (MAGNONI, 2020). Ele contém imagens e imagens do planeta coletados remotamente por satélites, matematicamente tratados para os usuários. Dentre estes satélites, interessam a este estudo, devido ao vasto uso em atividades de pesquisa acadêmica, o *Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System* – FLDAS, o *Global Land Data Assimilation System* – GLDAS – e o *Monthly Climate and Climatic Water Balance for Global Terrestrial Surfaces* – TERRACLIMATE, sendo todos hidroclimáticos e com capacidade de estimar precipitações (MAGNONI, 2020).

O FLDAS apresenta informações úteis a estudos de hidroclimatologia, relativas a mais de 30 anos, fornecidas tanto pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA, pelo *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*, quanto pelo GEE

(MCNALLY et al., 2017; MCNALLY et al., 2019). Estes dados estão em escala mensal e resolução espacial de 0,1 graus (MCNALLY e NASA/GSFC/HSL, 2018). O GFLDAS faz avaliações globais que ajudam a prever clima, hidrologia e ciclo da água (MAGNONI, 2020), dispondo de dados de cerca de 20 anos, com escala temporal de 3 horas e resolução espacial de 0,25 graus (BEAUDOING et al., 2020a). O TERRACLIMATE, por sua vez, traz um grupo de dados que mostra o balanço mensal climático e hídrico na superfície da terra, incluindo precipitação, com escala temporal mensal e resolução espacial de 4 km, sendo disponibilizados dados desde o ano de 1958 (ABATZOGLOU et al., 2018; RODELL et al., 2004).

## 2.5 SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Nesta parte será abordada a estratégia adotada para determinar a capacidade de fornecimento energético por parte do SHGE/EF, determinando as potências úteis eólica e fotovoltaica possíveis de serem captadas para suprimento de energia demandada pelo SDI. A obtenção desta capacidade produtiva de energia, tanto no painel solar quanto no aerogerador, pode ser alcançada de forma direta, indireta ou por simulação.

Obter diretamente os dados consiste em fazer o levantamento das propriedades elétricas do sistema na placa ou turbina eólica em estudo, pela utilização de multímetros ou quaisquer outros equipamentos capazes de medir tais grandezas. Desta maneira, pretende-se obter os dados do SHGE/EF constituído sobre a edificação do PRODEMA, conectando multímetros aos terminais do painel e do aerogerador.

A aquisição indireta das propriedades elétricas ocorre quando se realiza as medidas de uma placa ou aerogerador em escala, de modo que se estabeleça a proporcionalidade de geração de energia elétrica entre os dispositivos de menores dimensões e os dispositivos dos quais se pretende obter as propriedades. Também é considerada uma forma de obter indiretamente estas informações quando se consegue medir variáveis que, apesar de não retratarem propriedades elétricas, interferem nelas, a exemplo da irradiância e da velocidade dos ventos.

No caso da irradiância, os dispositivos mais comuns para medi-la são os piranógrafos, que registram variações da intensidade da radiação solar global sobre uma superfície plana horizontal; também há os piranômetros, que auferem a radiação solar global e a difusa. Ambos os instrumentos fornecem os valores em  $\text{cal} * \text{cm}^2 * \text{mm}$ . Para medir a velocidade dos ventos, os instrumentos mais empregados são os anemógrafos, que auferem a distância percorrida pelo vento em quilômetro em relação ao instrumento (INMET, 2021).

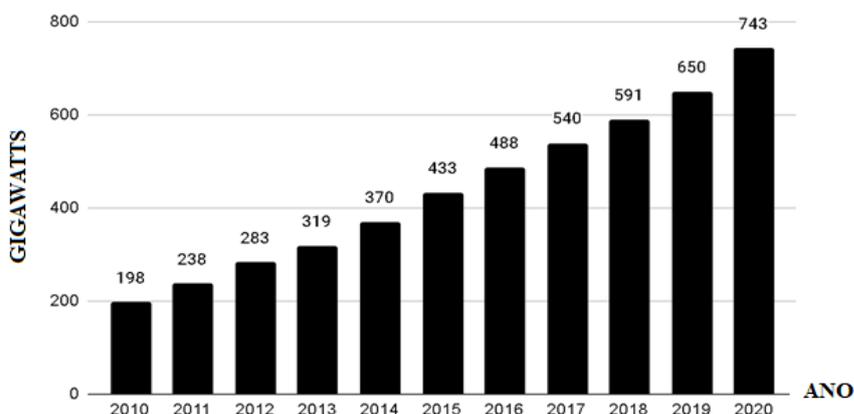
Estas propriedades ainda podem ser alcançadas através do processo de simulação, pelo qual uma função matemática é capaz de representar a causalidade entre os parâmetros de entrada (irradiância solar e velocidade do vento) e de saída (corrente e tensão). A adoção da instalação de equipamentos para execução de serviços remotos de obtenção de dados hidroclimáticos por meio satélite é um exemplo desta forma de obtenção das propriedades elétricas do SHGE/EF.

Este último método foi o escolhido para ser empregado devido à suficiência para atender as necessidades da pesquisa, e em razão da indisponibilidade do conjunto de instrumentos de medida citados, necessários à aquisição destas propriedades direta ou indiretamente. Por isso, assim como foi feito para aquisição de dados na parte desta pesquisa referente à pluviosidade, também será utilizada a ferramenta computacional de nuvem GEE para levantamento das informações sobre irradiância solar e velocidade dos ventos, sendo recepcionados, desta feita, apenas os dados da base hidroclimática TERRACLIMATE.

### 2.5.1 Estimativa de geração de energia elétrica a partir do uso de aerogerador

Na atualidade, a energia eólica é uma das principais fontes renováveis em termos absolutos, tendo sua utilização ampliada a cada ano. O gráfico da figura 5 indica a capacidade de geração de energia eólica no mundo de 2010 a 2020, tendo em cada barra a quantidade de energia gerada em um ano. Percebe-se que a geração de energia eólica passou de 198 Gigawatts em 2010 para 743 Gigawatts em 2020, totalizando um aumento de cerca de 375% em uma década (REN21, 2021).

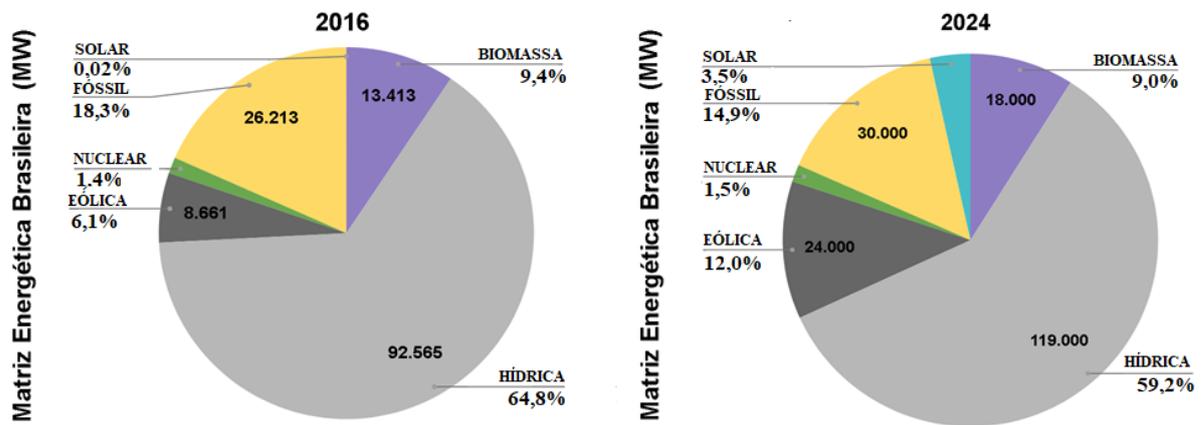
**Figura 5:** Capacidade global de produção de energia eólica de 2010 a 2020



Fonte: REN21, 2021.

De toda a energia produzida em escala mundial, 11,2% provém de recursos renováveis, sendo 2,4% advinda da energia eólica (REN21, 2021), que vem exibindo uma tendência ascendente em relação à quantidade de energia total produzida. No Brasil, a energia eólica corresponde a cerca de 10,9% da matriz energética, devendo chegar a 13,6% em 2025 (BRASIL, 2021). O gráfico da figura 6 expressa a divisão percentual da matriz energética brasileira em relação às diversas fontes de energia que a compõem. De acordo com ele, a energia eólica representava 6,1% da matriz energética em 2016, havendo a previsão de chegar a 12,0% em 2024 (ANEEL, 2015 apud PORTALSOLAR, 2016). Entretanto, em 2021, ela havia alcançado quase 11%, devendo atingir a marca prevista para 2024 já em 2022 (BRASIL, 2021).

**Figura 6:** Participação e previsão das principais fontes de energia na matriz energética brasileira de 2016 a 2024



Fonte: ANEEL, 2015 apud PORTALSOLAR, 2016.

No caso do aerogerador de pequeno porte, tendo o ar como fluido não viscoso, de densidade constante, escoamento sem turbulência, com partículas tendo o mesmo sentido de deslocamento e intensidade em qualquer ponto da seção transversal, há conservação de energia, e os únicos fatores que influenciam na mudança de nível de energia são a diferença de pressão antes e depois do rotor e a área de seção transversal (PICOLO; BÜHLER; RAMPINELLI, 2014). A energia cinética é igual à energia mecânica total, pois não há variação de energia potencial da massa de ar antes e depois do rotor. Pode-se daí, escrever:

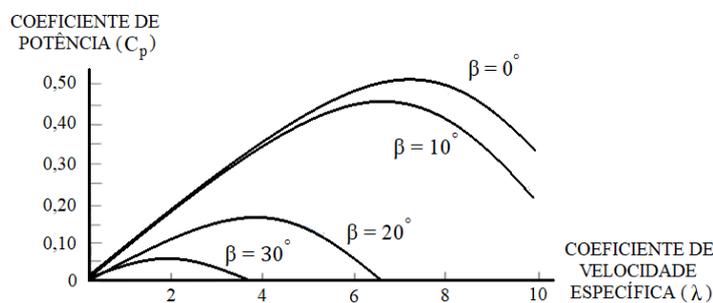
$$E_{\text{mec}} = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (4)$$

Onde  $m$  é a massa de ar em deslocamento e  $v$  é a velocidade do ar. A potência média total é a taxa de variação de energia  $E_{\text{mec}}$  por unidade de tempo. Sendo assim, obtém-se:

$$P_{\text{total}} = \frac{E_{\text{mec}}}{\Delta T} = \frac{1}{2} * \frac{m * v^2}{\Delta T} = \frac{1}{2} * \frac{\rho * V * v^2}{\Delta T} = \frac{1}{2} * \frac{\rho * A * h * v^2}{\Delta T} \Rightarrow P_{\text{total}} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (5)$$

A letra A na equação 5 corresponde ao valor da área de secção transversal, sendo a potência proporcional a ela e ao cubo da velocidade. Por isto, só é viável a geração de energia elétrica a partir da energia eólica em lugares nos quais há fluxo rápido e constante de vento. Parte desta energia não é absorvida pelo aerogerador, de forma que, teoricamente, o máximo de potência útil possível de se extrair de uma turbina eólica é o equivalente a 59,3% da potência total (PICCOLO; BÜHLER; RAMPINELLI, 2014). Este rendimento é chamado de coeficiente de potência  $C_p$ , e depende do coeficiente de velocidade específica  $\lambda$  e do ângulo  $\beta$  da lâmina das hélices do aerogerador, conforme expresso no gráfico da figura 7.

**Figura 7:** Variação de  $C_p$  em função de  $\lambda$  e  $\beta$



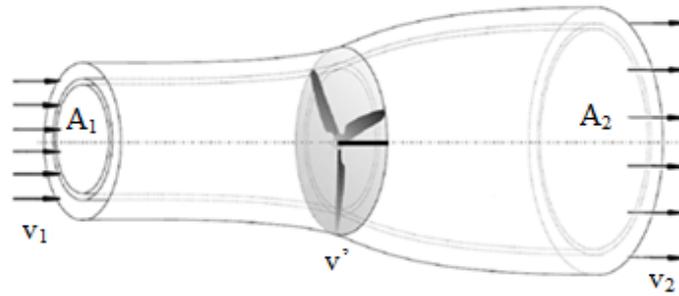
Fonte: FORTMANN, 2015.

As expressões que calculam o coeficiente  $C_p$  são dadas pelas equações 6 e 7, que trazem a razão entre potência útil extraída pelo conversor e potência mecânica total da corrente de ar, ligeiramente antes dela chegar às hélices (CASTRO, 2009).

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{total}}} \quad (6)$$

$$C_p = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{total}}} \Rightarrow P_{\text{útil}} = P_{\text{total}} * C_p \Rightarrow P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} * \rho * A * C_p * v^3 \quad (7)$$

Parte da energia mecânica inicial é responsável pela potência utilizada para girar o rotor. Devido à massa de ar ser a mesma antes e depois do fluido passar pelo aerogerador, conclui-se que há diminuição da velocidade de escoamento e conseqüente diminuição de energia cinética. A equação de continuidade indica que a velocidade e a área são inversamente proporcionais, logo, a redução de velocidade aumentará a área de seção transversal (figura 8).

**Figura 8:** Fluxo de corrente do ar antes e depois do rotor

$A_1$  – área de seção transversal antes de passar pela turbina

$A_2$  – área de seção transversal após passar pela turbina

$v_1$  – velocidade do ar antes de passar pela turbina

$v_2$  – velocidade do ar após passar pela turbina

$v'$  – velocidade tangencial da turbina

Fonte: PICOLO, BÜHLER, RAMPINELLI, 2014.

Uma variável importante é o coeficiente adimensional velocidade específica ou relação de velocidade (*tip–steep ratio*), dado pela razão entre a velocidade linear da extremidade da pá ( $v'$ ) e a velocidade do vento ( $v_1 = v$ ), visto na equação 8, sendo R dado em metros,  $\omega$  em radianos por segundo e  $v$  em metros por segundo.

$$\lambda = \frac{v'}{v} = \frac{\omega * R}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\omega * R}{\lambda} \quad (8)$$

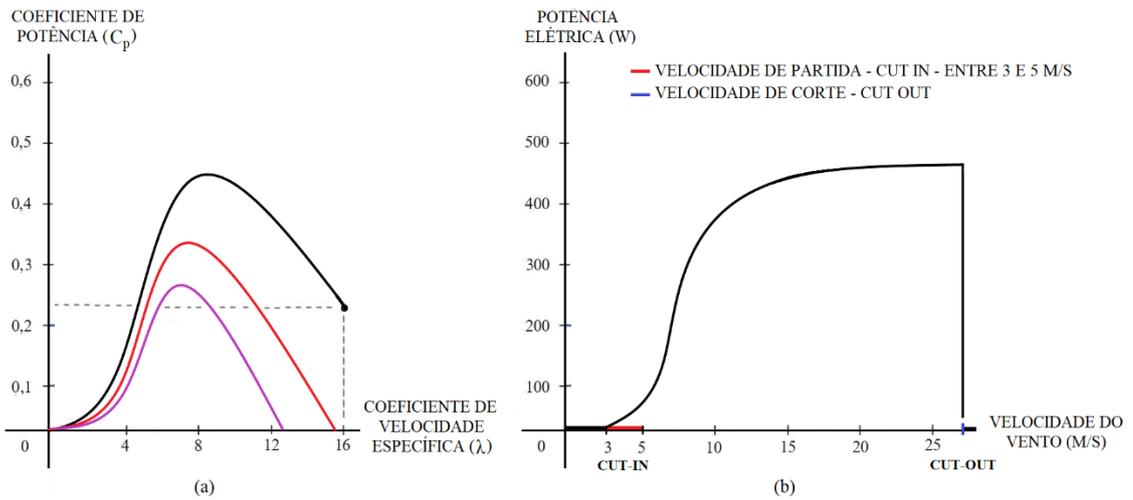
Para o valor ótimo do coeficiente de relação de velocidade  $\lambda_{\max}$ , a potência mecânica efetiva é ótima. Considerando as equações 7 e 8, esta potência pode ser escrita como sendo:

$$P_{\text{útil ótima}} = \frac{1}{2} * \rho * C_p * A * \frac{\omega^3 * R^3}{\lambda_{\max}^3} = \frac{1}{2} * \rho * C_p * \pi * R^2 * \frac{\omega^3 * R^3}{\lambda_{\max}^3}$$

$$P_{\text{útil ótima}} = \frac{C_p}{2 * \lambda^3} * \pi * \rho * \omega^3 * R^5 \quad (9)$$

Em geral, sistemas eólicos trabalham com velocidades variáveis. Por isso, é preciso atentar às variações do coeficiente de potência  $C_p$  em decorrência das mudanças sofridas pelo coeficiente de velocidade específica  $\lambda$ , estando a relação entre estes coeficientes expressos no gráfico (a) da figura 9. O gráfico (b) da mesma figura apresenta a variação da potência elétrica de saída da turbina eólica devido à variação da velocidade do vento com o passar do tempo.

**Figura 9:** gráfico a ( $C_p$  versus  $\lambda$ ), gráfico b (P versus v)



Fonte: MENEZES JÚNIOR; SANTOS; REIS, 2020.

A curva de potência elétrica em função da velocidade do vento, descrita no gráfico (b) da figura 9, é característica do funcionamento de turbinas eólicas, sendo o sistema ativado quando o vento atinge a velocidade  $v_{\text{cut-in}}$ , que em geral, varia de 3 a 5 m/s. À medida que a velocidade aumenta, a potência varia proporcionalmente ao cubo da velocidade até esta atingir seu valor nominal. Então, o sistema atinge a potência nominal, que é a máxima capacidade de geração de energia por unidade de tempo. Se a velocidade do vento continuar a aumentar, chegará na velocidade de corte ( $v_{\text{cut-out}}$ ), que é aquela que ao ser alcançada ocasiona o desligamento do rotor para evitar danos ao sistema (DUPONT; KOPPELAAR; JEANMART, 2017). A potência mecânica disponibilizada por uma corrente de ar a uma turbina eólica, nos casos em que a velocidade é variável, é similar àquela que foi definida na equação 7, podendo ser escrita como:

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{mec}} = \frac{dE_{\text{mec}}}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2} * m * v^2\right)}{dt} = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho * A * v^3 \quad (10)$$

Com os coeficientes numéricos  $c_1$  a  $c_6$  assumindo, respectivamente, os valores 0,517; 116; 0,4; 5; 21 e 0,0068, e o valor de  $\lambda_i$  sendo obtido pela equação 11, é possível calcular o valor do coeficiente  $C_p$  para a maioria das turbinas eólicas, utilizando a equação 12. (SLOOTWEB; POLINDER; KLING, 2001).

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08 * \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (11)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 * \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4 \right) * e^{-\left(\frac{c_5}{\lambda_i}\right)} + c_6 * \lambda \quad (12)$$

O torque produzido pelo rotor, enfim, pode ser calculado pela expressão matemática:

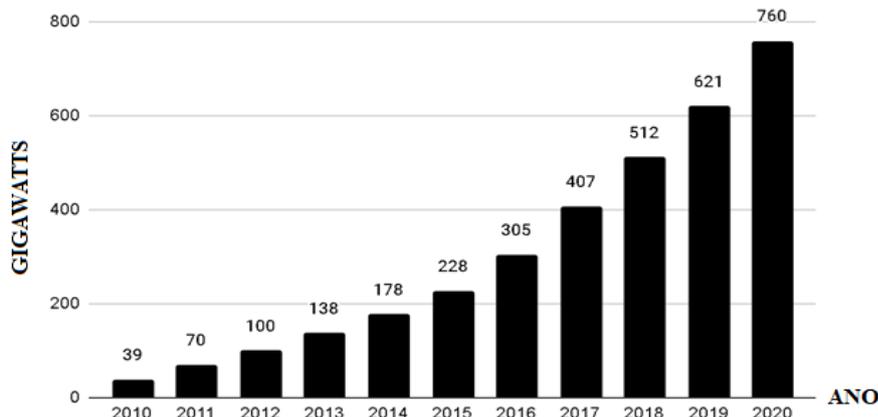
$$\tau = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho * A * \frac{v^3}{\omega} \quad (13)$$

Assim, fica descrito o modelo genérico de turbina eólica de maioria dos modelos, e a partir desta modelagem, serão estimados os valores de corrente e potência do sistema de geração de energia, por meio de cálculos e dados de bases hidroclimáticas consideradas. Na seção a seguir, será abordado o modelo matemático de painel solar para produção de energia elétrica.

### 2.5.2 Estimativa de geração de energia elétrica a partir de modelo de painel fotovoltaico

Do total de energia gerada no mundo, 4,2% é derivado de fonte fotovoltaica, geotérmica e de biomassa, com a primeira demonstrando aumento em seu emprego na geração de energia (REN21, 2021). Conforme informações contidas no gráfico da figura 10, a geração de energia fotovoltaica se elevou sobremaneira nos últimos anos, passando de 39 (trinta e nove) Gigawatts no ano de 2010 para 760 (setecentos e sessenta) Gigawatts em 2020, o que representou um aumento de, aproximadamente, 1850% em uma década (REN21, 2021).

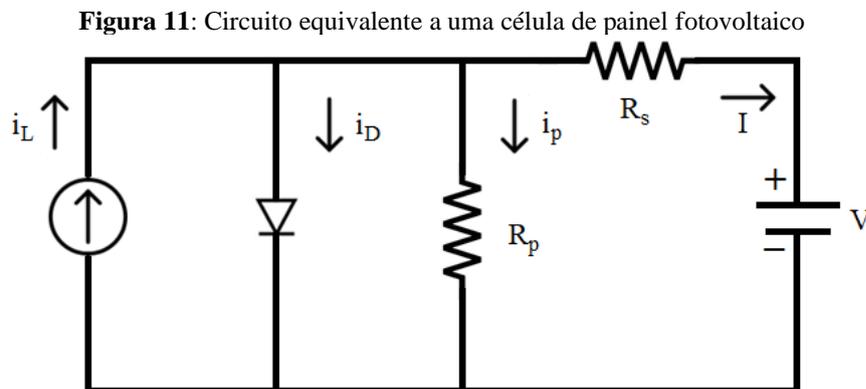
**Figura 10:** Capacidade global de geração de energia solar fotovoltaica de 2010 a 2020



Fonte: REN21, 2021.

No Brasil, atualmente, a energia fotovoltaica concebe cerca de 2% da matriz energética, podendo chegar a 2,9% até o final deste ano, apresentando um incremento de mais de 2000% em apenas três anos (BRASIL, 2021). Em 2016, o gráfico da figura 6 (p. 37) revela que a energia solar correspondia apenas a 0,02% do total de energia demandada pelos brasileiros e, na época, estimava-se que este recurso só representaria 3% da matriz energética do país no ano de 2024 (ANEEL, 2015 apud PORTALSOLAR, 2016), contudo, este número pode ser alcançado ainda em 2021.

O modelo de painel fotovoltaico considerado neste estudo é composto por células fotovoltaicas que se assemelham ao circuito representado na figura 11. O mesmo é composto basicamente por uma fonte de corrente fotogerada  $i_L$ , quem, por sua vez, conecta-se em paralelo com um diodo, atravessado por uma corrente  $i_D$ . Ademais, instalou-se duas resistências, uma em série  $R_s$ , para simular a resistência interna devido aos contatos metálicos da célula por onde passa a corrente de saída  $I$ , e outra em paralelo  $R_p$ , para simular a dissipação de energia na junção do diodo com a fonte de corrente, por onde passa a corrente de fuga  $i_p$ .



Fonte: HECKTHEUER, 2001.

Considerando  $I_0$  como sendo a corrente de saturação reversa do diodo,  $I_{pv}$  a corrente fotoelétrica do sistema,  $V_t$  a tensão térmica do módulo,  $m$  a constante de idealidade do diodo, com o valor da mesma variando entre 1,0 e 1,5, de forma que para um diodo ideal, tem-se  $m = 1$  (SOTO; KLEIN; BECKMAN, 2006). A relação entre a tensão  $V$  e a corrente  $I$  do módulo fotovoltaico é dada por:

$$I = I_{pv} - I_0 * \left[ e^{\left( \frac{V + R_s * I}{m * V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s * I}{R_p} \quad (14)$$

A tensão térmica modular  $V_t$  é diretamente proporcional ao número de células  $N_s$  dispostas em série e à temperatura  $T$  na junção P-N, sendo, porém, inversamente proporcional à carga do elétron ( $e = 1,60217646 * 10^{-19}$  C). Utilizando a constante de Boltzmann como fator multiplicador da equação 15 ( $k = 1,380650310 * 10^{-23}$  J/K), obtém-se a seguinte expressão (MENEZES JÚNIOR; SANTOS; REIS, 2020):

$$V_t = \frac{N_s * k * T}{q} \quad (15)$$

A corrente fotoelétrica  $I_{pv}$  depende de temperatura e irradiância. Para obtê-la, deve-se tomar os valores padrões de irradiância direta normal –  $G_n = 1000$  w/m<sup>2</sup> – e de temperatura de normalização –  $T_n = 25^\circ\text{C}$  (KIPPER; GASPARIN; KRENZINGER, 2018). A irradiância direta normal ou DNI é a taxa de energia que recai sobre certa parte da placa, ortogonalmente ao plano que a contém (INPE, 2017), enquanto a temperatura nominal  $T$  é a que se supõe ter o ambiente no qual a placa está inserida. Logo, a equação da corrente fotovoltaica é dada por:

$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_i * \Delta T) * \frac{G}{G_n} \quad (16)$$

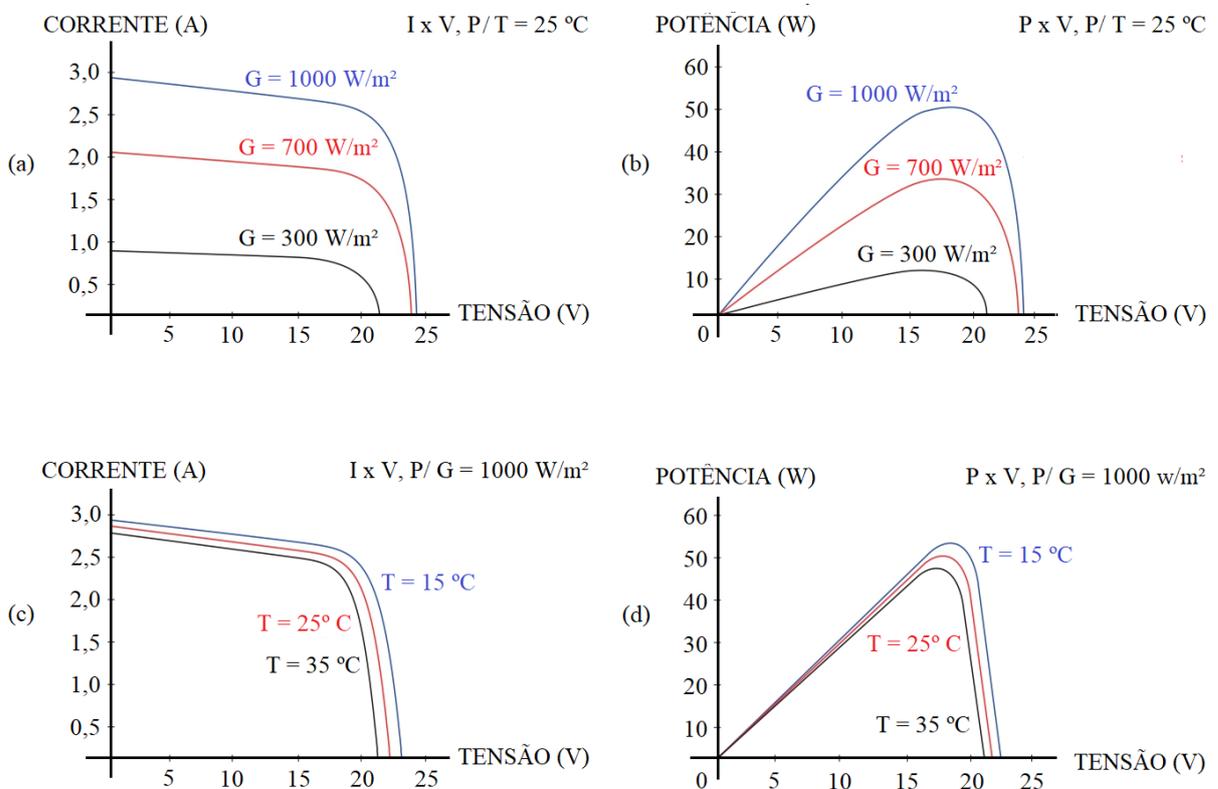
$$I_{pvn} = I_{sv_n} * \left( \frac{R_p + R_s}{R_p} \right) \quad (17)$$

Quando a tensão fica negativa, ultrapassando o valor usual da constante térmica  $V_t = 25$  mV, ocorre a polarização inversa, surgindo a corrente de saturação  $I_s$ , com sentido contrário ao fluxo de carga e aproximadamente igual à corrente original  $i$  do circuito ( $I_s \approx i$ ). A corrente de saturação depende de  $T$ , dobrando de valor a cada aumento de  $10^\circ\text{C}$  e reduzindo pela metade a cada diminuição em  $10^\circ\text{C}$  (LETCHER; FTHENAKIS, 2018). Além de sofrer influência da temperatura, a corrente de saturação reversa  $I_0$  depende do coeficiente de difusão de elétrons no interior das junções P-N, da densidade de portadores de carga e outros parâmetros físicos (FAHRENBRUCH; BUBE, 1983), de modo que se obtém:

$$I_0 = \frac{I_{sc_n} + K_i * \Delta T}{e^{\left( \frac{V_{oc_n} + K_v * \Delta T}{m * V_t} \right)} - 1} \quad (18)$$

Na equação 19, são novidades o coeficiente de variação da tensão com a temperatura  $K_v$  de um circuito aberto, a corrente de curto circuito  $I_{sc_n}$ , a tensão de circuito aberto  $V_{oc_n}$ . Junto com as tensões e as correntes nominais, estas grandezas permitem que se calcule o valor de potência máxima do sistema. Para isto, deve-se garantir que as exigências padrões sejam atendidas ( $G_n = 1000 \text{ w/m}^2$ ) e, através do uso de um multímetro, obter as medidas de tensão de circuito aberto  $V_{oc_n}$  e de corrente de curto-circuito  $I_{sc_n}$ , mantendo desconectados, durante as leituras, o painel e a carga. Tendo os valores de corrente e tensão, as curvas de corrente e de potência em função da voltagem ( $I \times V$  e  $P \times V$ ) podem ser traçadas, caracterizando o painel fotovoltaico. Nos gráficos da figura 12 estão expressas as curvas características de um painel solar, de acordo com as variações da irradiância e da temperatura.

**Figura 12:** Gráficos de I em função de V - (a) e (c) - e de P em função de V - (b) e (d)



(a) Curva  $I \times V$  para  $T = 25^\circ\text{C}$  e diversos valores de irradiância; (b) Curva  $P \times V$  para  $T = 25^\circ\text{C}$  e diversos valores de irradiância; (c) Curva  $I \times V$  para  $G = 1000\text{W/m}^2$  e diversos valores de temperatura; (d) Curva  $P \times V$  para  $G = 1000\text{W/m}^2$  e diversos valores de temperatura.

## 2.6 EMPREGO DE TECNOLOGIAS EMBARCADAS EM SDI

Ao observar o conceito de incêndio, percebe-se que quando este fenômeno acontece existem três principais grandezas relacionadas a ele: as chamas, os gases resultantes da combustão e as variações no gradiente de temperatura. Por este motivo, via de regra, os detectores convencionais de incêndio têm o funcionamento baseado na sensibilidade que possuem com relação a uma destas variáveis, e a meta deste trabalho é estabelecer um SDI que realize a análise integrada e concomitante destas grandezas, de modo a detectar precocemente o incêndio, usando, para isto, tecnologia embarcada.

Os incêndios são uma realidade da vida urbana, e os SDAI fazem parte do sistema de proteção contra incêndios previstos para os mais diversos tipos de edificações, denominado SSCI. Os SSCI normatizados têm, basicamente, três funções primordiais: monitorar variações ocorridas em certas propriedades físicas do ambiente por emprego de uma heurística capaz de associar cada conjunto de valores captados a uma situação predefinida, presumindo com precisão o que ocorre no local; detectar a ocorrência ou não de incêndio pela sensibilização de sensores pela variação de propriedades físicas no ambiente; e controlar o sinistro por acionamento dos sistemas de bombas e *sprinklers* e pela transmissão de informações à central de vigilância e até mesmo ao Corpo de Bombeiros local, para execução de protocolos.

Atualmente, os itens pertencentes ao SSCI disponíveis no mercado, quanto à atuação direta ou indireta no combate ao incêndio, podem ser classificados em passivos ou ativos. As normas brasileiras exigem que estes itens tenham certificação nacional ou internacional. São considerados passivos aqueles itens que não atuam diretamente para debelar o incêndio, mas são benéficos para diminuir a velocidade de propagação do fogo, dando mais tempo para que as pessoas possam deixar a edificação durante o sinistro. São exemplos deste tipo proteção, o aumento de resistência dado a certas estruturas metálicas e a compartimentação do ambiente (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

Os itens de proteção ativa, por outro lado, agem diretamente para conter o princípio de incêndio, evitando que ocorra a propagação. Dentre estes artigos, destacam-se os hidrantes, os extintores, os chuveiros automáticos, os alarmes e os detectores de incêndio. Em conjunto com os Sistemas de Sinalização, compostos essencialmente por demarcadores de rotas de fugas, placas e iluminação de emergência, os dispositivos de proteção ativa são responsáveis por debelar incêndios em edificações e dar melhores condições para as pessoas saírem em segurança do local.

### 2.6.1 Sistemas de Detecção e Alarme de Incêndio normatizados

Os SDAI são essenciais às ações de intervenção prévia e, para que funcionem em sua plenitude, devem conter os seguintes componentes: central de alarme, sinalizador audiovisual, acionadores e detectores automáticos e acionadores manuais. A central coleta dados dos detectores e, em caso de confirmação do incêndio os sinalizadores são ativados. Os acionadores manuais, por sua vez, servem aos casos em que algum ocupante da edificação perceba o princípio de incêndio antes do acionamento do SDAI ou dos *sprinklers*, por isso, devem ser instalados mesmo em edificações com sistemas de detecção e extinção. O SDAI é classificado em convencional e endereçável (ABNT NBR 17.240, 2010; NFPA 72, 2019).

O Sistema de Detecção Convencional – SDC – possui um ou mais circuitos de detecção, sendo cada um deles instalado para proteção de uma determinada área. No momento em que algum dos dispositivos é sensibilizado, a central de alarme o identifica, bem como consegue localizar a zona onde se encontra, mas não é capaz de perceber o ponto exato do incidente, acionando todos os *sprinklers* da seção. Por isto, o SDC é pouco usado, restringindo-se a casos que dispensam a localização específica do incêndio, como ambientes menores ou menos compartimentados (ABNT NBR 17.240, 2010; NFPA 72, 2019).

O Sistema de Detecção Endereçável – SDE – também pode ter um ou mais circuitos de detecção, com cada um deles responsável pela proteção de uma área, indicando cada dispositivo e a área protegida por ele. Diferente do SDC, neste caso é possível identificar cada dispositivo ao ser empregado e o exato local do sinistro. Este sistema é ágil e preciso, sendo recomendado para locais cujo acionamento e combate devem ser mais céleres, como data centers e hospitais, indicando dispositivos ativos e falhas, o que é capital para se estabelecer uma manutenção adequada (ABNT NBR 17.240, 2010; NFPA 72, 2019).

Os SDE estão subdivididos nas classes A e B. A classe A possui fiação de retorno para central em cada circuito, por isso se houver defeito em um dispositivo o sistema continua funcionando normalmente, ficando inativo só o dispositivo com falha. A classe B não tem fiação de retorno para central, assim, a interrupção em um ponto paralisará parte ou todo o sistema. Esta classe é bastante usada, pois demanda um custo de instalação mais baixo, uma vez que usa uma quantidade menor de fiação (ABNT NBR 17.240, 2010; NFPA 72, 2019).

Se o SDE monitorar continuamente a temperatura e a concentração de fumaça e comparar estes dados a valores predefinidos, é chamado de Sistema de Detecção Endereçável Analógico (SDEA), uma vez que a central tem ajustado o nível de alarme dos dispositivos

detectores que coordena. Além disso, em sua biblioteca o SDEA apresenta funções, dados e rotinas que auxiliam na operação e manutenção do sistema, além da opção de habilitação ou desabilitação ponto a ponto, de ajuste de sensibilidade, entre outros.

Caso o SDEA siga pelo menos um método de avaliação de desempenho através de alguma variável em função do tempo e pelo emprego de um sistema lógico comparar a dados predefinidos de ativação do alarme, recebe o nome de Sistema de Detecção Endereçável Analógico Algorítmico (SDEAA). São os detectores mais precisos previstos na norma brasileira, definindo decisões a serem tomadas e estados de alarme, de pré-alarme ou de falha por meio de parâmetros logicamente coerentes (ABNT NBR 17.240, 2010; NFPA 72, 2019).

O SDAI pode ser integrado a outros sistemas de SCI, como o sistema de bombas ou de *sprinklers*, para que trabalhem simultaneamente (ABNT NBR 17.240, 2010; NFPA 72, 2019). Também é possível associar o SDAI a sistemas estruturais que não fazem parte da SCI, para aperfeiçoar a detecção e o alarme, a exemplo do SDAI do Estádio Independência, em Minas Gerais, quando o mesmo foi integrado ao "sistema de sonorização e ao BMS, permitindo o envio de mensagens eletrônicas ou sonoras individualizadas às diversas áreas do estádio, para público, atletas, funcionários, operadores e usuários com alto grau de inteligibilidade" (LUMENS ENGENHARIA, 2011). Segue adiante a abordagem sobre os detectores mais usuais.

### 2.6.1.1 Principais tipos de detectores utilizados no SDAI

#### 2.6.1.1.1 *Detectores de fumaça*

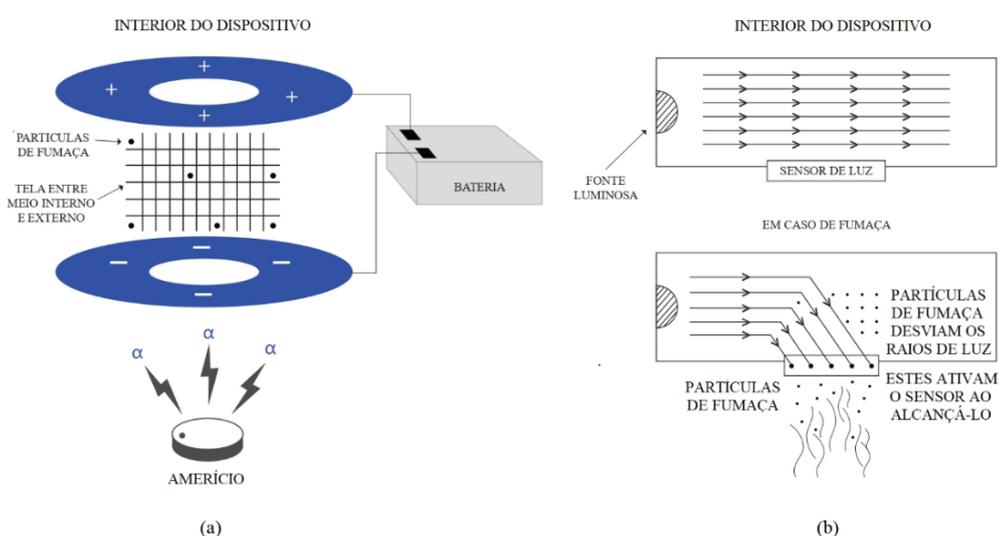
Estes detectores são dispositivos sensíveis aos gases que compõem a fumaça durante a combustão, tendo a capacidade de perceberem a modificação nos níveis de concentração destes produtos da queima e as alterações dos patamares destes níveis em relação a determinados parâmetros, de maneira que, ao ultrapassarem limiares preestabelecidos, ocasionam o acionamento destes dispositivos. Os detectores de fumaça podem ser classificados, basicamente, em dois tipos: (i) os detectores pontuais, que por sua vez estão subdivididos em iônicos e ópticos, e (ii) os detectores lineares (BRENTANO, 2015; NEGRISSELO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

O detector iônico, em sua constituição, apresenta o amerício (Am) como elemento radioativo capaz de ser emissor de partículas alfa, ionizando os átomos de ar do ambiente.

Quando a fumaça penetra no detector, o processo de ionização do Amerício é dificultado, ocasionando a redução na liberação de partículas alfa, evento este que pode provocar o acionamento do alarme. O interior deste detector e o seu princípio de funcionamento estão representados na figura 13a. Este detector é considerado de baixo custo, contudo, o seu uso é questionado por empregar material radioativo; especialistas, porém, afirmam não haver risco de contaminação, pois a quantidade é baixa e as partículas liberadas não cruzam o dispositivo (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

O detector ótico possui células fotoelétricas que formam uma corrente que sofre alterações quando o fluxo luminoso do ambiente é modificado. Ocorre mudança neste fluxo quando certo volume de fumaça chega ao detector, ocasionando o acionamento. As células podem ser iluminadas permanentemente ou não receber o fluxo luminoso diretamente. No primeiro caso, a fumaça reduz o fluxo de luz e a corrente produzida pelas células, acionando o alarme; no segundo caso, ao incidir luz do ambiente nas partículas de fumaça que entram no detector, elas excitam as células fotoelétricas que emitem corrente, provocando o acionamento do SDAI. O interior deste tipo de detector e o princípio de funcionamento do mesmo encontram-se representados na figura 13b (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

**Figura 13:** Princípio de funcionamento de detectores de fumaça iônico (a) e de fumaça ótico (b)

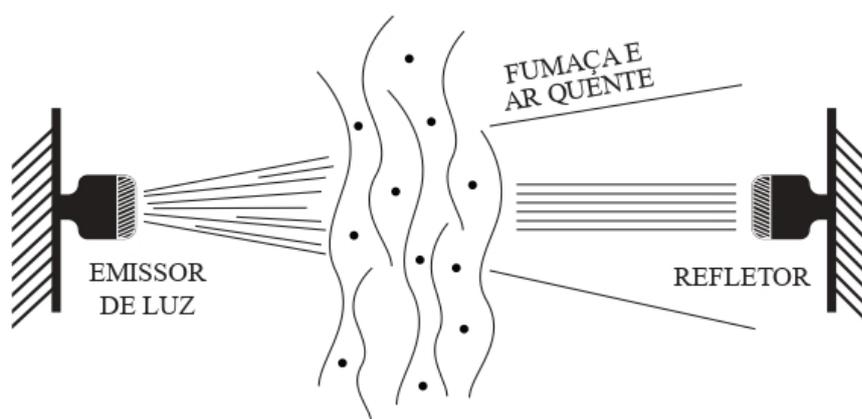


Fonte: DEWITT, S/D.

Detectores lineares, no que lhes concerne, funcionam com base na emissão de um feixe de luz (emissor) e de sua reflexão (refletor), devendo estes componentes serem instalados em paredes opostas. O feixe é emitido em direção ao refletor que reflete os raios ao emissor. Na

presença de fumaça, a intensidade do feixe é alterada, o que provoca a ativação do detector (figura 14). Há ainda no interior dele um microprocessador com um algoritmo que reduz os casos de falsos alarmes. São muito usados em locais com espaços amplos, como shoppings e bibliotecas, onde devido à altura elevada dos pavimentos, é ineficiente o uso de detectores pontuais. Um único detector linear é capaz de substituir vários detectores pontuais, sem que ocorra a perda de eficiência e de área de atuação (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

**Figura 14:** funcionamento de um detector linear de fumaça



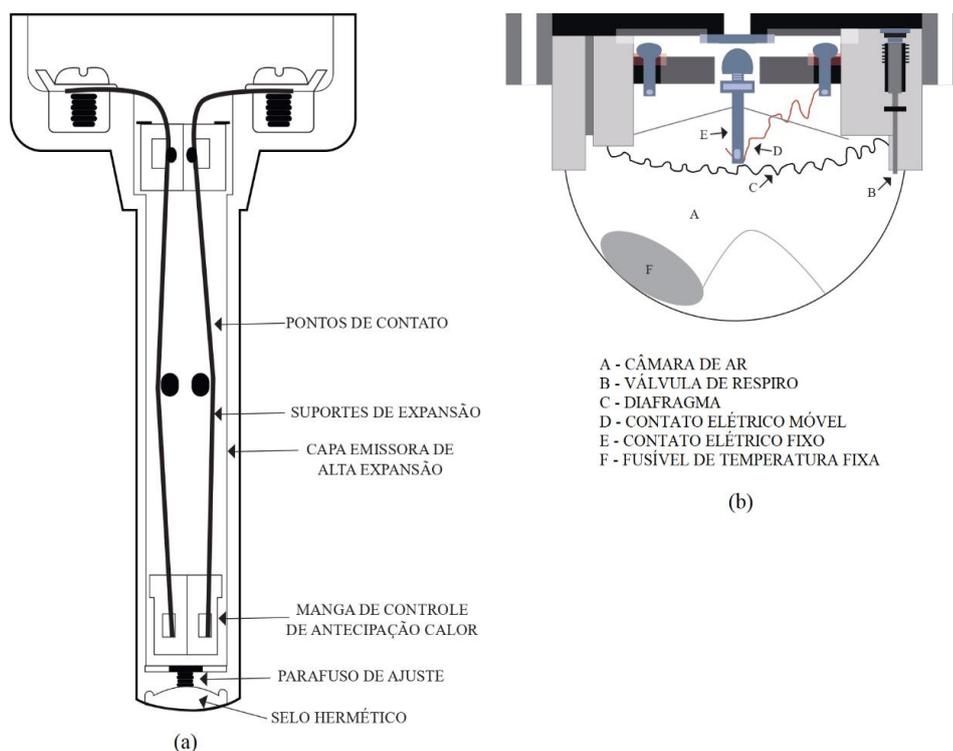
Fonte: GLOBAL AMÉRICA, S/D.

#### 2.6.1.1.2 Detectores de temperatura

Estes dispositivos tem sua sensibilidade voltada às mudanças de temperatura, podendo ser classificados em dois tipos: térmico, que são aqueles usados quando a variação de temperatura indica necessariamente que há incêndio, e o termovelocimétrico, que avalia a velocidade com que a temperatura varia, indicado para casos cuja rapidez do aumento da temperatura indica indubitavelmente que há ocorrência de incêndio.

Os detectores térmicos apresentam uma liga de fusão que é rompida a partir do momento em que o sistema atinge determinada temperatura, resultando na liberação do coletor externo de calor do fusível, sendo tal resposta a confirmação do acionamento deste detector (figura 15a). Os detectores termovelocimétricos, por sua vez, contêm uma câmara selada e um diafragma que, com a mudança rápida de temperatura, o ar do diafragma expande e o comprime, fazendo com que haja o toque entre os contatos elétricos, liberando a circulação de corrente (figura 15b) (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

**Figura 15:** Detectores de temperatura térmico (a) e termovelocimétrico (b)



Fonte: DEWITT, S/D.

### 2.6.1.1.3 Detectores multissensoriais (fumaça + temperatura)

São detectores que associam o sensor de fumaça e de temperatura, para que, a partir da disposição deles numa só estrutura, funcionem conjuntamente, enviando dados sobre temperatura e concentração de fumaça à central de incêndio, podendo ser ajustados em várias faixas de sensibilidade e usar métodos variados de medição. Oferecem uma efetividade alta, e os dados colhidos recebem tratamento heurístico descrito por um algoritmo lógico, para nortear a tomada de decisão. A instalação deles é adequada a vários ambientes, fechados ou abertos, nos quais a variação destas grandezas indique incêndio (BRENTANO, 2015; NEGRISSELO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

### 2.6.1.1.4 Detectores pontuais de chama

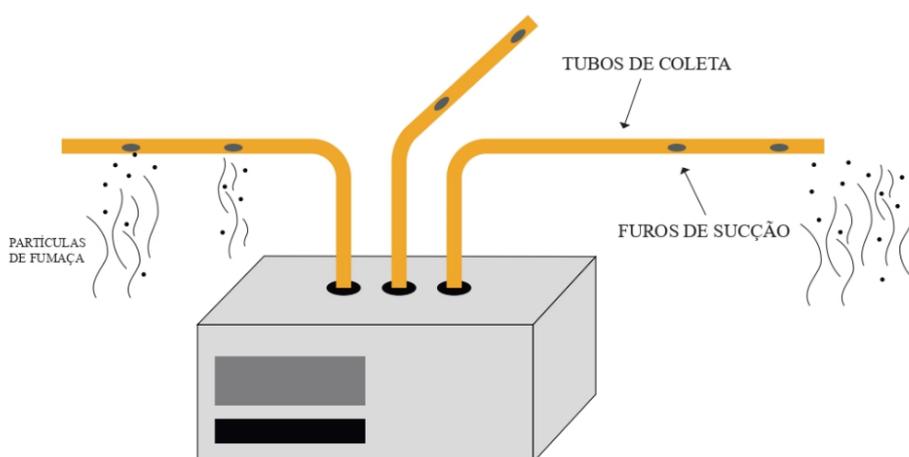
Estes dispositivos se destacam pela apresentação de sensibilidade às radiações emitidas pelo espectro da chama. São usados quando o princípio de incêndio necessariamente forma chama. Para ser eficiente, é preciso que não haja obstáculo que impeça a recepção da radiação

e que a área a ser protegida esteja dentro do campo de captação do detector. São bastante usados em locais amplos como hangares, áreas de produção petroquímica com fluidos inflamáveis e em locais abertos e ventilados, onde a fumaça e o calor se dissipam, o que inviabiliza o uso de detectores de temperatura e de fumaça (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

#### 2.6.1.1.5 *Detector por amostragem de ar (HSSD)*

Este tipo de detector atua a partir da análise dos produtos da combustão, adquirindo amostras de ar por meio de uma rede de tubos de sucção. A detecção ocorre por emprego de laser, por isso o nome High Sensitivity Aspirating Smoke Detection – HSSD – que quer dizer Sistema de Detecção Precoce de Fumaça. Sua alta eficiência se dá pelo fato de que a fumaça pode ser percebida pelo aparelho antes mesmo de se tornar visível, sendo o incêndio identificado de maneira bastante precoce. Este tipo de detector encontra-se representado na figura 16 (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO et al., 2019; SEITO et al., 2008).

**Figura 16:** Detector por amostragem de ar (HSSD)



Fonte: BRENTANO, 2015; SEITO et al., 2008.

#### 2.6.1.1.6 *Chuveiros automáticos ou sprinklers*

Em Sistemas de Chuveiros Automáticos (SCA), o termo “automático” decorre do fato da abertura destes dispositivos acontecer sem que haja intervenção humana, em consequência do rompimento de ampola ou de solda metálica, instalada no aspersor e sensível ao calor. De

maneira concisa, é possível definir uma rede de chuveiros automáticos como sendo aquela composta por tubulações conectadas e pressurizadas por bombas hidráulicas, tendo chuveiros conexos a orifícios nelas, separados um em relação a outro, sob certa distância regulamentar (ABNT NBR 10.897, 2020; NFPA 13, 2019).

É preciso destacar que os *sprinklers* previstos na ABNT NBR 10.897/2020 servem para uso geral, havendo a norma específica ABNT NBR 16.981/2021, baseada na NFPA 13/2019, para os casos de uso de aspersores em depósitos. No total, são cinco os principais tipos de *sprinklers* destinados a edificações em geral. O SCA de tubo molhado são os mais usados e possuem tubulações cheias de água pressurizada, e quando certo aspersor tem a ampola rompida devido à temperatura, o fluxo é liberado. O SCA de tubo seco tem tubulação fixa repleta de ar comprimido ou nitrogênio sob pressão menor que a da água, sendo indicado para locais de baixas temperaturas, onde caso a água fique na tubulação, pode vir a congelar. Na ocorrência do rompimento da ampola, a válvula de tubo seco é aberta por diferencial de pressão, liberando o fluxo (ABNT NBR 10.897, 2020; NFPA 13, 2019).

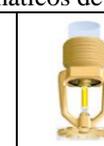
Há ainda o SCA de ação prévia, adequado para locais como museus e centros de dados, que guardam bens raros e sensíveis, cuja ativação acidental é indesejável e prejudicial. Esse tipo de SCA é composto por tubulações secas com ar no interior, pressurizado ou não, com aspersores de ampolas em seus ramais. Para evitar acionamentos acidentais, há um sistema de detecção de calor mais preciso que as ampolas, conectado a uma válvula especial, de modo que o fluxo de água só é liberado se este último sistema for acionado, especificamente naquele chuveiro que tiver sido sensibilizado. A vantagem deste SCA é que a detecção antecede o rompimento das ampolas (ABNT NBR 10.897, 2020; NFPA 13, 2019).

Há também o SCA tipo dilúvio, específico para locais em que o incêndio apresenta risco de se propagar rapidamente. Neste caso, as tubulações são secas e com chuveiros já abertos, ligados a um sistema de detecção de calor ou gases, que ao ser ativado pelo incêndio, aciona o alarme e a válvula-dilúvio na entrada da tubulação, liberando o fluxo aos chuveiros. Por fim, há o SCA de tubo seco e ação prévia, que se assemelha ao SCA de ação prévia, diferindo pelo fato do alarme e acionamento dos aspersores ocorrerem simultaneamente, além de não ter perda de pressão pela saída imediata do ar no sistema, pois neste caso o ar sai gradativamente por válvulas de alívio nos extremos das tubulações (ABNT NBR 10.897, 2020; NFPA 13, 2019).

Tanto os aspersores de ampola quanto os de solda eutética podem ser classificados de acordo com a temperatura de rompimento dos elementos termossensíveis que os constituem. Falando especificamente dos aspersores de ampola, a literatura científica os divide em sete

classes, sendo cada uma associada a determinada cor do líquido contido no interior da ampola, conforme pode ser verificado na tabela 2. Apesar da função principal do *sprinkler* ser a de controlar o incêndio, no caso de compor SCA, os aspersores podem ser considerados como dispositivo de detecção, já que para controlar o incêndio ele precisa necessariamente detectá-lo antes, cuja ação é efetuada com o rompimento da ampola ao ser sensibilizada a uma determinada temperatura. Dentre os *sprinklers* existentes, os mais usuais são aqueles que apresentam a ampola com líquido de coloração vermelha, cuja temperatura de rompimento é de 68 °C e são geralmente instalados em SCA de tubo molhado.

**Tabela 2:** especificações dos chuveiros automáticos de acordo com a coloração do líquido contido na ampola

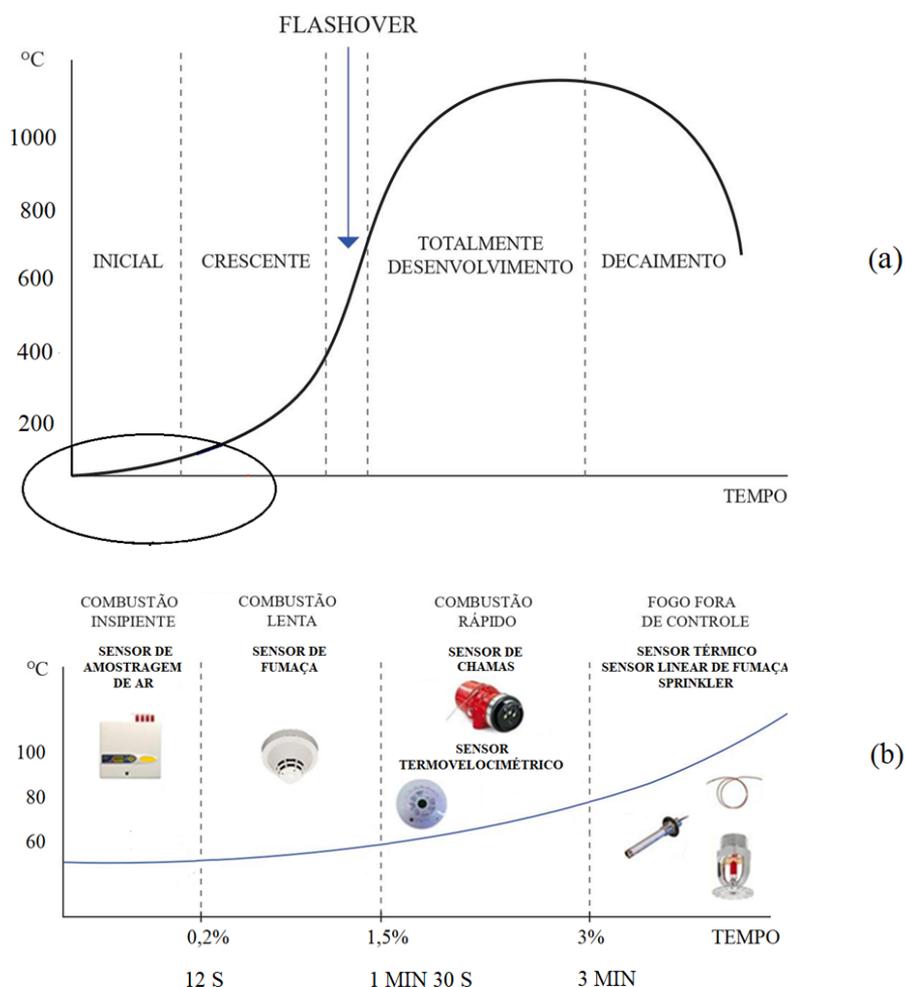
Cor do líquido da ampola	 Laranja	 Vermelho	 Amarelo	 Verde	 Azul	 Roxo	 Preto
Temperatura máxima no telhado (°C)	38	49	60	74	121	152	175/238
Temperatura recomendada do chuveiro (°C)	57	68	79	93	141	182	204/260
Classificação da temperatura de Funcionamento do chuveiro	Ordinária	Ordinária	Intermediária	Intermediária	Alta	Muito alta	Extra alta

Fonte: ABNT NBR 16.400, 2018.

A figura 17 apresenta a comparação dos vários sensores vistos até aqui, no momento inicial do desenvolvimento do incêndio, mostrando em que período de tempo cada um deles é ativado, sendo exposta a comparação na curva característica do incêndio em queima livre. No gráfico “a” da figura 17, está apresentada a variação da temperatura com o passar do tempo, enquanto no gráfico “b” da figura 17, está representado um recorte do primeiro gráfico, o tempo desta feita está expresso em taxa percentual com relação ao tempo médio total de duração da queima de um certo material.

O gráfico “b” mostra que o HSSD é o detector mais eficiente dentre os convencionais, pois consegue identificar o sinistro, no máximo, após se passar 0,2% do tempo total da queima, ou seja, se um material leva 100 (cem) minutos para ser totalmente “consumido” em uma queima livre, o HSSD passaria, no máximo, 12 segundos para efetuar a detecção. Os *sprinklers*, por sua vez, são os menos eficientes, pois só percebem o incêndio após se passarem mais de 3% do tempo total da queima, estando o fogo bastante desenvolvido quando detecta o incêndio. Para o caso citado, o *sprinkler* levaria mais de 3 minutos para detectar o incêndio.

**Figura 17:** Curva Característica de um Incêndio – Desenvolvimento do incêndio em função do tempo (a), e parte inicial do incêndio, em que os detectores são sensibilizados (b)



Fonte: ABINEE, 2013.

## 2.7 OUTROS SISTEMAS DE DETECÇÃO DE INCÊNDIOS

Na seção anterior (2.5), ficou evidenciado que as variáveis analisadas pelos SDAI normatizados são a temperatura, a concentração gasosa e o nível de intensidade de chamas. Entretanto, nos SDAI tradicionais, as estratégias de soluções adotadas, de maneira geral, não são adequados para fornecer-lhes a capacidade de aprenderem a reagir diferentemente, a depender das peculiaridades do ambiente e dos materiais combustíveis que se encontram no local. Além disso, a maior parte dos SDAI apresenta apenas resposta reativa, o que significa dizer que só após ter iniciado o sinistro é que ocorre responsividade, sem haver a capacidade de previsibilidade.

### 2.7.1 Sistema de detecção baseados em tecnologias embarcadas

Como forma de aprimoramento dos sistemas de detecção de incêndio, tem surgido propostas de sistemas dotados de novas tecnologias embarcadas, com inovações implementadas em dispositivos ou sistemas que os habilite a agir sob uma estratégia de resposta dinâmica, capaz de instruir o sistema por meio de linguagem computacional, de modo a proporcionar melhoria de desempenho, otimização de recursos, avanço de conectividade e implementação de inteligência, fornecendo ao sistema a capacidade de aprendizagem.

Muitos estudiosos das diversas áreas do conhecimento têm buscado implementar novas tecnologias em suas pesquisas, pela utilização de hardwares de prototipagem eletrônica rápida, a fim fornecer instruções e dados ao sistema que pretende trabalhar. Dentre estes hardwares, um dos mais usados é a interface Arduino, um tipo de prototipagem que permite ligar dispositivos eletrônicos à placa, sem que exista a obrigatoriedade de seus usuários terem conhecimento aprofundado acerca de eletrônica envolvida no processo.

Na última década, vários projetos com tecnologia embarcada têm utilizado Arduino, inclusive para realização de atividades de monitoramento, detecção e controle de incêndios, utilizando-se da análise de certas grandezas como parâmetros, cada qual mensurada por um sensor específico. A literatura nos apresenta diversos casos práticos para detecção de incêndio em ambiente urbano e florestal, baseando-se desde noções lógicas menos avançadas, a exemplo de lógica binária (RASHID; RAFID, 2017), até estruturas lógicas mais complexas, como redes neurais e aprendizagem de máquinas, com implementação de inteligência artificial.

Dentro do contexto deste estudo, será feita menção a algumas pesquisas desenvolvidas em várias partes do mundo, visando desenvolver novos SDI pela implementação de tecnologias embarcadas. No Quênia, foi desenvolvido um estudo na instituição de ensino *Strathmore University*, em 2017, visando estabelecer um SDI pela utilização de sensores conectados a um Arduino uno baseado em Lógica *fuzzy*, tendo apresentado, ao final, uma eficiência de cerca de 83%, já que nos seis casos em que foi usado, falhou apenas em um (OBANDA, 2017). Na cidade de Dakah, capital do Senegal, o estudo desenvolvido na *BRAC University* levou à criação de um SDI que tinha como unidade de controle o Arduino uno, no qual foi implementado quatro sensores de chamas, e pela adoção de lógica binária se estabeleceu uma dinâmica de detecção de tal maneira que só após a sensibilização simultânea dos quatro sensores é que o Arduino forneceu uma voltagem capaz de disparar a solenoide posta para liberação do fluxo de água nos *sprinklers* utilizados no experimento (RASHID; RAFID, 2017).

No Brasil, na cidade de Santa Maria, em uma pesquisa da Universidade Federal de Santa Maria, foi construído um sistema de detecção de fumaça inteligente, com uso da unidade de controle ESP32 e protocolos computacionais específicos, para implementação de tecnologia de IoT, estabelecendo conectividade com a internet para transmissão das informações às centrais e aos usuários do serviço (MUENCHEN, 2018). Membros de universidades da Indonésia e Malásia desenvolveram um sistema de detecção de incêndio baseado em lógica *fuzzy* ou difusa, pelo uso de microcontrolador Arduino que utilizava o sensor MQ-2 como detector de fumaça (LABELLAPANSA et al., 2019).

Para detecção de incêndio florestal, foi desenvolvido na Tanzânia um SDI constituído por um sensor de detecção de fumaça, um sensor de temperatura e um sensor de umidade relativa, todos conectados a um microcontrolador Arduino, além de empregar um módulo de conexão wi-fi, com a finalidade de transmitir as informações coletadas para dispositivos de comunicação móvel (LUTAKAMALE; KAIJAGE, 2017).

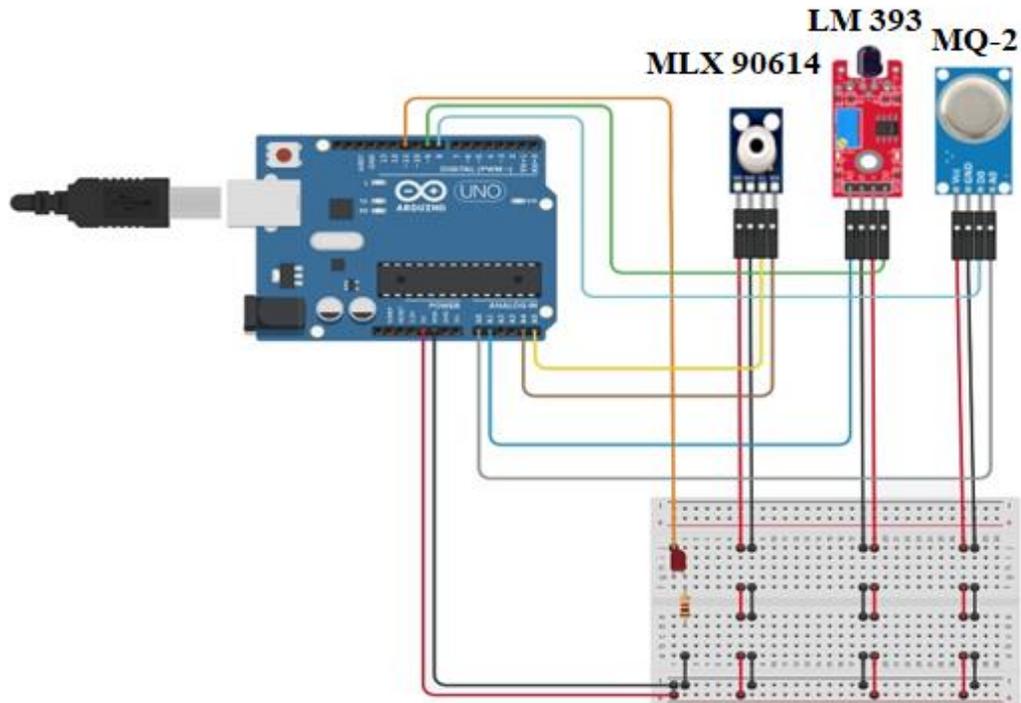
Os exemplos de estudos citados até então, os quais vêm sendo desenvolvidos em diversas universidades do mundo, evidenciam que a busca por sistemas alternativos de detecção de incêndio com uso de tecnologias embarcadas é uma realidade contemporânea, que já conta, inclusive, com a previsão legal nas normativas atuais, instituídas pela *National Fire Protection Association*, através da NFPA 72 (2019), a qual possibilita o uso destes SDIs, desde que atuem como sistema de redundância aos SDAI tradicionais.

As limitações ainda presentes nas possibilidades de emprego dos sistemas alternativos se dão, principalmente, em razão da inexistência de certificações, provenientes dos principais institutos e laboratórios de reconhecimento internacional, que atestem a resistência ao fogo e a altas temperaturas por parte dos componentes que compõem tais circuitos, fato que é preponderante para o não reconhecimento dos SDI alternativos como autossuficientes.

### **2.7.2 Sistema de detecção proposto**

A pesquisa ora desenvolvida visa construir um SDI que tem como unidade de controle uma placa Arduino Uno. Para realizar o papel sensorial do sistema, foram adotados três sensores: o sensor de Gás MQ-2, o sensor de chamas LM 393 e o sensor de temperatura MLX 90614, todos eles com sinal analógico e digital. A programação será baseada numa estrutura de árvore de decisão. A figura 18 apresenta o esquema gráfico de como o hardware do SDI proposto foi organizado.

**Figura 18:** Esquema de montagem do Hardware do SDI proposto



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

### 2.7.2.1 Conceitos relacionados ao Hardware

A seguir, serão descritos os sensores e os dispositivos que foram usados para construção do SDI, bem como as peculiaridades e características que os diferenciam e os identificam em suas ações.

#### 2.7.2.1.1 *Arduino Uno*

Os microcontroladores são essenciais à constituição de equipamentos eletrônicos, pois têm dimensões reduzidas, alto desempenho e baixo custo-benefício. Eles são munidos de microprocessador para análise de algoritmos, memória para armazenamento de dados, pinagens de entrada e de saída para estabelecimento de comunicação com sensores. O que os diferenciam uns dos outros são a velocidade de processamento, memória interna disponível, modelagem do circuito, entre outras peculiaridades (MARTINS, 2005).

Existem outros modelos de microcontroladores, a exemplo da Esp 32 e Raspberry Pi, mas o Arduino acaba sendo o mais usado por ser o mais difundido, possuindo uma comunidade de usuários maior que a dos demais e um elevado nível de maturação, já que foi um dos

primeiros a ser desenvolvido e lançado no mercado (MENDONÇA; ZELENOVSKY, 2019). O Arduino uno é uma placa com microcontrolador ATmega328 e um total de 14 pinos digitais, sendo 6 deles com saída PWM, 6 entradas analógicas, 1 conexão USB BM, 1 conector de energia tipo P4 e 1 botão de reset manual. Possui ainda interface serial e pinos de interrupção externa, uma linguagem de fácil acesso e uma biblioteca ampla, sendo por isso tão bem aceito e utilizado (ATMEL, 2015). A figura 19 traz um exemplo deste tipo de microprocessador.

**Figura 19:** representação de um tipo de Arduino Uno



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

O Arduino Uno pode ser alimentado por uma fonte de energia que forneça uma voltagem de 6 a 20 volts, contudo, é recomendado que se forneça a D.D.P. a uma faixa de 7 a 12 V, pois fornecer mais que isso pode aquecer o regulador de tensão e danificar o dispositivo, enquanto que se for concedido abaixo de 7 V pode ser que a quantidade de energia provisionada seja insuficiente para garantir o funcionamento pleno do dispositivo, causando instabilidade de sinal durante o funcionamento. A tabela 3 apresenta as principais características apresentadas pelo Arduino uno utilizado para constituição do SDI (ATMEL, 2015).

**Tabela 3:** Principais características do Arduino Uno

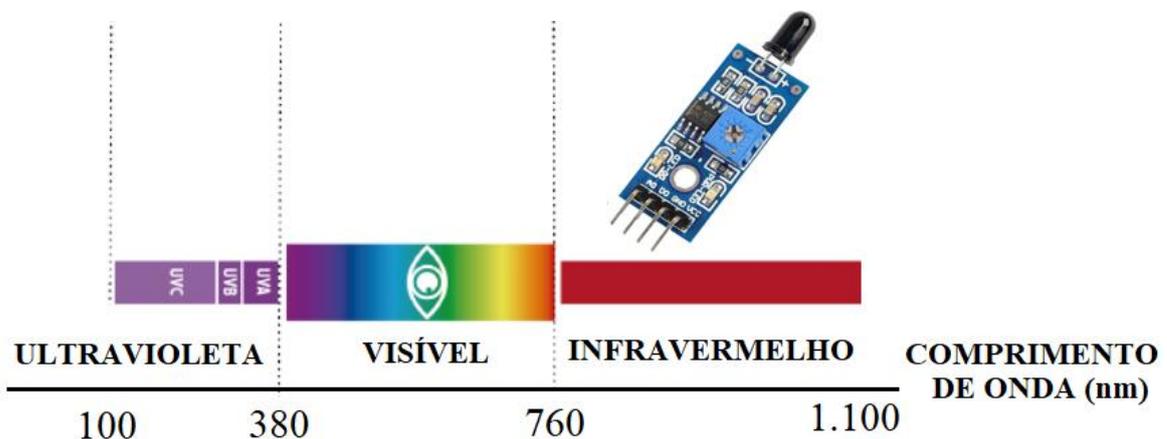
CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	5 V
Fonte de alimentação	7 a 12 V
Corrente máxima por porta de E/S	40 mA
Corrente máxima suportada pela USB BM	500 mA
Faixa de temperatura para trabalho do ATmega328	-40 °C a 125 °C

Fonte: ATMEL, 2015.

### 2.7.2.1.2 Sensor de Chamas LM 393

Este sensor possui sensibilidade à radiação contida na faixa espectral do infravermelho, podendo detectar fontes de calor, inclusive aquelas emitidas através das chamas. Na presença de chama, o pino digital indica estado 0, e caso não haja fogo, o pino indica estado 1. O valor limite para estes estados são ajustados de acordo com o potenciômetro para regulagem da saída digital (MOTOROLA, 1996). O sensor se encontra representado na figura 20, bem como a faixa de radiação captada por ele.

**Figura 20:** Faixa de comprimento de onda captado pelo sensor de chamas LM 393



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Na tabela 4 disposta mais adiante apresenta as principais características pertinentes ao sensor de chamas LM 393, o qual foi empregado na construção do SDI proposto neste trabalho de pesquisa (MOTOROLA, 1996).

**Tabela 4:** Principais características do sensor de chamas LM 393

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	3,3 V - 5 V
Faixa espectral de sensibilidade	760 nm a 1100 nm
Ângulo máximo de visão	60 °
Distância mín. e máx. entre sensor e fonte	20 cm a 1 m
Faixa de temperatura no ambiente p/ trabalho	0 °C a 70 °C
Temperatura máxima de operação	125°

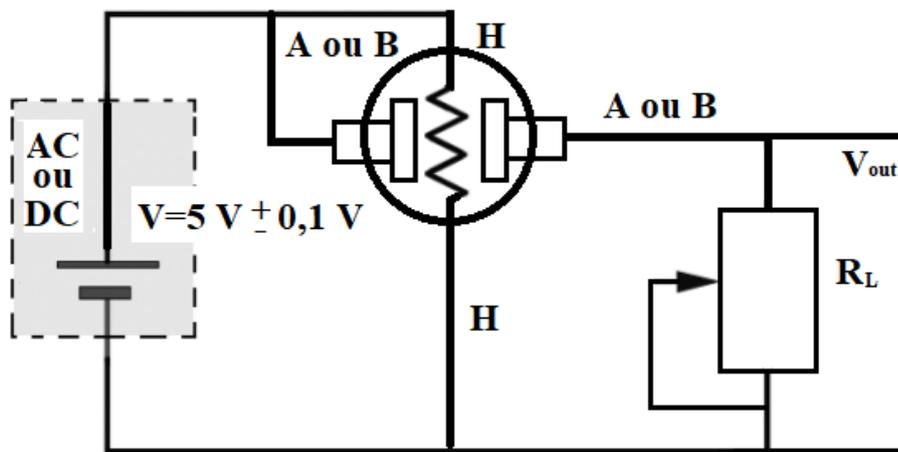
Fonte: MOTOROLA, 1996.

### 2.7.2.1.3 Sensor de Gases MQ-2

Este dispositivo de detecção é um tipo de sensor da série MQ, os quais podem ser integrados com facilidade a microcontroladores e são capazes de detectar com eficiência a concentração de certos gases inflamáveis, a depender do sensor utilizado. No caso do MQ-2, ele é sensível tanto a hidrocarbonetos e álcoois, tais como gás liquefeito do petróleo (GLP), butano, propano, metano e propanol, dentre outros, quanto a fumaça, apresentando ótima sensibilidade e rápida resposta (HANWEI, S/D).

O princípio de funcionamento se baseia na atuação de um aquecedor interno junto a um sensor eletroquímico. No caso do MQ-2, o material de sensibilidade é o estanho –  $\text{SnO}_2$ , o qual apresenta condutividade elétrica baixa e constante, quando em contato com o ar. Contudo, ao detectar determinados gases ou fumaça no ambiente, a condutividade do estanho modifica proporcionalmente à concentração do gás ou fumaça detectados (HANWEI, S/D). O sensor eletroquímico apresenta a configuração de circuito expressa na figura 21, de modo que a resistência  $R_s$  e o resistor de carga  $R_L$  formam um divisor de tensão.

Figura 21: Circuito elétrico de funcionamento do sensor de gases MQ-2



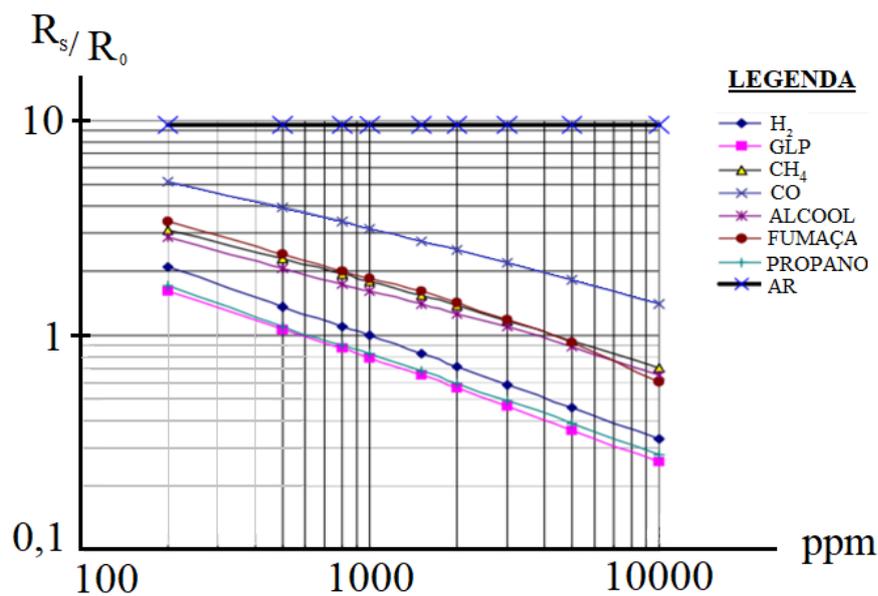
Fonte: HANWEI, S/D.

A variação na condutividade elétrica do estanho implica na variação da tensão sobre a resistência de carga ( $R_L$ ). A resistência do sensor ( $R_s$ ) pode ser medida a partir da equação 19:

$$R_s = \left( \frac{V_c}{V_{RL}} - 1 \right) R_L \quad (19)$$

A resistência  $R_0$  é o valor de  $R_L$  diante do ar limpo sob temperatura e umidade ideais. Nestas condições,  $R_s$  tem valor fixo e a proporção de  $\frac{R_s}{R_0}$  em ar limpo é de cerca de 9,8. A partir deste valor fixo, é possível encontrar o valor de  $R_0$ . O valor desta razão será mais alta ou mais baixa a depender da concentração do gás em partes por milhão (ppm) a observar, conforme se vê no gráfico da figura 22. Ainda segundo esta figura, para o cálculo da concentração dos gases que interessar, basta tomar dois pontos como base.

**Figura 22:** Curva característica de sensibilidade do MQ-2 em relação a vários gases



Fonte: HANWEI, S/D.

A faixa de sensibilidade do sensor se encontra entre 200 e 10.000 partes por milhão (figura 22). A tabela 5 ulterior traz as principais características que estão associadas ao sensor de detecção de gás MQ-2, que foi aquele utilizado para medição da concentração de fumaça neste estudo (HANWEI, S/D).

**Tabela 5:** Principais características do sensor de gases MQ-2

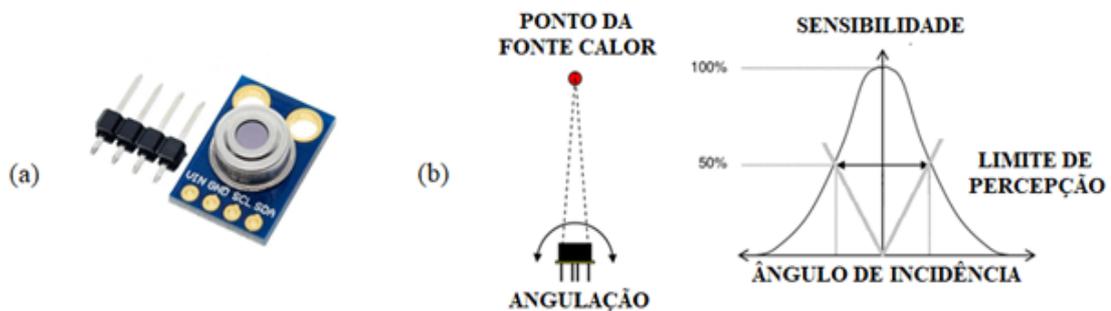
CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	5 V
Faixa de resistência do sensor para ação de detecção	3 K $\Omega$ a 30 K $\Omega$ (Parâmetro – 1000 ppm – isobutano)
Faixa de concentração gasosa	300 ppm a 10 000 ppm
Faixa de temperatura de uso e armazenamento	-20 °C a 70 °C

Fonte: HANWEI, S/D.

#### 2.7.2.1.4 Sensor de Temperatura MLX 90614

Trata-se de um termômetro de leitura remota realizada por intermédio de captação da radiação infravermelha (figura 23a). Com relação à angulação limite para percepção sensorial, para este dispositivo o valor é de 60°. Tanto esta angulação quanto a modificação da sensibilidade do mesmo com a mudança da posição da fonte de calor em relação ao sensor se encontram representadas na figura 23b (MELEXIS, 2008).

**Figura 23:** Sensor de temperatura MLX 90614 (a), ângulo de visão e variação de sensibilidade de acordo com a posição da fonte em relação ao sensor (b)



Fonte: MELEXIS, 2008.

A tabela 6 apresenta as características que são preponderantes no sensor de temperatura MLX 90614, que é um sensor que realiza leitura pontual e que, devido a ser um dispositivo que possui elevada precisão e uma resolução aprimorada, foi escolhido para ser empregado na construção do SDI (MELEXIS, 2008).

**Tabela 6:** Principais características do sensor de temperatura MLX 90614

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	3,3 V - 5 V
Ângulo máximo de visão	90 °
Faixa espectral de temperatura do ambiente	-40 °C a 125 °C
Faixa espectral de temperatura do objeto	-70 °C a 380 °C

Fonte: MELEXIS, 2008.

### 2.7.2.2 Conceitos relacionados ao Software

Sabe-se que a ideia essencial no desenvolvimento de um software é estabelecer boas estratégias de soluções ao problema ao qual se pretende dar uma resposta. Para a constituição de tais estratégias, é possível observar a questão, essencialmente, sob dois tipos de lógica: (i) a lógica binária, indicada a casos em que o evento estudado assume dois estados bem definidos, com um deles adotando o valor de afirmação e o outro o valor lógico de negação; e (ii) a lógica *fuzzy*, que é recomendada a situações que apresentam estágios intermediários, caracterizados por imprecisões nos processos decisórios e, a partir de condições pré-estabelecidas na programação, busca atingir um adequado nível de assertividade, fixando uma correspondência coerente a estes estágios (SOUZA, 2008; SILVA, FINGER, MELO, 2017).

No caso específico deste trabalho, foi empregada uma lógica binária, pois se observa que tal ótica é suficiente para se concluir a condição de existência de incêndio (1) ou de não incêndio (0). Tal lógica já foi aplicada em outros trabalhos, a exemplo da pesquisa de Rashid e Rafid (2017). Porém, diferentemente deste trabalho, o qual se fundamentou na resposta de um único tipo de sensor para consignação de tal lógica, na presente pesquisa foi estruturada uma tabela verdade com proposições simples referentes a outras três grandezas, cada qual também analisada sob uma lógica binária, associadas à concentração de fumaça, ao valor da temperatura e ao nível de intensidade luminosa em determinada faixa de intensidade.

Por meio do empreendimento de uma análise qualitativa, estabelecida para construção de um modelo baseado na observação, existe a possibilidade de se fazer o levantamento dos valores lógicos para uma proposição composta final, a partir de combinações de proposições simples, estabelecendo-se uma expressão lógica pelo uso de operações lógicas, relacionando variáveis que podem assumir apenas dois valores, 0 – negação da ocorrência de um evento – e 1 – confirmação da ocorrência de um evento (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2011).

Há, porém, possibilidade de se desenvolver um modelo mais preciso, baseado em dados quantitativos adquiridos na experimentação, buscando elevar ao máximo a verossimilhança entre dados experimentais e aqueles obtidos por meio do modelo. Os dados de entrada podem ser coletados por sensores eletrônicos, os quais fornecem valores como resultado das leituras referentes às grandezas envolvidas, formando uma quantidade enorme de tuplas numéricas. Os dados de saída, por sua vez, a cada conjunto de valores referentes às variáveis analisadas em um dado instante, de acordo com o que se observa na inspeção de resultados, admitem valor 0 para negação da ocorrência do evento e valor 1 para confirmar a ocorrência do mesmo.

Tendo sido realizado o levantamento dos dados e havendo uma estimativa de resultado possível, a partir da relação definida pelos estados discretos das variáveis em questão, seja por análise qualitativa, seja com base em valores de corte para cada uma delas, resta saber qual a regra que aproxima, de forma adequada, o resultado esperado do resultado experimental. Para tanto, pode-se lançar mão de um processo de aprendizagem computacional, que é definido como sendo um conjunto de ações capazes de identificar padrões para os dados disponíveis, dentro do contexto do estudo, e, pela análise desse processo, estabelecer um modelo ótimo que represente a relação causal entre os dados de entrada e de saída (ALPAYDIN, 2020).

Na aprendizagem de máquina – *machine learning*, o principal objetivo é constituir estratégias de softwares que oferecem ao objeto uma linguagem aprendente, de modo que ele vai assimilando, a cada experiência, como agir diante das situações, de acordo com as particularidades previstas na programação (RUSSELL; NORVIG, 2021). Dentre as diversas estratégias utilizadas para efetivação deste tipo de linguagem, uma bastante empregada é o método de árvore, que é uma ferramenta usada para visualizar a estrutura de um problema, a partir da análise de cada variável envolvida, permitindo analisar sistematicamente cada aspecto do referido problema (RUSSELL; NORVIG, 2021; SILVEIRA; BULLOCK, 2017).

A árvore de decisão trata-se de uma forma de representar um conjunto de informações de maneira organizada, permitindo a classificação de dados submetendo-os a um filtro que atua a partir de uma série ordenada de perguntas, de maneira que as perguntas seguintes dependem das respostas dadas nos passos anteriores, de modo que ao final do processamento destes dados é possível classificá-los com ótimo grau de assertividade (OKADA; NEVES; SHITSUKA, 2019). Em uma análise particular, pode-se restringir o escopo de variáveis àquelas que possuem apenas dois valores lógicos, denominando a análise destes tipos de dados como método de árvore binária. Devido à complexidade da construção de árvores de decisão envolvendo muitas variáveis e dados, as mesmas podem ser construídas pelo emprego de programas computacionais que realizam o processamento e análise destas informações sob o viés deste método (SZWARCFITER; MARKENZON, 2010).

Um destes programas é o MATLAB, que consiste em um software interativo de alta performance dedicado à resolução de problemas matemáticos, a partir da efetuação de cálculo e análise numérica (VIEIRA; MORAES, 2013). O processamento de informações pelo emprego deste programa é realizado por meio de *toolboxes*, que são coleções de funções matemáticas pré-estabelecidas destinadas a um certo tipo de processamento. Nesta pesquisa, foi empregado o *classification toolbox*, utilizando o algoritmo de análise em árvore (CHAPMAN, 2016).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Foi aplicado o método hipotético-dedutivo, com indagações insurgentes das limitações e insuficiências no uso de recursos renováveis ao fornecimento de água e energia para SDIs, sobretudo naqueles fundamentados em tecnologias embarcadas, surgindo, por intermédio da problemática, hipóteses com expectativas que serão corroboradas ou frustradas, a depender dos resultados obtidos na análise de dados (GIL, 2008).

Esta pesquisa é também bibliográfica, pois se baseia em publicações de credibilidade técnico-científica sobre os assuntos de interesse deste estudo (PRODANOV; FREITAS, 2013), além de apresentar cunho quantitativo, pois se presta a alcançar resultados quantificáveis, baseando-se em um conjunto de dados que precisam ser mensurados, para serem plenamente compreendidos (GIL, 2008).

Nos estudos realizados, procurou-se desenvolver soluções aplicáveis a edificações urbanas. Para tanto, foi estabelecido um projeto piloto, sendo utilizada como edificação de referência à efetivação da modelagem o prédio do Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA, pertencente às instalações da Universidade Federal da Paraíba, localizada na cidade João Pessoa – Paraíba – Brasil (figura 24).



Fonte: GOOGLE MAPS, 2021.

#### 3.1 RECURSO HÍDRICO PARA RESERVA TÉCNICA DE INCÊNDIO

O prédio considerado (figura 24) tem formato retangular, com comprimento de 54,4 m e largura de 14,2 m, com área total de projeção horizontal do telhado de 772,48 m<sup>2</sup>. O teto do prédio não é ocupado por pessoas ou animais e está coberto por telhas compostas por material cerâmico, o que assegura não haver contaminação da água no telhado e o atendimento à exigência da qualidade da água para que possa ser usada na RTI.

Para simplificação dos cálculos, toda precipitação será considerada apta a ser captada para ser usada para o fim a que se destina. Embora exista um laboratório em um dos compartimentos do prédio, não há nele manipulação de químicos ou fármacos e, por isto, toda a edificação é classificada como sendo do tipo E-1 (PARAÍBA, NT/CBMPB 004, 2013). O sistema de hidrante para este tipo de edificação pode ser do tipo 1, cuja RTI deve comportar um volume de até 5 m<sup>3</sup> e possuir mangueira de incêndio de 1” de diâmetro, ou, ainda, pode ser do tipo 2, que deve apresentar RTI com capacidade volumétrica máxima de 10 m<sup>3</sup> e uma mangueira de incêndio de 1 ½” de diâmetro (NT CBMPB 004, 2013; NT CBMPB 015, 2016).

As informações sobre pluviosidade foram obtidas nas bases hidroclimáticas FLDAS, GLDAS e TERRACLIMATE, pelo uso da interface de programação *Google Earth Engine* (GEE). Foram selecionados dados pluviométricos mensais de 15 (quinze) pontos distribuídos na cidade de João Pessoa, de 2015 a 2020 (figura 24). Para acessar a base de dados do GEE, foi utilizada a linguagem computacional *Javascript*, assim como para importar as informações a arquivos do formato .csv. Ao conceber a disposição destas informações neste novo formato, foi empregada a linguagem de programação *Python* para leitura das mesmas e, em seguida, tratamento destes dados e formatação em representações de gráficos.

Primeiramente, foram traçados seis gráficos expressando a precipitação média mensal, sendo um gráfico para cada ano, e cada um deles com três curvas, com cada curva construída a partir de dados de uma das bases consideradas, mostrando a média de pluviosidade mensal para esta base. A seguir, traçou-se seis gráficos tipo *box-plot*, um para cada ano, sendo expressa em cada um deles a discrepância da pluviosidade média mensal dada por cada base em relação aos pontos considerados. Depois disto, foram construídos mais seis gráficos, um para cada ano, contendo duas curvas em cada um deles, para uma área de projeção horizontal da superfície de escoamento da água da chuva igual a 100 m<sup>2</sup>, com uma destas curvas expressando a Pluviosidade Mensal Média Total (PMMT), que considera as médias da pluviosidade dadas por cada base, e a outra curva mostrando o volume médio por mês com base na PMMT.

Por fim, traçou-se um gráfico com barras verticais que indicam o volume médio de chuva precipitado na cidade de João Pessoa em cada ano, para uma área de projeção horizontal de superfície do telhado de 100 m<sup>2</sup> e coeficiente de escoamento 0,95 (tabela 1). Calculou-se os volumes de água acumuláveis na edificação, a cada ano e em meses mais escassos e comparados com os valores de referência de volume previstos para RTI, conforme a norma vigente no Estado da Paraíba, para que, a partir desta análise, fosse possível determinar se a quantidade de água a ser captada é ou não suficiente para suprir a demanda de água necessária à RTI.



Em seguida, a partir das informações de velocidade dos ventos e emprego das equações (4) a (13), foram calculadas a média mensal da corrente e da potência elétrica gerada pelo uso do modelo de turbina eólica considerado. Depois, foram feitos três gráficos, que representavam, respectivamente, as relações da velocidade do vento, da corrente e da potência, todas em função do tempo, durante os seis anos. Então, foram construídos mais três gráficos representando as variações das mesmas grandezas com o passar do tempo, para um ano qualquer.

Analogamente ao método de representação gráfica dos dados sobre energia gerada por turbina eólica, os dados de geração de energia por uso de painel solar também foram assim expressos, sendo feito um gráfico do tipo *box-plot* para exprimir a relação da irradiância solar média mensal no prédio do PRODEMA/UFPB em função do tempo, para um ano qualquer, mostrando as discrepâncias dos valores referentes a esta grandeza, tornando possível identificar dentre o rol de valores, aqueles que devem ser desconsiderados nos cálculos – *outliers*.

De posse dos valores factíveis acerca da irradiância solar média no local de estudo, utilizou-se as equações (14) a (18) para calcular a corrente e a potência do sistema fotovoltaico durante os seis anos. A seguir, foram feitos três gráficos que mostravam as variações de irradiância, corrente e potência em função do tempo, nesta ordem, de 2015 a 2020. Enfim, outros três gráficos foram constituídos, para representar as mesmas grandezas, mas mostrando agora a variação para um ano qualquer.

### **3.2.2. Previsão de geração energética pelo modelo de Sistema Híbrido de Geração de Energia**

Baseado nos valores de corrente e potência média total para cada mês e ano estimados para o tipo de aerogerador e de painel solar considerados, foram construídos inicialmente três gráficos contendo a média mensal da potência solar fotovoltaica, eólica e total (eólica + fotovoltaica) com o passar do tempo, de 2015 a 2020, representadas pela curva vermelha, vermelha tracejada e verde tracejada, nesta ordem.

Após isto, foram calculadas as potências médias mensais a partir da soma dos valores de potência para cada mês, traçando-se, a partir daí, um gráfico que exprimiu as potências médias mensais fotovoltaica, eólica e total (eólica + fotovoltaica) para um ano qualquer, descritas ordenadamente pelas curvas vermelha, vermelha tracejada e verde tracejada. Desta forma, representou-se a capacidade de geração de energia elétrica do modelo de sistema híbrido de energia – SHGE/EF – considerado.

### 3.2.3 Sistema Híbrido de Geração de Energia

Para verificação da capacidade produtiva de geração de energia para fornecimento ao SDI, foi feita a instalação de um SHGE/EF com aerogerador e placa fotovoltaica no telhado do PRODEMA/UFPB, e após a instalação, foram realizadas medições com o multímetro acerca da corrente, tensão e potência elétrica gerada. Esta parte da pesquisa foi dividida em duas partes: (i) a construção e montagem do SHGE/EF e (ii) a aquisição de dados por meio da realização de medições acerca da geração de energia do SHGE/EF construído.

O SHGE/EF, a estrutura para fixá-lo e o sistema para medições elétricas são compostos por 01 (uma) peça em metalon galvanizado retangular, perfil 30 mm x 50 mm, para sustentação da placa; 01 (uma) peça tubular metálica galvanizada, 4" de diâmetro, 1,50m de comprimento, em aço, para sustentar o aerogerador; 01 (uma) placa solar (tabela 7, figura 26); 01 (um) aerogerador vertical (tabela 8, figura 26); 40 (quarenta) metros de fio de 1,5 mm para ligar o aerogerador ao laboratório; 40 (quarenta) metros de fio de 4,0 mm para ligar a placa solar ao laboratório, 15 (quinze) metros de cano em PVC na cor preta, para levar a fiação do SHGE/EF ao laboratório; 01 (um) multímetro e 01 (um) regulador de tensão Reostato 200 W X 100  $\Omega$ . As tabelas 7 e 8 trazem as especificações da placa solar e do aerogerador, respectivamente.

**Tabela 7:** Principais características da Placa Solar utilizado no SHGE/EF (para  $T = 25^{\circ}\text{C}$  e  $I = 1000\text{ W/m}^2$ )

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Potência Máx. – Voltagem Máx. – Corrente Máx.	330 W – 37,26 V – 8,86 A
Tensão Circuito Aberto – Corrente Curto Circuito	44,72 V – 9,57 A
Eficiência da Célula – Eficiência do Módulo	18,65 % – 16,97 %
Nº de células	(6 * 12) – 72 Células
Dimensões da placa	1960 mm x 992 mm x 40 mm –
Cabo – Comprimento e Área de Secção Transversal	90 cm com 4 mm <sup>2</sup>
Tipos de Junções	IP 65 / IP 67

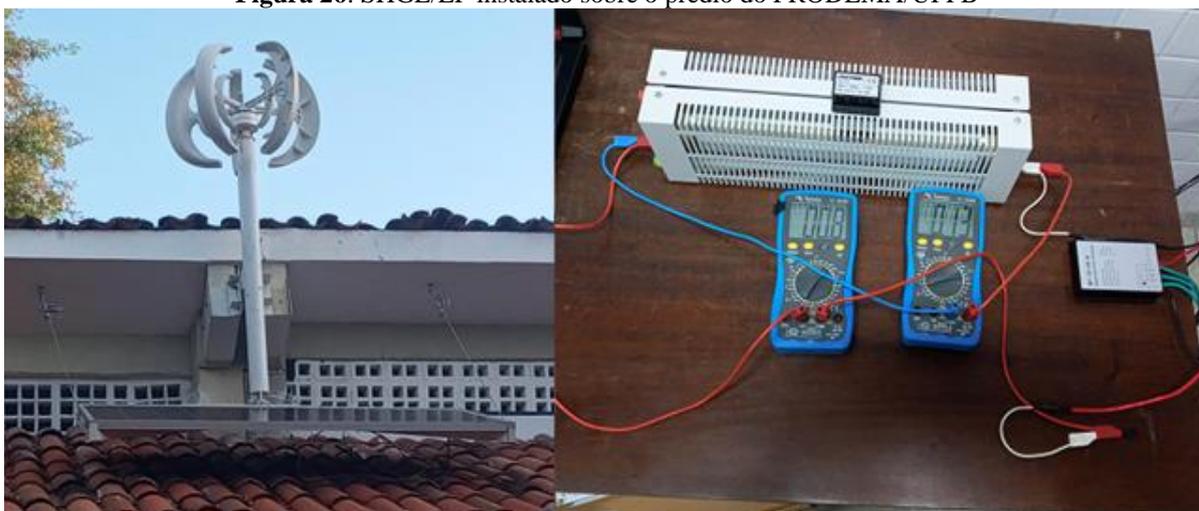
Fonte: NINGBO OSDA SOLAR, S/D.

**Tabela 8:** Principais características do Aerogerador Vertical utilizado no SHGE/EF

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação – Potência Máxima	12 V / 24 V – 600 W
Vel. Inicial – Vel. Nominal – Vel. Máxima	2 m/s – 12 m/s – 45 m/s
Diâmetro da Roda de Vento	0,9 m
Nº de lâminas – Material das lâminas	05 lâminas – Fibra de Nylon
Gerador – Frenagem – Ajuste de direção do vento	3 fases AC PMG – Eletromagnetismo - Automático
Temperatura de Trabalho	-40 °C a 80 °C

Fonte: MANUAL DO FABRICANTE.

**Figura 26:** SHGE/EF instalado sobre o prédio do PRODEMA/UFPB



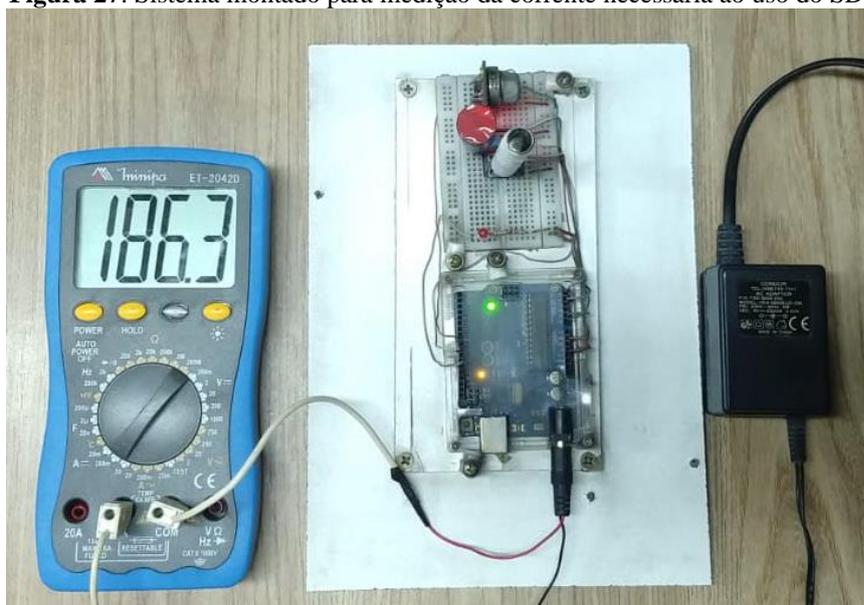
Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Com a concretização da montagem do SHGE/EF e tendo a ciência da indisponibilidade de tempo hábil para realização de medições durante todo um ano, optou-se por escolher aquele mês no qual houve menor produção média de energia para o modelo de SHGE/EF analisado teoricamente, para realização das medições de captação de energia solar e eólica, neste caso, o mês de maio. Sob esta lógica, os resultados obtidos nos permitem concluir que estes são os piores níveis de fornecimento de energia por parte do SHGE/EF ao SDI, em um mês em um ano qualquer.

Em cada um dos dias, foram efetivadas 60 medições, referentes a cada um dos tipos de energia, tanto em relação à produção na placa fotovoltaica quanto na turbina eólica, com intervalos de 30 segundos entre uma medição e outra. No painel fotovoltaico, as medidas foram realizadas entre as 13h50min00s e as 14h19min30s, enquanto que no aerogerador elas foram efetuadas entre as 13h50min15s e as 14h19min45s. Todos os dados obtidos foram tabulados em um arquivo do tipo .xls.

Após o levantamento da taxa de geração de energia elétrica por unidade de tempo no SHGE/EF montado, buscou-se descobrir a taxa média de consumo de energia pelo SDI, instalando-se na rede convencional de energia de 220V uma fonte com tensão de saída de 9V, com a finalidade de fornecer energia ao sistema de detecção. Entre o SDI e a referida fonte, foi posto um multímetro, para que fosse verificada a intensidade da corrente necessária ao funcionamento do sistema de detecção. A partir do valor da corrente, foi calculada a potência necessária para manter o SDI ativo. O esquema montado para realização da medição citada está representado na figura 27.

**Figura 27:** Sistema montado para medição da corrente necessária ao uso do SDI



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

### 3.3 SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO COM TECNOLOGIA EMBARCADA

O procedimento experimental de testes do SDI foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba (LABEME– UFPB), no período de 01 de agosto de 2021 a 15 de setembro de 2021, em uma estrutura de alvenaria construída em escala, simulando locais que abrigam, predominantemente, materiais celulósicos, sendo usadas folhas de papel A4 e pedaços de MDF como materiais combustíveis.

O procedimento experimental foi dividido, basicamente, em cinco etapas: (i) montagem da estrutura onde todos os procedimentos experimentais serão realizados; (ii) montagem do hardware composto pelos dispositivos eletrônicos e os suportes e acessórios que formarão a estrutura física do SDI; (iii) montagem do software que será responsável pela implementação da heurística do SDI; (iv) montagem da instrumentação e definição dos métodos a serem adotados para realização da fase de calibragem; e (v) fase de validação.

#### 3.3.1 Montagem da estrutura de alvenaria

Esta estrutura foi feita para realização dos testes experimentais de queima de materiais, sendo composta por 01 (um) cômodo, com dimensões 1,0 m x 1,0 m x 1,0 m, semelhante a uma edificação tipo residencial, guardadas as devidas proporções, com concentração majoritária de material celulósico, a exemplo de compartimentos de biblioteca, museus, arquivos em fóruns,

dentre outros. Foi construída em alvenaria com revestimento externo, pela utilização de tijolos contendo oito furos, de dimensões de 20 cm x 20 cm x 10 cm. Na estrutura, havia uma abertura frontal (porta), de 0,27m x 0,7m e uma abertura lateral (janela), de 0,33m x 0,33m, ambas fechadas com uma chapa de zinco. A porta em zinco apresenta um corte quadrangular a meia altura, a fim de que a queima possa ser visualizada. Na parte superior, foi feito um corte na estrutura de alvenaria, visando posicionar o SDI. Por fim, foi implementada na diagonal uma tubulação de aço de ½” de diâmetro, para fixação do *sprinkler* (figura 28).

**Figura 28:** Estrutura em alvenaria destinada à realização dos testes com o SDI



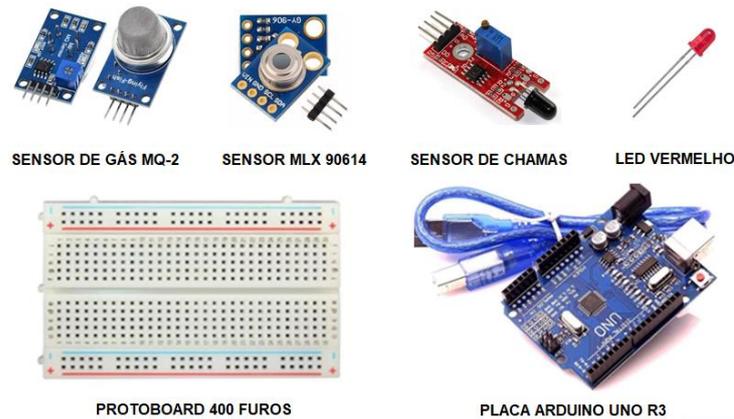
Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

O dimensionamento da estrutura de alvenaria considerou as especificações contidas nas Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, tomando tais dados por referência (IT CBPMESP 14, 2011). Esta norma adota, para estimativa de carga de incêndio, a área equivalente a 1m<sup>2</sup>, por isso o simulador foi feito com estas dimensões. Projetado para queimas de pequenas cargas de incêndio, a altura considerada foi de 1,00 m, que corresponde a um terço do pé direito da maioria das edificações.

### 3.3.2 Montagem do Hardware do SDI

Nesta montagem, foram utilizados 01 (um) sensor de temperatura modelo MLX 90614, 01 (um) sensor de gás MQ-2, 01 (um) sensor de detecção de chamas LM 393, 01 (um) luz de *led* de 5 mm, 01 (um) placa Arduino Uno R3, 01 (uma) *protoboard* de 400 (quatrocentos) pontos para prototipagem, 20 (vinte) cabos *jumper* e 01 (um) cabo USB – A/B – 50 cm (figura 29).

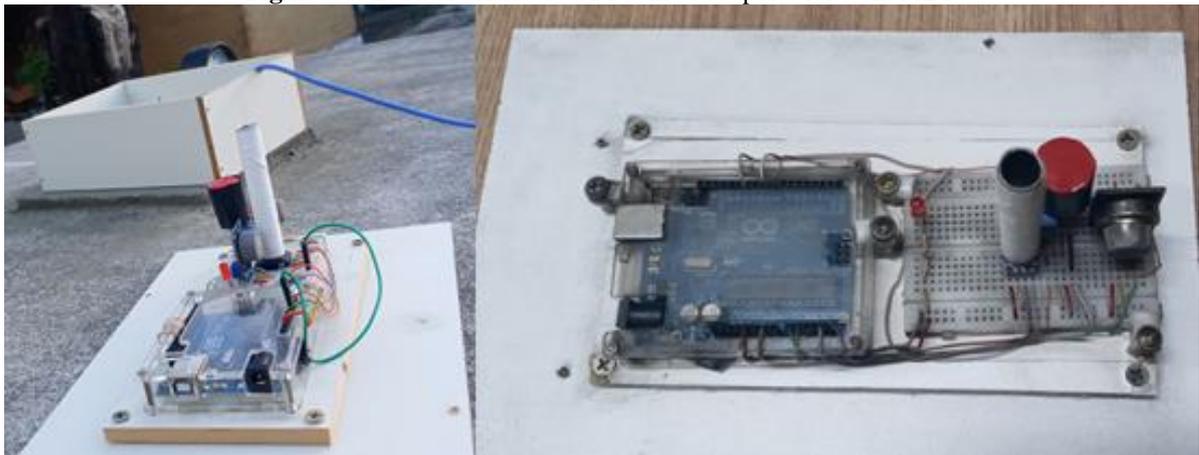
**Figura 29:** Dispositivos eletrônicos utilizados para montagem do SDI



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Os dispositivos eletrônicos foram conectados a uma *protoboard*, fixada junto com o Arduino a uma superfície plana de MDF, em formato retangular, com o uso de parafusos e fita dupla face. Esta superfície passou a ser uma das faces de um paralelepípedo feito com MDF de mesma espessura que o da base, para comportar o SDI (figuras 30).

**Figura 30:** Estrutura física do SDI com seu suporte feito em MDF



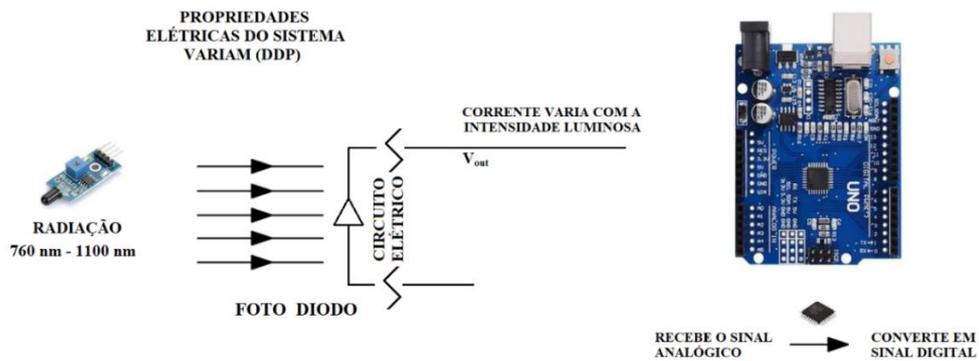
Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

### 3.3.3 Montagem do Software do SDI

O software foi desenvolvido para plataforma Arduino, a qual apresenta sua base de dados escrita com a linguagem C++. Inicialmente, foi realizada uma programação para realização de testes preliminares, estabelecendo-se limites aleatórios de sensibilidade a cada sensor, sendo definido que caso determinado valor lido esteja acima do limiar estabelecido para o sensor, há indicação de que para este sensor, analisado isoladamente, existe incêndio.

Para efetivação de medições das grandezas, foi necessário adotar providências para definir as unidades de medidas para cada sensor. Para o caso do sensor de chamas, foi observado o seu princípio de funcionamento, o qual apresenta um fotodiodo em seu interior, que ao captar a radiação dentro do seu campo de sensibilidade, produz a geração de uma corrente elétrica, cujo valor depende da intensidade luminosa recebida (figura 31).

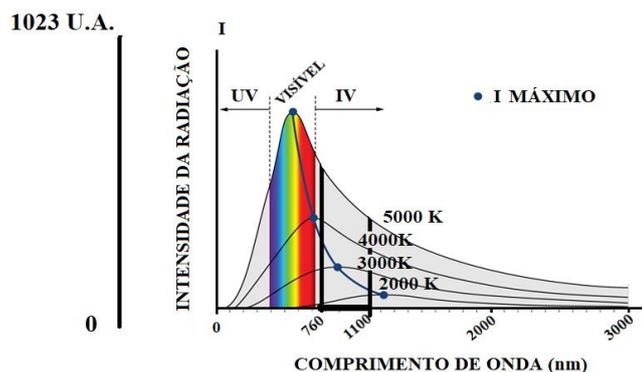
**Figura 31:** Processo de conversão do sinal analógico em sinal digital – sensor de chamas LM 393



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

A corrente advinda deste sensor atinge a placa de Arduíno como um sinal analógico, sendo a partir daí, convertido em sinal digital, podendo assumir neste microcontrolador 1024 valores, já que o mesmo possui uma relação de sinal-entrada de 10 bits, os quais podem assumir os valores lógicos 0 ou 1 ( $2^{10}$ ). No caso deste estudo, foi adotada uma escala com unidade adimensional (u.a.) variando de 0 a 1023, com cada valor discreto associado a uma determinada intensidade luminosa, de maneira que o valor 0 representará a menor intensidade na faixa de sensibilidade do sensor e o valor 1023 a intensidade máxima (figura 32).

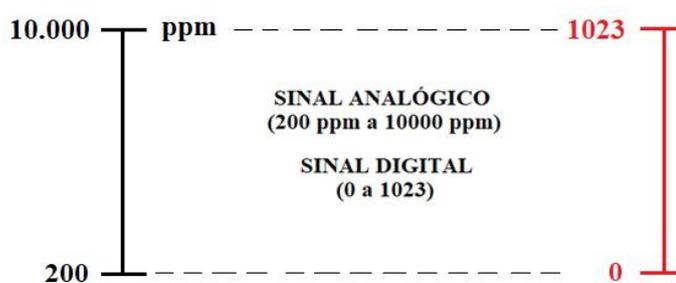
**Figura 32:** Relação entre intensidade luminosa e escala adimensional adotada para o sensor de chamas LM 393



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Semelhantemente ao sensor de chamas LM 393, o sensor de gás MQ-2 apresenta uma relação de sinal-entrada de 10 *bits* e, por isso, o pino digital pode assumir 1024 valores, sendo também adotada uma escala com unidade adimensional (u.a.) variando de 0 a 1023, onde cada valor discreto está associado a um valor de concentração gasosa, sendo o 0 associado ao menor valor de concentração, que é de 200 ppm, e o 1023 associado ao maior valor de concentração possível de ser detectado pelo sensor, que é 10 000 ppm, conforme mostra a figura 33.

**Figura 33:** Relação entre concentração gasosa e escala adimensional adotada para o sensor de gases no MQ-2



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021

Diferentemente do sensor de chamas LM 393 e do sensor de gás MQ-2, não foi preciso estabelecer uma escala paralela para o sensor pontual de temperatura MLX 90614, pois o mesmo possui um processador interno que, ao estar conectado ao Arduino, converte o sinal digital recebido inicialmente por ele em sinal analógico, enviando ao Arduino a informação já convertida em valor contínuo, dentro da escala original de temperatura.

Na fase preliminar, foram realizados testes com o SDI a partir da análise da resposta dos sensores a radiações advindas de luz natural ou artificial, inclusive advindas da queima de combustíveis como vela de parafina, esponja de aço, folha de papel, etc. A finalidade de tal fase foi verificar se, em algum destes testes haveria alguma resposta por parte dos sensores que fosse incongruente, no sentido de efetuação incorreta da leitura ou interferência na leitura feita, e a partir da identificação do problema estabelecer os meios para saná-los.

Após o ajuste dos sensores, buscou-se trabalhar a modelagem do SDI, adotando como primeiro passo o pressuposto de uma lógica binária em relação à definição da ocorrência ou não de incêndio, sendo o estado 0 definido como a ausência dele e o estado 1, a ocorrência do mesmo. Para cada tipo de sensor (chamas, fumaça e temperatura) foi definido estados binários, e a partir de proposições simples referentes a seus relativos valores lógicos, foram feitas as mais variadas combinações possíveis destes valores, de modo que cada proposição composta resultante de certa combinação estabelecida, informa se houve ou não a ocorrência de incêndio.

Assim como se definiu a confirmação ou não de incêndio a partir de lógica binária, classificou-se os valores obtidos por cada sensor com base nesta lógica, sendo o 0 associado ao não acionamento do sensor, enquanto o valor 1 indicou que a medição da referida grande ultrapassou um limiar visto como normal, implicando que o sensor foi acionado. Na tabela 9, seguem descritos os significados de cada estado dos sensores utilizados.

**Tabela 9:** Descrição dos estados lógicos dos sensores

<b>VALOR LÓGICO</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
SENSOR DE CHAMAS	Intensidade Luminosa abaixo do nível de corte (C)	Intensidade Luminosa igual ou acima do nível de corte ( $\bar{C}$ )
SENSOR DE GÁS	Concentração abaixo do nível de corte (G)	Concentração igual ou acima do nível de corte ( $\bar{G}$ )
SENSOR DE TEMPERATURA	Temperatura abaixo do nível de corte (T)	Temperatura igual ou acima do nível de corte ( $\bar{T}$ )
INCÊNDIO	Ocorrência de incêndio (I)	Não ocorrência de incêndio ( $\bar{I}$ )

Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Para estabelecer os estados de ocorrência ou não de incêndio, a partir dos valores lógicos referentes a cada um dos sensores, foi construída uma tabela verdade composta por quatro colunas, sendo as três primeiras destinadas a recepcionarem os valores lógicos para cada sensor nas oito situações possíveis de combinações, perfazendo o total de oito linhas. A última coluna mostra se há incêndio (1) ou não há (0), a partir da combinação dos valores lógicos dos sensores.

Todas as análises foram realizadas empiricamente, baseadas tanto em testes preliminares quanto em considerações feitas com base na observação relativa à experiência do cotidiano, de tal maneira que as várias combinações possíveis para os valores lógicos assim estabelecidas resultaram na conclusão acerca da ocorrência (1) ou não (0) de incêndio. A tabela 10 apresenta a tabela verdade resultante das análises realizadas.

**Tabela 10:** Descrição dos estados lógicos dos sensores

<b>CHAMAS</b>	<b>GASES</b>	<b>TEMPERATURA</b>	<b>INCÊNDIO</b>
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Na primeira e na última linha encontram-se as soluções triviais destas combinações. Na primeira linha todos os sensores assumem valor 0, isto significa que as grandezas medidas pelos dispositivos ficaram em patamares menores que o nível de corte, deduzindo-se, portanto, que não há incêndio nesta situação (0). Na oitava acontece o contrário, todas as grandezas passaram dos patamares de corte dos sensores e, portanto, tudo indica que há incêndio (1).

Na linha 2 há indicação de aumento de temperatura, mas tal elevação pode ser por exemplo, devido ao aquecimento de um ferro de passar roupa ou de um ferro de solda, mas é improvável que seja devido à ocorrência de incêndio (0), uma vez que os níveis de chama e de gás, neste caso, estão abaixo da medida de valor crítico.

Na linha 3, por sua vez, há o indicativo de que o nível de fumaça está acima do normal, mas sem que os patamares de temperatura e de intensidade de chamas estejam acima no nível de corte, características marcantes durante um incêndio. Sendo assim, a elevação do nível de gás ou fumaça pode estar associada a fatores outros, tal como uma boca de fogão com o fluxo de gás aberto, mas certamente não por motivo de incêndio (0).

O sensor de chamas também indica baixo nível de intensidade na linha 4, e apesar dos sensores de gases e de temperatura indicarem patamares acima do limiar de normalidade, não quer dizer que estará havendo incêndio nestas condições. É possível que este cenário ocorra, por exemplo, no caso do aquecimento de uma ponteira de aparelho de solda, com a liberação de gases ou fumaça, mesmo não havendo incêndio (0).

Na linha 5, a intensidade das chamas está acima do nível de corte, mas não há elevação da temperatura e de concentração de gás ou fumaça a patamares peculiares ao incêndio, logo, o sensor de chamas pode estar detectando uma luz que emite grande quantidade de radiação na faixa do infravermelho, por exemplo, mas é improvável que haja incêndio (0).

O sensor de chamas também se mostra sensibilizado na linha 6 e a temperatura também apresenta valores além do limite estabelecido, havendo só a concentração de fumaça em nível baixo. Nesta situação é provável que haja incêndio, pois variações e níveis elevados de energia térmica e luminosa são preponderantes durante este sinistro. Logo, esta configuração pode ser classificada como incêndio (1) e o nível baixo de fumaça se justifica ou pelo fato da queima ser lenta, ou devido à combustão liberar pouco fumaça, ou por que o ambiente não está saturado.

Finalmente, na linha 7 a intensidade luminosa e os níveis gasosos estão além dos limites de corte estabelecidos. Entretanto, sem a elevação da temperatura a valores acima dos limites estabelecidos não é possível caracterizar este conjunto de informações como incêndio (0), pois o aumento desta última grandeza é característica intrínseca à ocorrência do sinistro.

Com todos os dados levantados a partir das possíveis combinações das proposições simples, é possível perceber que só haverá confirmação de incêndio em dois casos dos oito possíveis: na 6ª linha e na 8ª linha (101 ou 111). Utilizando-se de um método de simplificação booleana, pode-se representar a expressão lógica que representa a tabela 9 como sendo:

$$I = C \wedge T \quad (20)$$

Para configuração dos sensores definidos até aqui, essa expressão é capaz de representar a tabela verdade (tabela 9), mostrando que é suficiente a sensibilização dos sensores de chamas e de temperatura para que a condição de incêndio seja confirmada. Este modelo, apesar de ser bastante assertivo por advir de uma análise qualitativa e empírica, pode ser melhorado. Para tanto, foi proposto a construção de um modelo fundamentado no princípio da análise de dados quantitativos, utilizando-se de uma técnica de *machine learning*, sendo os dados levantados experimentalmente através de queimas controladas de materiais celulósicos selecionados.

### 3.3.4 Fase de calibragem

Esta fase foi composta pela realização de 06 (seis) queimas, sendo utilizada em 03 (três) delas a folha de papel A4 como combustível e, nas outras 03 (três), o MDF. Para realização das medidas de temperatura e de massa, foram usados 02 (dois) termômetros analógicos (0° a 350°C; 5°C) para monitoramento da temperatura no ambiente sinistrado e 01 (uma) balança digital (5g a 8200g; 0,1g) para pesagem do material combustível (figura 34).

**Figura 34:** Instrumentos de medida de temperatura e de massa utilizados durante os testes do SDI



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Foram utilizados nas queimas o MDF e folhas de papel A4, uma vez que nas edificações urbanas, há predominância de materiais celulósicos em seu interior. Observou-se, em testes preliminares de queima destes materiais, que a carga de incêndio presente em 500g de cada um deles era suficiente para liberar calor, fumaça e níveis de radiação térmica capazes de caracterizar um princípio de incêndio, sem que atingissem temperaturas acima das indicadas para os dispositivos eletrônicos empregados (figura 35).

**Figura 35:** Queima de MDF e papel A4 realizada durante os testes do SDI



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Devido aos testes terem ocorrido durante estação chuvosa, com a finalidade de reduzir a umidade no interior do simulador, antes da realização de cada experimento foi posta uma certa quantidade de material celulósico para ser queimado, tal que esta carga de incêndio era suficiente para fazer o ambiente interno chegar à temperatura de aproximadamente 150 °C, e após o desenvolvimento da combustão esperou-se a temperatura do simulador retornar ao nível do ambiente, bem como os demais parâmetros retornarem aos padrões de normalidade.

Na realização do processo de queima propriamente dito, um ciclo se iniciava com a disposição do material combustível no centro do simulador. Antes de começar a queima, a programação feita no Arduino tinha iniciado o seu processamento no computador e, caso identificada alguma incoerência nos valores captados, era feita a verificação das conexões elétricas do SDI e, não resolvendo o problema, o programa era fechado, a programação revista e testes eram feitos com os sensores até que se resolvesse a situação. Contudo, se fosse constatada a coerência dos dados captados pelos sensores, o SDI continuava captando as informações, e a combustão era finalmente iniciada. Como fonte de ignição, era posta abaixo da carga de incêndio uma pequena estopa umedecida com álcool e acesa com fósforo.

À medida que a combustão se processava, os dados eram adquiridos pelos sensores a cada cinco segundos. A queima era livre e se processava até que se chegasse à saturação da temperatura, geralmente entre 80°C e 90°C. A carga de incêndio em combustão não era suficiente para que fossem atingidas temperaturas acima de 90° C, de modo que a queima era livre, sendo interrompida apenas após atingir o estágio máximo de desenvolvimento da queima, quando a temperatura chegasse a patamares próximos aos da temperatura do ambiente. Esta grandeza foi monitorada constantemente, pelo uso de um termômetro analógico instalado no teto e outro na parte inferior de uma das faces do simulador.

Após a efetuação das seis queimas, as informações que foram adquiridas e originalmente armazenadas em formato .txt foram importadas do monitor serial para o formato .csv, a fim de permitir o acondicionamento dos dados no Excel. Para cada conjunto de dados referentes a uma certa queima, foram construídos um total de 04 (quatro) gráficos, sendo os dois primeiros para mostrar a variação do nível de concentração de fumaça e da intensidade luminosa com o passar do tempo, nesta ordem, com cada uma destas grandezas variando de 0 a 1023, em escala alternativa de unidade adimensional, e o tempo medido em segundos.

O terceiro gráfico traz a variação de temperatura em função do tempo, sendo adotada a escala de temperatura em graus Celsius. O quarto e último gráfico retrata os estados de incêndio e não incêndio, atribuindo o valor 1 à ocorrência do sinistro e o valor 0 à não existência de incêndio. O levantamento da informação sobre estes dois estados deve ocorrer a partir da observação do desenvolvimento da combustão. A queima só pode ser entendida como incêndio a partir do momento em que houver a propagação do fogo no tempo e no espaço. Enquanto as chamas e a fumaça forem insipientes e a temperatura estiver em patamares baixos e sem variações sucessivas nos valores, seja antes ou após o desenvolvimento pleno do fogo, o estado não pode ser interpretado como incêndio.

A partir destes gráficos, foi feita a análise da velocidade da queima em relação a cada material e a responsividade dos sensores em relação ao material combustível, tanto no que se refere ao tempo de resposta quanto ao nível de sensibilidade com que cada sensor recepcionou a informação. A confirmação ou não do incêndio segundo inspeção visual e os dados obtidos nas queimas realizadas foram submetidos a uma rotina no MATLAB, a fim de que após o processamento destas informações, pelo emprego do método de árvore de decisão, fossem estabelecidas as melhores estratégias de solução para a detecção de incêndio e os limites de cortes adequados.

### 3.3.5 Métodos para realização da fase de validação dos resultados

Dentre os detectores de incêndio convencionais, o *sprinkler* foi selecionado para servir como elemento a ser comparado com o SDI que se propõe. Para tanto, foi escolhido para ser empregado no experimento um tipo de *sprinkler* bastante usado, que é o que traz líquido vermelho na ampola (figura 36), a qual se rompe ao atingir a temperatura de aproximadamente 68 °C. No interior do simulador, este dispositivo foi conectado a um SCA de tubo molhado.

**Figura 36:** Modelo de *sprinkler* utilizado nos testes de queimas



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Na fase de validação, foram realizadas duas queimas: (i) uma queima preliminar, tendo como combustível papel A4, a fim de retirar a umidade do ambiente e testar o nível de leitura dos sensores; e (ii) a segunda queima foi a utilizada para realização do teste de validação dos resultados, sendo utilizados na programação estabelecida no Arduino os novos parâmetros adquiridos no processamento da rotina feita no MATLAB.

Baseando-se nestes novos parâmetros, fazendo uso do método de árvore de decisão sobre os dados fornecidos pelo SDI e garantindo o atendimento às condições de delimitação deste estudo, foi obtido um elevado grau de assertividade. A última queima desta fase foi realizada para se fazer a comparação entre o tempo de resposta ao incêndio dado pelo *sprinkler* com o tempo de resposta à mesma situação, oferecido pelo SDI no caso prático particular estudado nesta pesquisa.

## 4 RESULTADOS

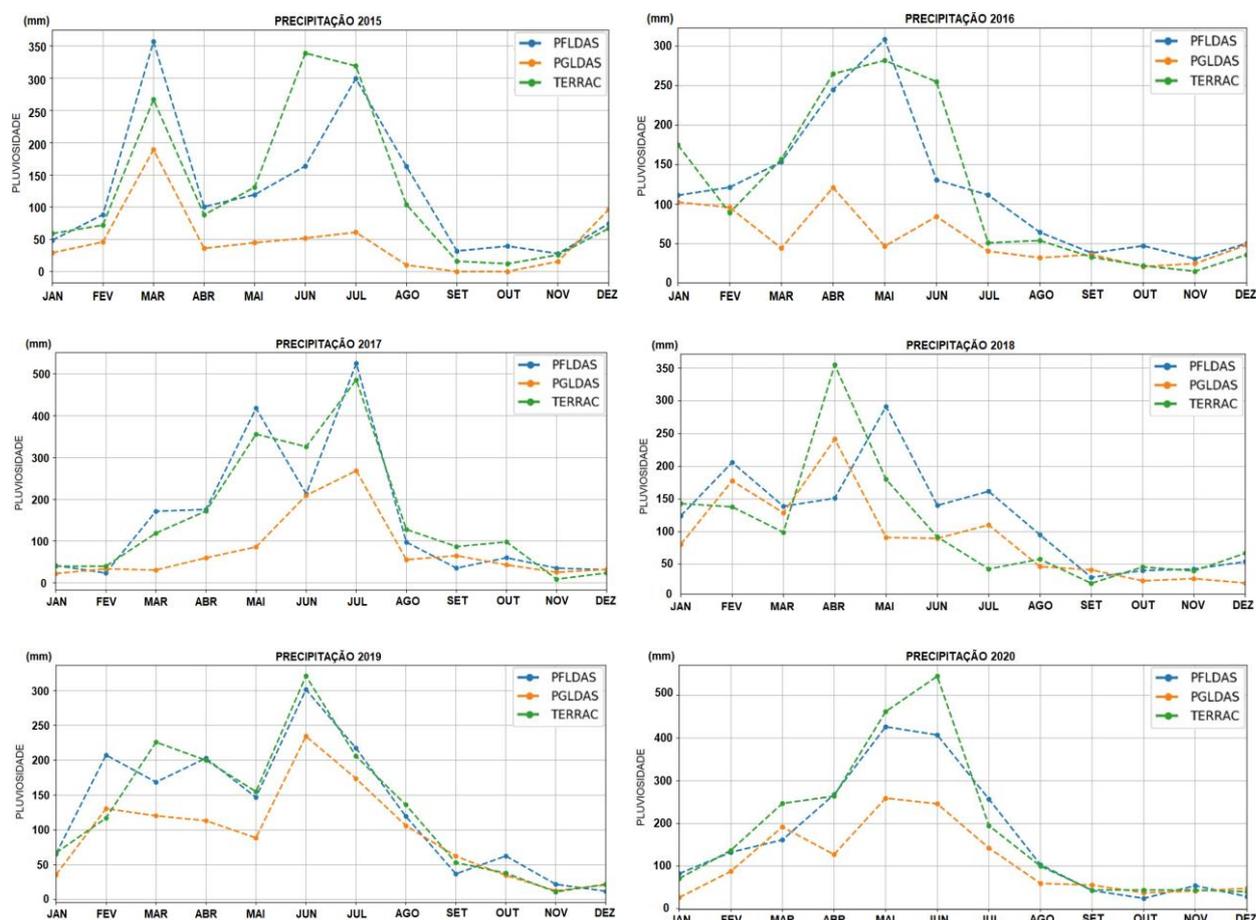
### 4.1 COLETA DE ÁGUA PLUVIAL PARA RESERVA TÉCNICA DE INCÊNDIO

Observando, inicialmente, o conjunto de gráficos da figura 37, pode-se perceber que os mesmos trazem a precipitação média da cidade de João Pessoa, em milímetros, de 2015 a 2020. As curvas azul, laranja e verde indicam os dados das bases obtidos nas bases FLDAS, GLDAS e TERRACLIMATE, nesta ordem. Percebe-se ainda que as informações das bases FLDAS e TERRACLIMATE, geralmente, mantiveram determinada regularidade durante os seis anos, apresentando valores próximos uns dos outros, com raras exceções, especialmente naqueles meses nos quais se sucederam queda ou aumento abrupto em relação ao mês anterior, como por exemplo em junho de 2015, quando houve rápida ascensão da precipitação, ou ainda em junho de 2016, quando ocorreu queda repentina.

Com relação à base GLDAS, é relevante destacar o fato de que, de 2015 a 2017, os dados se mostraram em patamares inferiores aos das demais bases, exceto em meses menos chuvosos. A partir de 2018, porém, os dados passaram a níveis mais próximos aos das bases TERRACLIMATE e FLDAS. Apesar dessas divergências, as tendências de aumento ou diminuição mês a mês foram semelhantes nas três bases. De março a agosto ocorreram as maiores incidências de chuva, com valores de precipitação próximos de 350 mm nas bases TERRACLIMATE e FLDAS e de 250 mm na base GLDAS. Em contraposição a esta tendência, de setembro a dezembro sucederam os menores índices pluviométricos, variando entre 20 e 30 mm em todas as bases.

É importante destacar, ainda, que a pluviosidade nos anos de 2017 e 2020 atingiu níveis acima da média, em decorrência de um fenômeno meteorológico denominado Distúrbios Ondulatórios de Leste – DOL, ou simplesmente ondas de leste, as quais se formam nas regiões próximas à linha do equador, devido à influência exercida sobre as nuvens pelos ventos alísios, principalmente entre o outono e o inverno, no hemisfério sul, influenciando diretamente nos níveis de precipitações da área costeira do Nordeste Brasileiro (VAZ, 2011; MACHADO et al., 2012). Nestes dois anos, a pluviosidade chegou a cerca de 500 mm em meses chuvosos e de 50 mm em meses com baixa incidência de chuvas, sendo valores que, apesar de não representarem o nível comum anual, devem ser incluídos nos cálculos da média, pois ocorrem com certa regularidade nos estados do litoral nordestino (VAZ, 2011; MACHADO et al., 2012).

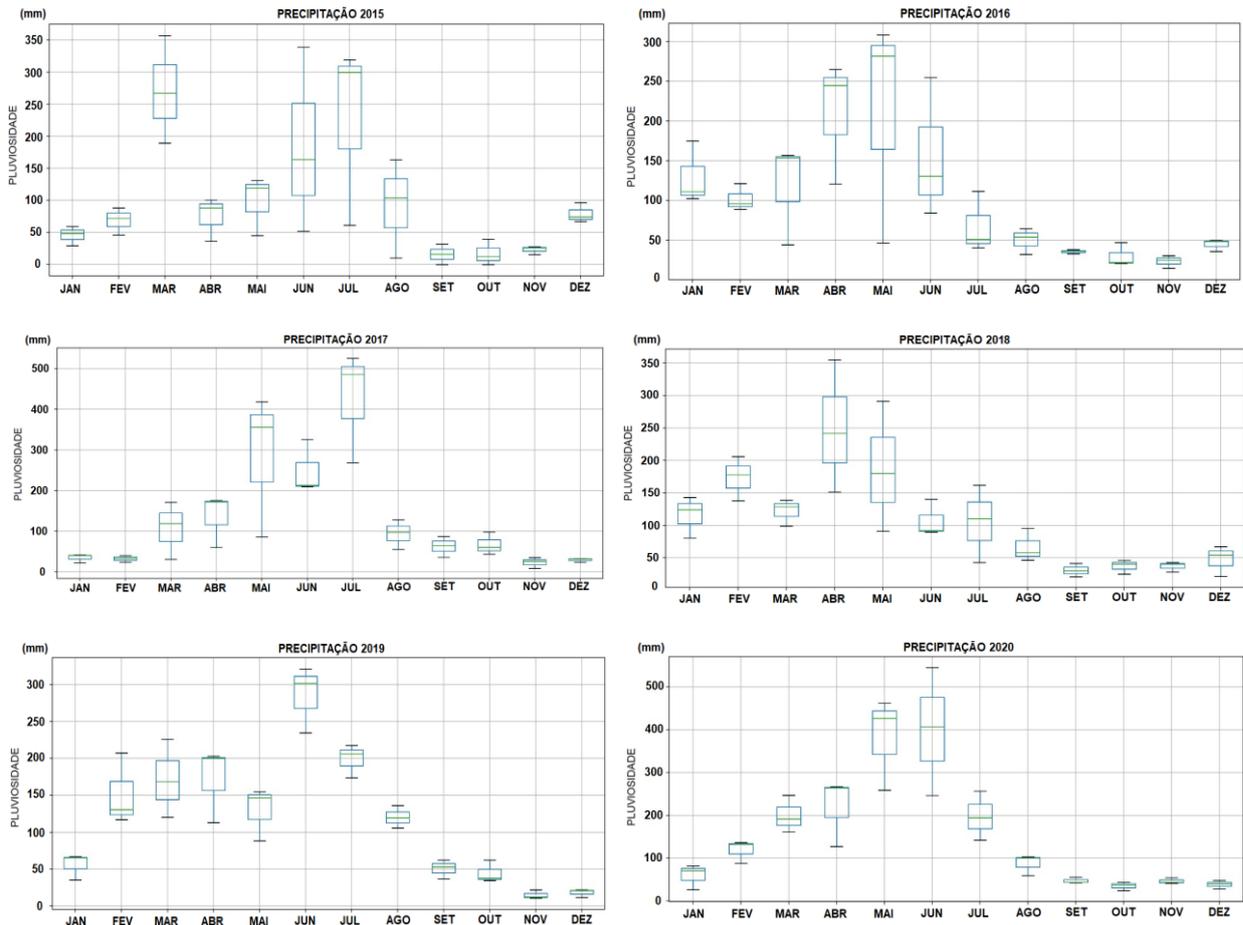
**Figura 37:** Gráficos de precipitação média anual das bases TERRACLIMATE, PFLDAS e PGLDAS referentes ao município de João Pessoa de 2015 a 2020



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

No conjunto de gráficos da figura 38, foi exibido para cada ano um gráfico do tipo *box-plot*, que expõe a média mensal dos valores de pluviosidade, calculada a partir do emprego de todos os valores fornecidos pelas três bases, destacando-se em cada gráfico o nível de diferença entre os valores registrados, mês a mês. Foram identificados extensos intervalos entre primeiros e terceiros quartil, ocorridos em vários meses, deixando evidenciado que são altos os índices de discrepância entre os dados das três bases, principalmente em razão dos dados da base GLDAS, os quais destoaram bastante se comparados aos valores registrados nas demais bases, sendo esta base a maior responsável pela diferença considerável entre os valores de máximo e mínimo de pluviosidade nos meses chuvosos, sobretudo de 2015 a 2017. Nos três últimos anos, de 2018 a 2020, devido aos valores da base GLDAS terem ficado próximos aos valores das outras bases, aconteceu a diminuição destas discrepâncias, o que ficou demonstrado na redução ocorrida nos intervalos entre primeiros e terceiros quartis.

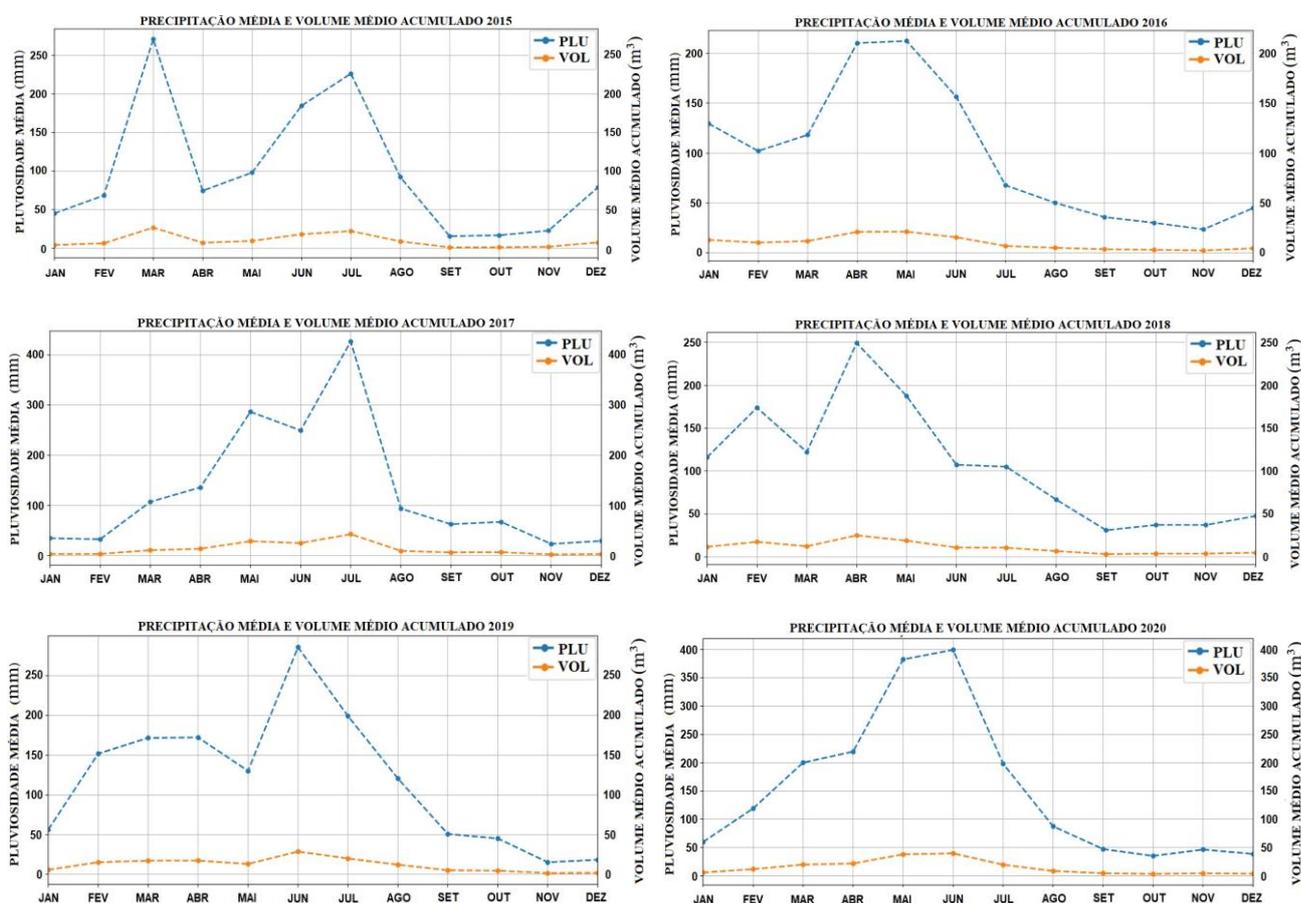
**Figura 38:** Gráficos *box-plot* sobre precipitação média mensal do município de João Pessoa de 2015 a 2020, a partir de dados extraídos das bases TERRACLIMATE, PFLDAS e PGLDAS



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

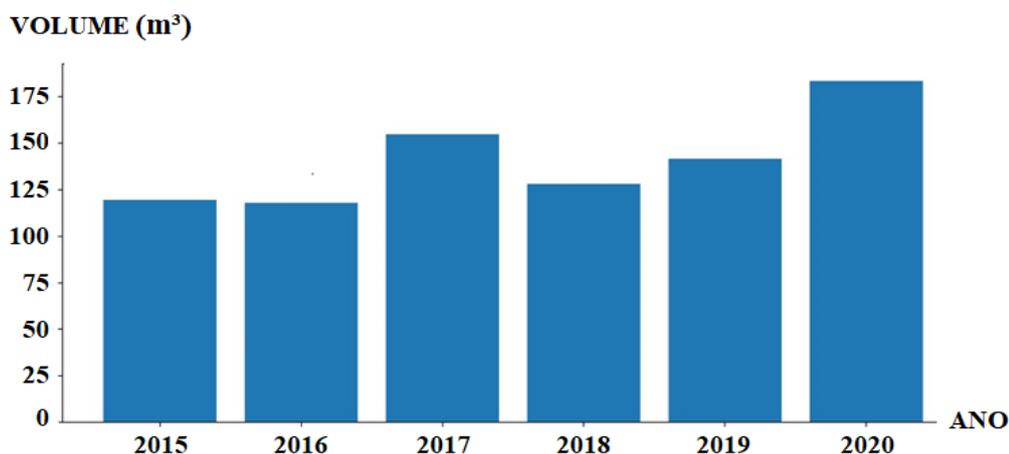
A partir das pluviiosidades médias mensais expressas nos gráficos da figura 38, foi possível obter os valores de volumes médios de chuva a cada mês. Cada gráfico da figura 39 ficou composto por duas curvas: uma azul, correspondente à precipitação média mensal durante determinado ano, e outra laranja, apresentando o volume médio acumulado em cada mês no mesmo período de tempo. Mesmo nos meses mais escassos de chuva, foi possível notar que existe uma garantia de fornecimento de água pluvial em quantidade considerável para armazenamento, mais precisamente entre 20 e 30 mm para cada 100 m<sup>2</sup> em área de projeção horizontal. Para estes meses, considerando o coeficiente de escoamento igual a 0,95, conforme indicado na tabela 1, nota-se que o volume médio de água acumulada ao mês (equação 2) é de cerca de 1,9 m<sup>3</sup>. Devido ao prédio do PRODEMA possuir 772,48 m<sup>2</sup> de área, desde que seja garantida a presença de um adequado sistema de coleta de água pluvial será possível acumular, aproximadamente, 14,6 m<sup>3</sup> de água em um mês de pouca chuva.

**Figura 39:** Gráficos de precipitação e volume médios mensais do município de João Pessoa de 2015 a 2020 calculados a partir de dados extraídos das bases TERRACLIMATE, PFLDAS e PGLDAS



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

O gráfico de barra da figura 40, por sua vez, apresenta o volume médio anual de chuvas no município de João Pessoa, de 2015 a 2020, tomando por base os valores de volumes médios mensais encontrados nos gráficos da figura 39. Cada barra vertical corresponde ao volume médio de água precipitado em determinado ano sobre uma área de 100 m<sup>2</sup> em projeção horizontal. Estes volumes variaram entre 120 m<sup>3</sup> e 180 m<sup>3</sup>; sendo assim, se for adotado um coeficiente de escoamento igual a 0,95 devido ao tipo de telhado (tabela 1), para a área total do PRODEMA, que é de 772,48 m<sup>2</sup>, e utilizando a equação 2, será obtido um volume médio acumulado de cerca de 880 m<sup>3</sup> em um ano menos chuvoso, podendo chegar a 1320 m<sup>3</sup>, aproximadamente, naqueles anos em que ocorre maior incidência de chuva. Com base nestes valores, pode-se afirmar que em anos de pluviosidade baixa a média diária é de cerca de 2,41 m<sup>3</sup>, e de 3,6 m<sup>3</sup> em anos de pluviosidade elevada.

**Figura 40:** Volume médio anual acumulado a cada 100 m<sup>2</sup> em projeção horizontal \_2015 a 2020

Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Pelas normas vigentes no Estado da Paraíba, uma edificação tipo E-1 deve ter em sua RTI um volume de 5 m<sup>3</sup> se o sistema de hidrante for do tipo 1 – mangotinho –, ou de 10 m<sup>3</sup> se o sistema de hidrante for do tipo 2 – mangueira simples de 1½” (PARAÍBA NT CBMPB 015, 2016). De acordo com os dados do gráfico da figura 40 e as informações contidas no parágrafo anterior, nota-se que, em um mês chuvoso, para abastecer a RTI com hidrante do tipo 1 é preciso captar água durante 1,4 a 2,1 dias, e a RTI com hidrante do tipo 2, de 2,78 a 4,15 dias.

A RTI, porém, destina-se a responder situações críticas e, portanto, deve estar sempre abastecida. Logo, se for total ou parcialmente esvaziada, por razão de manutenção ou de uso, deve ser prontamente reabastecida. Uma das soluções para que tal reposição seja garantida no contexto deste estudo é a criação de um sistema com dois reservatórios: um elevado, de modo que ao ter a capacidade atingida permita a água excedente extravasar para o segundo, que ficará no solo, estando conectados por duas tubulações: a primeira para conduzir a água extravasada da RTI até ele e a segunda para reabastecer a RTI pelo emprego de bombeamento hidráulico.

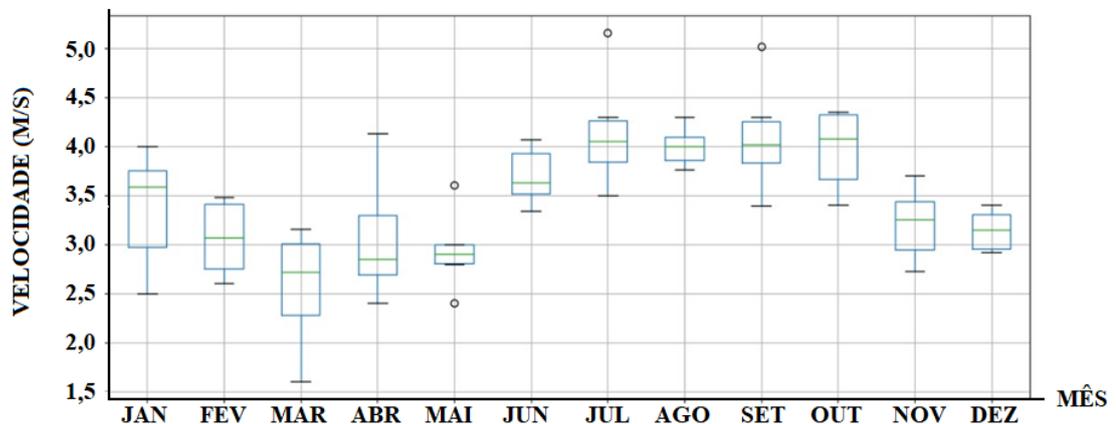
## 4.2 CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA EÓLICO-SOLAR.

### 4.2.1 Geração de energia elétrica a partir de aerogerador

Para análise da capacidade de geração de energia elétrica através do modelo de turbina eólica considerada, deve-se ressaltar que os dados foram obtidos de uma única base de sensoriamento por satélite, sendo assim, as discrepâncias dos valores não se mostraram altas.

Observando o gráfico *box-plot* da figura 41, vemos que na média dos seis anos as discrepâncias maiores se concentraram nos meses de janeiro, março e abril, entretanto, ainda assim todos os valores se mostraram inseridos dentro da curva normal. Há de se observar também que o mês de maio, com dois valores, e os meses de julho e outubro, com um valor cada, apesar de apresentarem níveis baixíssimos de discrepância, apresentam estes pontos como *outliers*, ou seja, tais valores estão fora da curva normal de dados, sendo por isso desconsiderados para os cálculos de média, pois provavelmente causariam resultados anômalos caso tivessem sido incluídos nos cálculos. Deste modo, pode-se afirmar que diante da análise e medidas tomadas, os riscos de comprometimento dos cálculos foram aceitavelmente reduzidos.

**Figura 41:** Gráfico *box-plot* da média mensal de velocidade dos ventos no município de João Pessoa, para um ano qualquer, com uso de dados de satélite da base TERRACLIMATE\_2015 a 2020



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

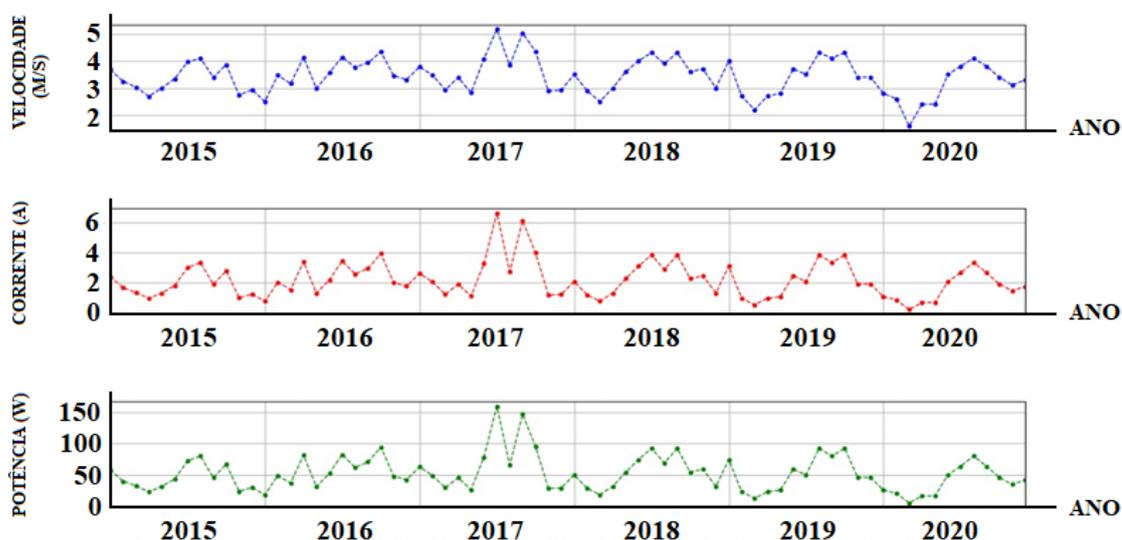
A partir dos dados de velocidades dos ventos adquiridos e do emprego das equações (4) a (13), foram calculadas a corrente e a potência elétrica gerada. A seguir, as informações obtidas foram dispostas em seis gráficos, estando três deles contidos na figura 42 e outros três na figura 46. Em cada conjunto de três gráficos, o primeiro deles traz uma curva azul que descreve a variação da velocidade dos ventos em relação ao tempo; o segundo apresenta uma curva vermelha que exhibe a alteração do valor da corrente conforme o tempo modifica; e o terceiro e último gráfico traz uma curva que revela como se dá a variação da potência útil gerada à medida que o tempo transcorre.

Os três gráficos da figura 42 trazem no eixo vertical, respectivamente, os valores médios da velocidade dos ventos, da corrente e da potência gerada, de 2015 a 2020. Observa-se que, habitualmente, o valor da corrente variou entre 1,0 A e 4,0 A durante este período, chegando a apresentar valores atípicos, a exemplo de julho e setembro de 2017, quando atingiu marcas

próximas de 7,0 A e 6,5 A, respectivamente, ou como ocorrido em março de 2020, quando a corrente e a potência foram quase nulas.

Os menores valores de corrente e potência ocorreram, anualmente, entre os meses de janeiro e maio e entre novembro e dezembro. Já os valores de maior intensidade se deram entre junho e setembro. A potência elétrica gerada variou, comumente, entre 20 W e 85 W. Em julho e setembro de 2017, porém, ocorreu um pico na curva de potência, cujos valores atingiram 160 W e 150 W, nesta ordem, devido à maior incidência de ventos em decorrência das ondas de leste; houve ainda um vale na curva de potência no mês de março de 2020, que chegou a menos de 5 W, todavia, são valores fora dos parâmetros habituais.

**Figura 42:** Gráficos de média mensal de velocidade dos ventos, corrente e potência obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa\_2015 a 2020



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

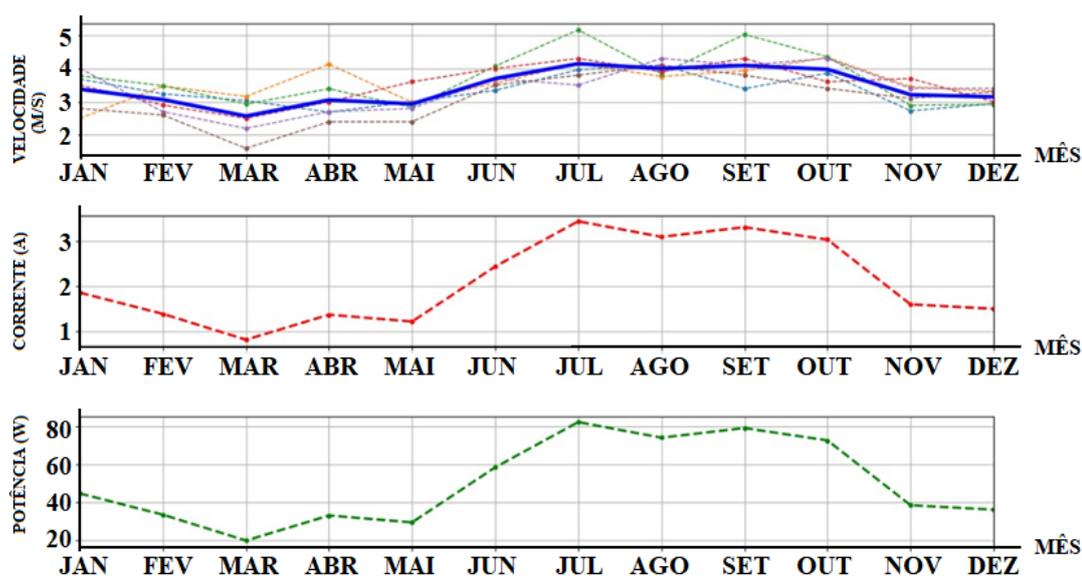
Os gráficos da figura 43, por sua vez, trazem no eixo vertical os valores das médias mensais da velocidade dos ventos, da corrente elétrica e da potência útil do sistema para um ano qualquer. Para tanto, utilizou-se os valores referentes a cada mês, de 2015 a 2020, para cálculo da média, ou seja, o valor da velocidade média do vento indicado no mês de julho corresponde à média aritmética dos seis meses de julho, de 2015 a 2020, sendo seguida esta mesma ideia para o estabelecimento da velocidade média nos demais meses.

Ainda com relação aos gráficos da figura 43, percebe-se que a velocidade do vento, a corrente e a potência assumiram os seus maiores valores entre os meses de julho e outubro, chegando a, aproximadamente, 4 m/s, 3,5 A e 80W, nesta ordem. Em compensação, os valores apresentaram seus patamares mais baixos durante o final da primavera e por todo o período do

verão, indo desde o mês de novembro até o mês de março do ano seguinte, apresentando medidas em torno de 3 m/s, 1,5 A e 30W, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos, ficou demonstrado que existe uma produção diária de energia razoável, para que mesmo em períodos de produção mais escassa, caso esta energia seja devidamente armazenada e suplementada por uma outra fonte, terá a capacidade de manter em funcionamento equipamentos de baixo consumo diário e mensal, a exemplo do SDI proposto nesta pesquisa.

**Figura 43:** Gráficos de média mensal de velocidade, corrente e potência obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa\_2015 a 2020

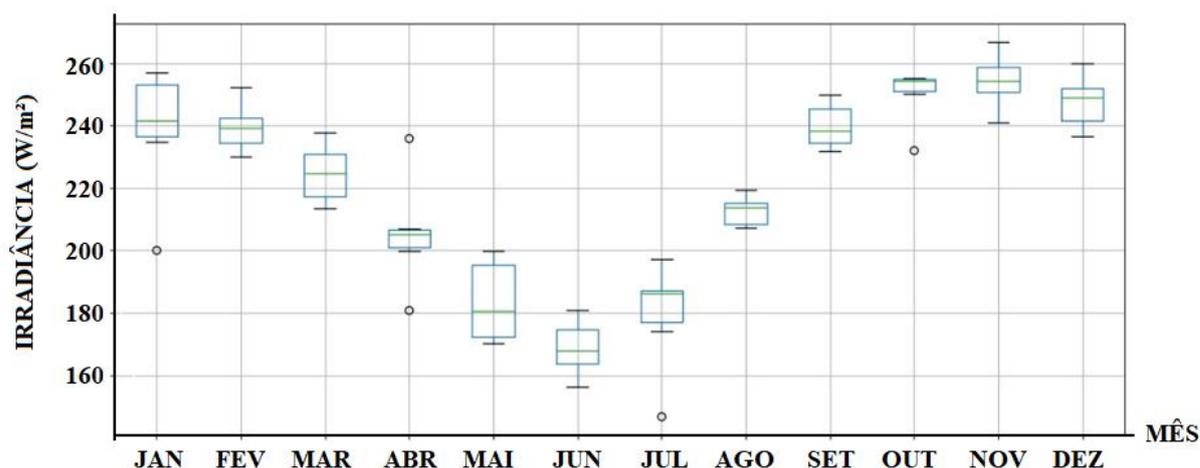


Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

#### 4.2.2 Geração de energia elétrica a partir de modelo matemático de painel fotovoltaico

Considerando os dados adquiridos, os quais foram extraídos unicamente da base TERRACLIMATE, verificou-se que as discrepâncias entre os valores de irradiância solar são baixas. Observando o gráfico *box-plot* da figura 44, durante os seis anos, as discrepâncias maiores se concentraram nos meses de janeiro e maio, mas com valores máximos e mínimos que não chegaram a estar 10% acima ou abaixo do valor médio, estando todos os valores inseridos dentro da curva normal, exceto um dos valores do mês de janeiro. Analogamente a este valor, dois valores do mês de abril e um valor nos meses de julho e de outubro são chamados de *outliers*, pois se mostraram fora do nível de normalidade, sendo por isso desconsiderados para os cálculos de média, pois certamente comprometeriam a fidedignidade dos resultados.

**Figura 44:** Gráfico *box-plot* sobre média mensal de irradiância solar no município de João Pessoa, para um ano qualquer, com uso de dados de satélite da base TERRACLIMATE de 2015 a 2020



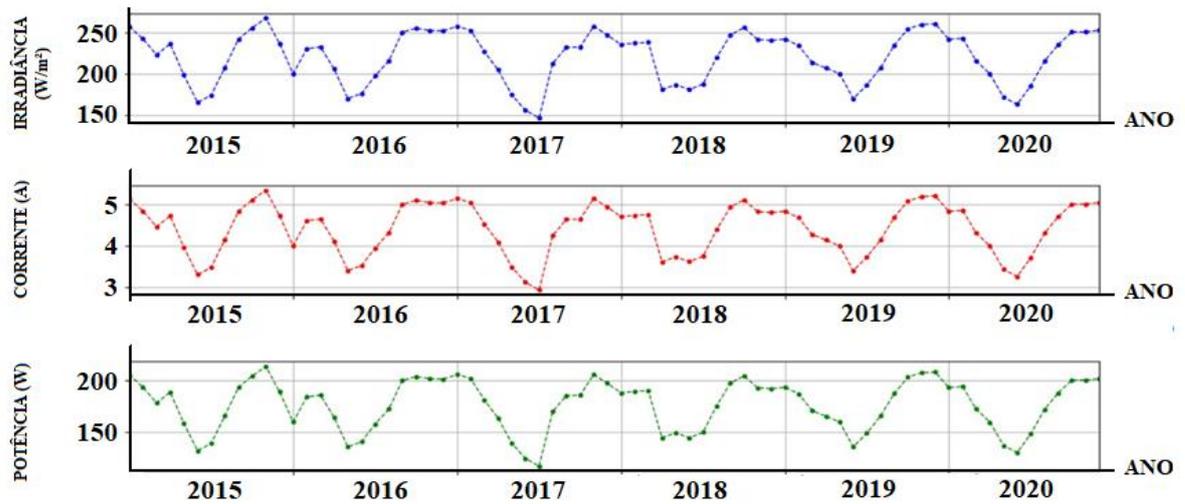
Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Após a constituição do gráfico *box-plot*, seguindo a mesma linha de raciocínio utilizada na organização dos dados referentes ao sistema eólico, foi estabelecido para realização do estudo do sistema fotovoltaico a construção de seis gráficos, ficando três deles na figura 45 e os demais na figura 46. Em um conjunto de gráficos de cada figura, o primeiro traz uma curva azul representando a variação da irradiância solar em função do tempo; o segundo, por sua vez, apresenta uma curva vermelha que demonstra a variação da corrente gerada conforme o tempo transcorre; e o terceiro gráfico traz uma curva na cor verde, representando a variação da potência elétrica gerada pelo painel fotovoltaico de acordo com o transcurrir dos meses.

Os gráficos das figuras 45 e 46 trazem nos eixos das ordenadas os valores da irradiância, corrente e potência médias, respectivamente, para a região onde está localizado o prédio do PRODEMA/UFPB, enquanto nos eixos das abcissas está a escala de tempo em meses. O que difere os gráficos apresentados por uma e outra figura é o fato de que na figura 45 são mostrados os valores da irradiância, corrente e potência médias de 2015 a 2020, ou seja, para os seis anos considerados, enquanto na figura 46 os gráficos representam as variações médias mensais destas grandezas para um ano qualquer.

Nos gráficos da figura 45, habitualmente, o valor da corrente variou entre 3,0 A e 5,0 A durante os seis anos estudados, enquanto a potência oscilou entre 120W e 210W. Os valores mais baixos de corrente e potência aconteceram nos meses de maio e julho de cada ano, que são aqueles que apresentam maior incidência de nuvens e precipitações, a exemplo do mês de julho de 2017, no qual ocorreu precipitações mais intensas que o ordinário para o período, tendo por esta razão a irradiância ficado bem abaixo dos níveis habituais.

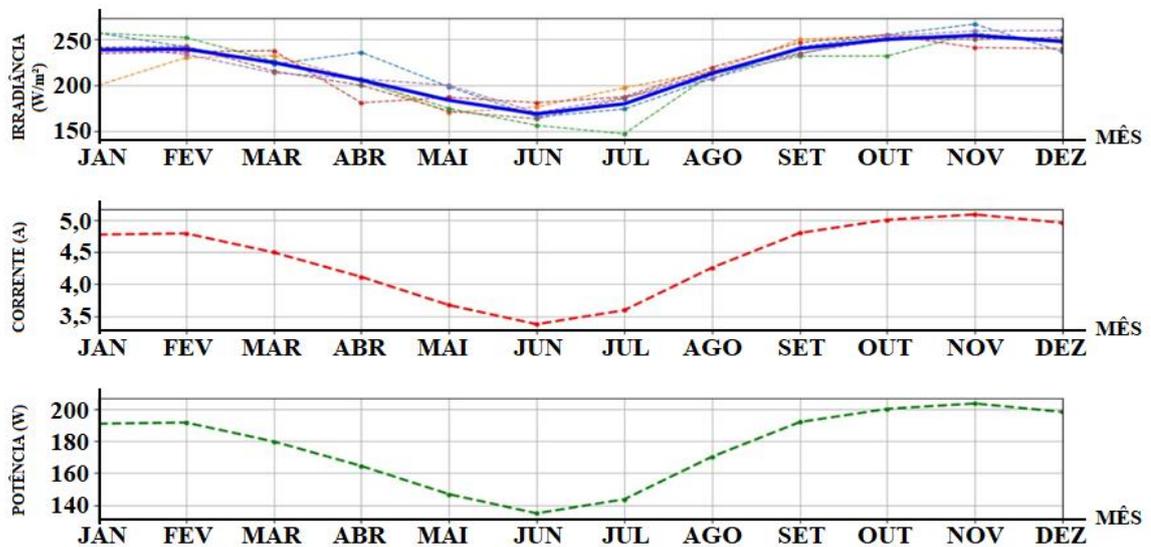
**Figura 45:** Dados de média mensal de irradiância, corrente e potência obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa\_2015 a 2020



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Os gráficos da figura 46, por conseguinte, fazem alusão às médias mensais de irradiância solar, corrente e potência em um ano qualquer, calculadas a partir da média dos valores referentes a este mês nos anos de 2015 a 2020. Em termos práticos, isto significa dizer que o valor de irradiância média indicado em janeiro corresponde à média aritmética dos seis meses de janeiro, de 2015 a 2020, e assim, sucessivamente, a fim de indicar os índices de irradiância dos demais meses.

**Figura 46:** Dados de média mensal da irradiância, corrente e potência para um ano qualquer, obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE para o município de João Pessoa



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Nota-se que a irradiância sobre as coordenadas geográficas consideradas apresentou flutuações suaves, mantendo-se entre 75 e 150 Watts de potência a cada metro quadrado de área de placa solar. Os valores da corrente média variaram entre 3 e 4 Ampères de maio a julho e entre 4 e 5 Ampères nos demais meses, atingindo os maiores valores entre outubro e dezembro. Com respeito à potência média, em um ano qualquer, entre os meses de maio e julho, o modelo de painel considerado forneceu em torno de 140 Watts. Do início de fevereiro ao final de abril e de meados de julho ao início de setembro, a potência gerada oscilou de 150 a 190 Watts, atingindo valores máximos entre outubro e dezembro, quando ultrapassou os 200 Watts.

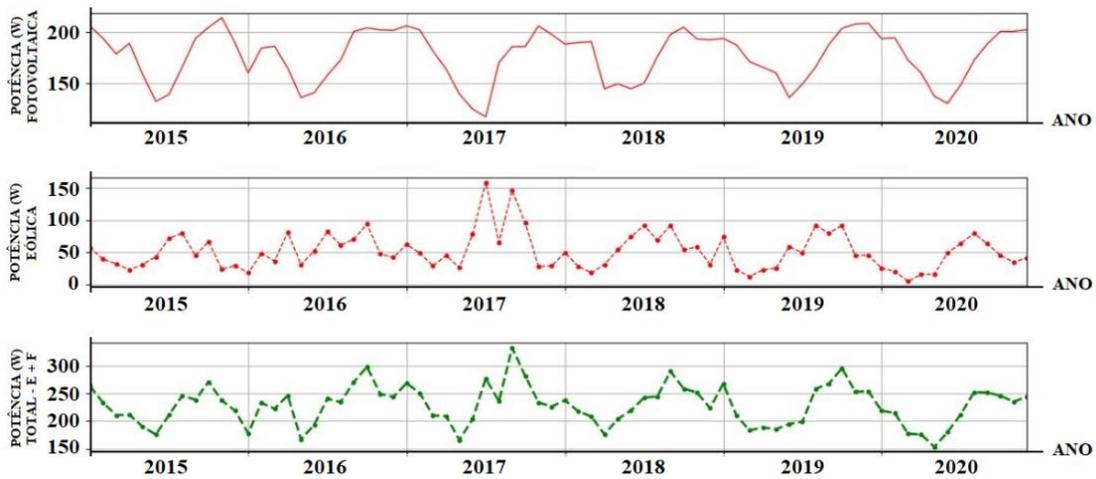
#### **4.2.3 Geração de energia elétrica pelo Sistema Híbrido Eólico-Solar**

Finalmente, para realização da análise do sistema híbrido de geração de energia como um todo, foram construídos quatro gráficos, ficando três deles na figura 47 e o último na figura 48. No conjunto de gráficos da figura 47, o primeiro deles traz uma curva vermelha contínua representando a variação da produção de energia fotovoltaica com o passar dos meses durante os seis anos; o segundo gráfico apresenta uma curva vermelha tracejada que representa a variação mensal da produção de energia eólica com o passar dos anos considerados; e o terceiro gráfico traz uma curva na cor verde tracejada que mostra a variação da soma das potências fotovoltaica e eólica.

No gráfico da figura 48, por sua vez, também foram traçadas as três curvas (vermelho, vermelho tracejado e verde tracejado), mas desta feita, com a finalidade de representar a variação mensal das potências fotovoltaica, eólica e do sistema híbrido (eólica + fotovoltaica) para um ano qualquer, de maneira que o valor de potência apresentado no gráfico para certo mês corresponde à média dos valores referentes a este mês durante os seis anos. Desta maneira, a potência do sistema híbrido fornecida no gráfico para o mês de julho é igual à média dos valores desta potência no referido mês, entre 2015 a 2020.

Iniciando a análise dos gráficos da figura 47 e 48, fica perceptível que a potência fotovoltaica é predominantemente maior que a energia eólica durante todos os meses, com exceção de julho de 2017, que foi um ano atípico devido às muitas chuvas. Apesar do sistema fotovoltaico produzir mais energia que o sistema eólico, isto não diminui a importância deste, pois mostrou-se capaz de completar satisfatoriamente a energia do sistema híbrido. A junção destas duas formas de energia pode produzir em torno de 180 W entre abril e maio, podendo chegar a cerca de 270 W entre os meses de setembro e novembro.

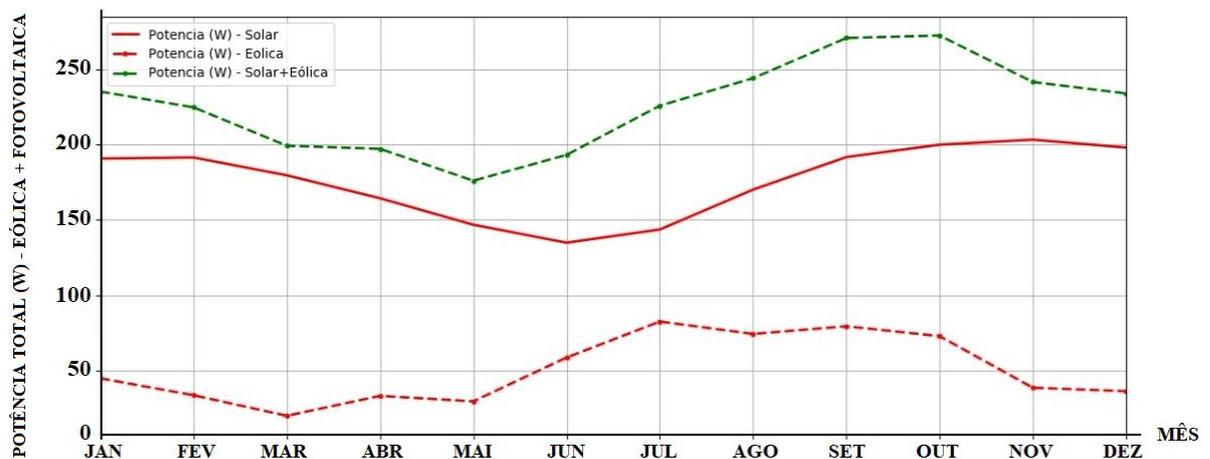
**Figura 47:** Gráfico de média mensal de potência solar fotovoltaica, potência eólica e potência eólico fotovoltaica obtidas pelo uso de dados da base TERRACLIMATE acerca de João Pessoa\_2015 a 2020



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

O gráfico da figura 48 traz a potência média anual fornecida em João Pessoa, pelos modelos de aerogerador e painel fotovoltaico adotados. Com base nos dados expressos no gráfico, pode-se dizer que a curva de potência do sistema híbrido segue a mesma tendência de variação da curva de potência fotovoltaica, inclusive o sistema híbrido tem maior parte de sua potência oriunda desta forma de energia. Quanto à energia eólica, esta tem março como o mês de menor nível de produção, com cerca de 15W de potência, chegando a cerca de 85W no terceiro trimestre do ano, de maneira que esta forma de energia pode representar, a depender do período do ano, entre 10% e 35% da quantidade total de potência fornecida pelo SHGE/EF.

**Figura 48:** Gráfico da média mensal de potência solar fotovoltaica, potência eólica e potência eólico fotovoltaico para um ano qualquer, obtidas pelo uso de dados da base TERRACLIMATE acerca de João Pessoa



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Agora que já se sabe a potência média de um SHGE/EF, composto por um aerogerador genérico de hélice com raio unitário, em metros, e um painel fotovoltaico área unitária, em metro quadrado, deve-se observar quanto de potência elétrica, na prática, é possível gerar através do SHGE/EF no mês de maio, quando foi prevista a menor geração de energia híbrida, segundo os dados históricos fornecidos pela base de sensoriamento remoto TERRACLIMATE.

A aferição das medidas foi feita nos dias 03, 05, 07, 12 e 14 de maio de 2021, inclusive, entre estes dias houve aqueles em que o céu estava coberto por nuvens, mas isto não provocou variação considerável no nível de produção de energia elétrica por meio da placa solar, mostrando ser viável utilizá-la no local, seja em dias ensolarados ou nublados.

**Tabela 11:** Medidas de grandezas elétricas e da turbina eólica

PAINEL FOTOVOLTAICO								V	I
DATA	HORA	INTERVALO MEDIDAS	Nº DE MEDIDAS	V (V)	I (A)	R = V/I (Ω)	P = R * I <sup>2</sup> (W)	V (V)	I (A)
03/05/21	13:50:00 às 14:19:30	30 S	60 POR DIA	39,47	0,380	103,87	14,999	39,47	0,380
05/05/21				39,66	0,382	103,82	15,150	39,66	0,382
07/05/21				39,45	0,374	105,48	14,754	39,45	0,374
12/05/21				39,33	0,384	102,42	15,103	39,33	0,384
14/05/21				37	0,360	102,78	13,32	37	0,360
<b>MÉDIA</b>						<b>103,67</b>	<b>14,665</b>	<b>38,98</b>	<b>0,376</b>
TURBINA EÓLICA								CONVERSÃO DE CORRENTE E TENSÃO	
DATA	HORA	INTERVALO MEDIDAS	Nº DE MEDIDAS	V (V)	I (A)	R (Ω)	P = R * I <sup>2</sup> (W)	K*V (V)	I/K (A)
03/05/21	13:50:15 às 14:19:45	30 S	60 POR DIA	1,77	0,017	104,12	0,0300	39,47	0,0007
05/05/21				1,46	0,014	104,28	0,0298	39,66	0,0006
07/05/21				2,11	0,020	105,5	0,0422	39,45	0,0010
12/05/21				1,75	0,017	102,9	0,0297	39,33	0,0008
14/05/21				1,31	0,013	100,77	0,0170	37	0,0005
<b>MÉDIA</b>						<b>103,51</b>	<b>0,0297</b>	<b>38,98</b>	<b>0,00072</b>

Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Há de se observar a baixíssima produção de energia por meio do aerogerador utilizado frente ao que foi previsto no modelo matemático, o que não prova em definitivo, a inviabilidade do uso do mesmo no local para composição do SHGE/EF, mas indica que há algum problema de ordem técnica, seja pela disposição onde foi instalado ou por equívoco na instalação elétrica, exigindo a reavaliação da instalação para correção de falhas e otimização de eficiência.

Para se ter uma ideia, enquanto a taxa média de produção de energia por unidade de tempo do painel fotovoltaico foi de 14,665 W, no aerogerador esta taxa foi de 0,0297 W (tabela 11), o que significa dizer que a produção de energia elétrica por meio da fonte solar é mais de quinhentas vezes maior que aquela advinda da turbina eólica. Somando-se as duas fontes de energia consideradas, concluiu-se que a potência total média gerada pelo SHGE/EF montado foi de 14,695 W (tabela 12).

**Tabela 12:** Medidas de grandezas elétricas do SHGE/EF

SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA						
	V (V)	I (A)	$R = V/I$ ( $\Omega$ )	$P = R * I^2$ (W)	HORAS/DIA	ENERGIA POR DIA (Wh)
<b>MÉDIA</b>	<b>38,98</b>	<b>0,377</b>	<b>103,59</b>	<b>14,695</b>	<b>12</b>	<b>176,34</b>

Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Após ser determinada a potência total gerada pelo SHGE/EF montado, foi feito o levantamento do consumo médio do referido sistema. A partir de um processo de leitura direta, conforme descrita na metodologia, determinou-se a corrente elétrica que circula pelo SDI durante seu funcionamento, constatando-se que são consumidos, em média, 1,675 W durante 24 horas por dia, sob uma corrente de 0,186 Ampères para manter o sistema ativo, resultando em um consumo médio diário de energia por volta de 40,2 Wh (tabela 13). Desconsiderando-se a produção de energia por parte do aerogerador durante o período noturno, por ser centenas de vezes inferior à produção de energia por parte do painel solar e por não haver disponibilidade de energia solar na parte da noite, pode-se afirmar que o SHGE/EF montado consegue gerar, em média, 14,695 W durante cerca de 12 horas, sob uma corrente de 0,377 Ampères, resultando em uma produção média diária de energia em torno de 176,34 Wh (tabela 12).

Ao se calcular a razão entre a produção e o consumo médios diários, pode-se concluir que se produz, em média, uma quantidade de energia mais que quatro vezes maior que a energia necessária ao funcionamento do SDI, o que nos leva a concluir que, caso seja devidamente armazenada, esta quantidade é suficiente para manter o sistema funcionando. Uma solução possível é o armazenamento desta energia em bateria. Uma bateria de 7ah, por exemplo, geralmente usada para armazenar carga em *nobreaks*, estando plenamente carregada apresenta a capacidade de suprir a demanda de energia durante 1 (uma) hora, em um sistema que exige uma corrente de 7 Ampère para funcionar. Sabendo que a corrente de funcionamento do SDI é de 0,186 A e utilizando uma regra de três simples com grandezas inversamente proporcionais, chegou-se à conclusão que a referida bateria, desde que carregada completamente, é capaz de manter em funcionamento o referido SDI por cerca de 37,6 h (tabela 13).

**Tabela 13:** Medidas de grandezas elétricas SDI proposto

SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO						
	V (V)	I (A)	$R = V/I$ ( $\Omega$ )	$P = R * I^2$ (W)	HORAS/DIA	ENERGIA POR DIA (Wh)
<b>MÉDIA</b>	<b>9</b>	<b>0,186</b>	<b>48,39</b>	<b>1,675</b>	<b>24</b>	<b>40,2</b>

Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

### 4.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS COM O SDI PROPOSTOS

Os processos experimentais nesta parte da pesquisa foram divididos em três etapas: fase preliminar, fase de calibração e fase de validação. Foi baseado nisto que se definiu as três partes desta seção.

#### 4.3.1 Fase preliminar

Esta fase foi utilizada para realizar ajustes que forem necessários aos sensores e torná-los aptos a captar os dados com o mínimo de interferência possível. Em relação aos sensores, tanto o de chamas quanto o de temperatura necessitaram passar por determinadas adaptações, para que fosse possível resolver algumas questões relacionadas à acurácia e à interferência sofrida por eles durante o processo de leitura.

Certas fontes de radiação, não advindas da chama característica de incêndio (radiação solar, luz branca artificial etc), tanto em ambientes fechados quanto abertos, interferiram na resposta dada pelo sensor de chamas. Para mitigar os efeitos destes ruídos, foi posto um cilindro de plástico envolto por fita isolante preta para que não passasse radiação pelas paredes laterais, impedindo interferência na captação do sensor; em uma das extremidades do cilindro, foi posta uma camada fina de fita adesiva de cor vermelha na frente do sensor (figura 49), funcionando como filtro de radiações emitidas nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho.

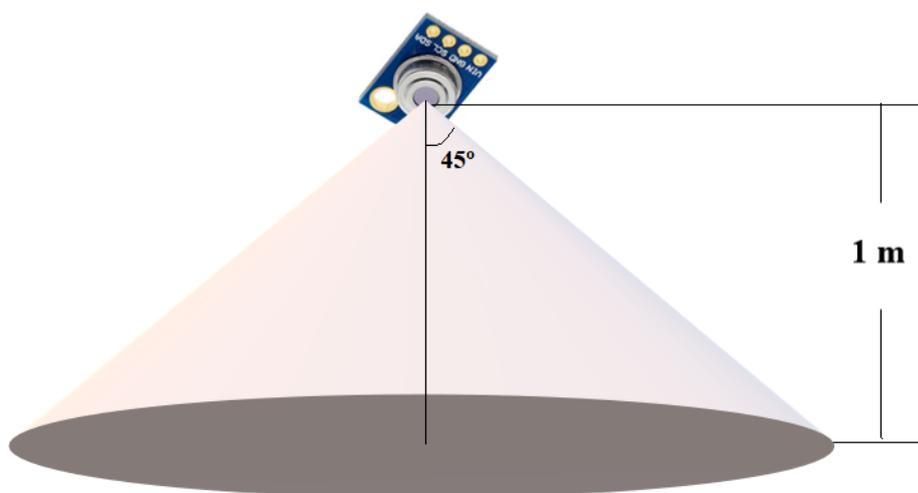
**Figura 49:** Sensor de chamas envolto por invólucro preto e filtro vermelho



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

Com relação ao MQ-2, ao analisar a figura 34 e os dados disponibilizados no datasheet deste sensor (HANWEI, S/D), constatou-se que seu ângulo de visão é de  $90^\circ$ , havendo perda de sensibilidade à medida em que a fonte de calor vai aumentando a distância em relação ao eixo orthogonal ao plano do sensor. Ao chegar aos limites extremos do ângulo de visão, ocorre perda de 50% da acurácia da medição. Outro problema encontrado foi a confirmação de que, em caso de se fazer a leitura a uma distância de 1,0 m, por exemplo, o MQ-2 irá auferir a média da temperatura em uma região circular de área de  $3,14 \text{ m}^2$ . Deste modo, ao efetuar a leitura, sempre acontece uma discrepância considerável entre o valor de temperatura medido e o valor de temperatura no ponto onde a fonte de calor está (figura 50).

**Figura 50:** Níveis de concentração de gases no MQ-2

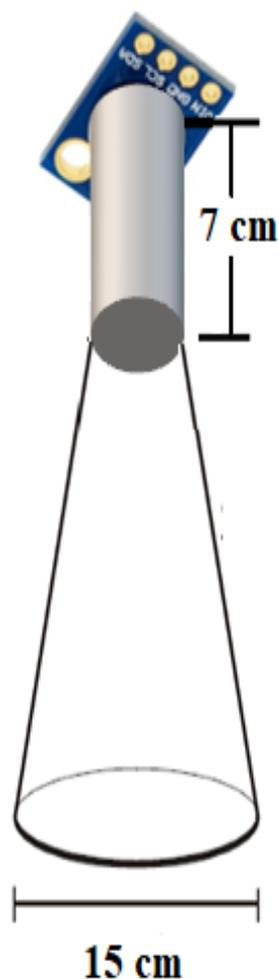


Fonte: Elaboração própria do autor

Para resolver a inconsistência de leitura da temperatura, foi posto um guia de ondas de 7 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, constituído por material metálico, sendo encoberto por uma fita composta por resina de politetrafluoroetileno (fita do tipo veda rosca), que é um isolante térmico (FIGUEIREDO, 2019). Esta camada de fita foi disposta com a finalidade de se isolar, termicamente, o tubo metálico do ar ambiente, de modo que esta troca de calor não interferisse na acuidade da leitura realizada pelo sensor (figura 51).

Sendo assim, apesar de haver redução significativa da área de varredura do sensor, o mesmo apresentou sensibilidade ao calor em uma região circular com 15 cm de diâmetro (figura 51), o que se mostrou suficiente para que qualquer fonte de energia térmica posta na região de teste fosse detectada. Além do mais, foi possível atenuar as inconsistências das medições, anteriormente apresentadas.

**Figura 51:** Sensor de temperatura envolto por tubo metálico



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021.

#### 4.3.2 Fase de calibração

Solucionados os problemas relacionados aos sensores, de modo a tornar o SDI apto à coleta das medidas com precisão, iniciou-se a fase de calibração, que tem como objetivo levantar os dados captados pelos sensores diante de uma situação específica de incêndio e, juntamente com a expressão lógica que expressa quando há ou não a ocorrência do princípio de incêndio, estabelecer pelo uso do método de *machine learning* conhecido como árvore de decisão, os limiares de corte ideias para obtenção de uma estratégia de solução que, pelo uso de uma heurística simplificada, apresente um ótimo grau de eficiência.

Para tanto, foram realizadas três queimas com cada um dos materiais selecionados para experimentação: MDF e folha de papel A4. Para cada uma destas queimas, coletou-se os dados e, a partir deles, foram traçados quatro gráficos para cada queima, sendo três deles referentes à

variação dos valores medidos pelos sensores com o passar do tempo e o último construído a partir da observação do ambiente sinistrado, definindo-se dois valores lógicos como resultado, 0 e 1, sendo 0 a não percepção visual do incêndio e 1 a visualização da condição de incêndio.

Foram ações primordiais nesta fase coletar os dados lidos pelos sensores e estabelecer limiares a cada um, para conferir funcionabilidade e responsividade quando atingirem certos patamares contidos na programação do Arduino. Os patamares escolhidos, embora aleatórios, estão entre níveis aos quais os sensores responderam com razoabilidade às condições empíricas impostas ao sistema, ainda na fase preliminar, sendo usados como valores de corte aos sensores de gás, chamas e temperatura, nesta etapa do estudo, 80 u.a., 500 u.a. e 60 °C, nesta ordem.

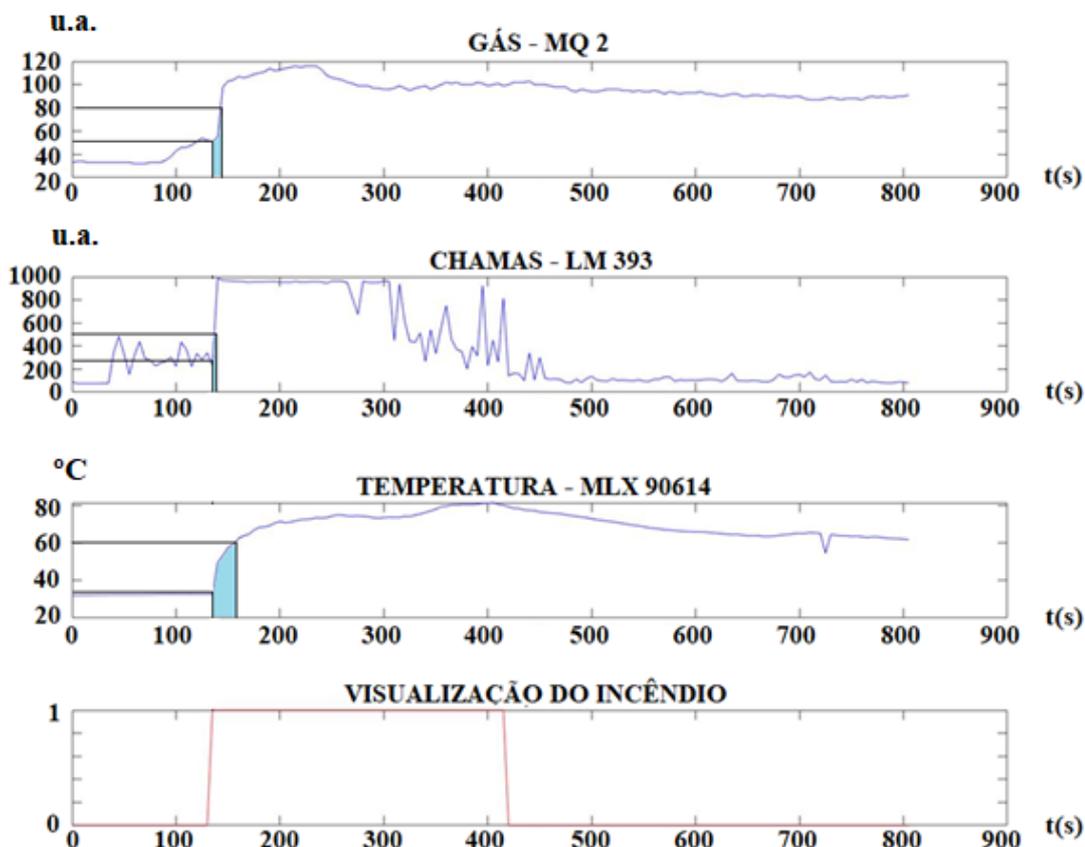
#### 4.3.2.1 Resultados das queimas com papel

Os gráficos da figura 52 mostram como os valores das leituras feitas pelos sensores de gás, chamas e temperatura variam com o tempo, bem como o fogo evolui à medida que o tempo passa, indo da condição de não incêndio (0) para condição de incêndio (1) e, depois de desenvolvido o fogo, o ambiente vai retornando lentamente à condição de não incêndio (0), momento em que há aumento considerável da concentração gasosa, diminuição gradativa da temperatura e ausência de chama, com o sensor de chamas registrando valores próximos a zero. O comportamento do incêndio e a resposta dos sensores são percebidos de maneira similares nos gráficos das figuras 52, 53 e 54, referentes à 1ª, 2ª e 3ª queima de papel, respectivamente.

Antes de iniciar a combustão na primeira queima, houve um lapso temporal que durou entre 90s e 100s, que se refere ao período de tempo usado para preparação do procedimento experimental. Após este período, deu-se início à queima. No início da combustão, houve pouca fumaça, o que provocou alteração sutil no nível do sensor de gás, indo de 30 u.a. para 50 u.a. Devido à insipiente formação de chamas no início, o sensor mostrou pouca sensibilidade, com valores de leitura oscilando entre 300 u.a. e 400 u.a. O sensor de temperatura é o que se mostra menos sensível, sem praticamente variar.

Convém destacar que nesta fase inicial, até se passar cerca de 130 s, o incêndio ainda não estava caracterizado. Foi a partir deste momento que o fogo passou a se propagar no tempo e no espaço (figura 52\_início da faixa azul do gráfico). Logo o nível do sensor de chamas passa das 500 u.a., registrando aos 140 s mais de 900 u.a e a temperatura do objeto ultrapassou neste instante os 60 °C, e após 145 s, o sensor de gás MQ-2 registrou o valor 103 u.a. Isto significou que, caracterizado o incêndio, bastaram 15s para os sensores chegarem aos limites de corte.

**Figura 52:** Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 1ª combustão de papel

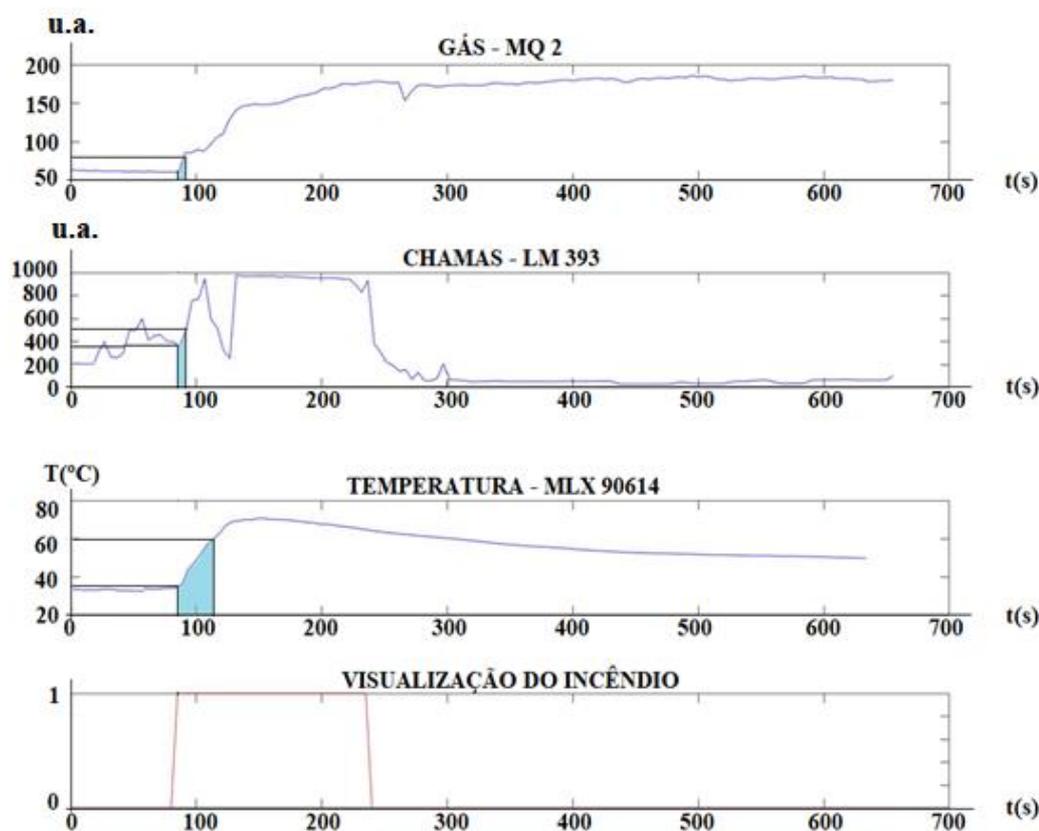


Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

Analisando os gráficos da figura 53, nota-se que antes do início da queima houve um lapso temporal que durou cerca de 60s, sendo este período utilizado para preparação do experimento. Após isto, iniciou-se a queima propriamente dita, momento este no qual houve quantidade de fumaça insuficiente para sensibilização do sensor, que permaneceu inalterado por cerca de 20s. Houve um pouco de formação de chamas no início, sendo observado que o nível do sensor variou de 350 u.a. e 450 u.a. O sensor de temperatura, por sua vez, sofreu leve variação durante a fase inicial de combustão inicial.

Quando o incêndio passou a ser caracterizado, fato ocorrido no instante 80 s (figura 53\_início da faixa azul do gráfico), mais uma vez o sensor de chamas ultrapassou rapidamente o valor de corte com 10 segundo do início do incêndio, registrando valores acima de 800 u.a. em  $t = 95s$ , e o sensor de gás, por conseguinte, chegou a 80 u.a neste mesmo momento. Enquanto isso, a temperatura do objeto só ultrapassou o valor de 60°C passados 35s a 40s da configuração de incêndio aparecer. Isto significa dizer que, caracterizado o incêndio, bastaram no máximo 40s para que todos os sensores atingissem os limiares estabelecidos.

**Figura 53:** Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 2ª combustão de papel



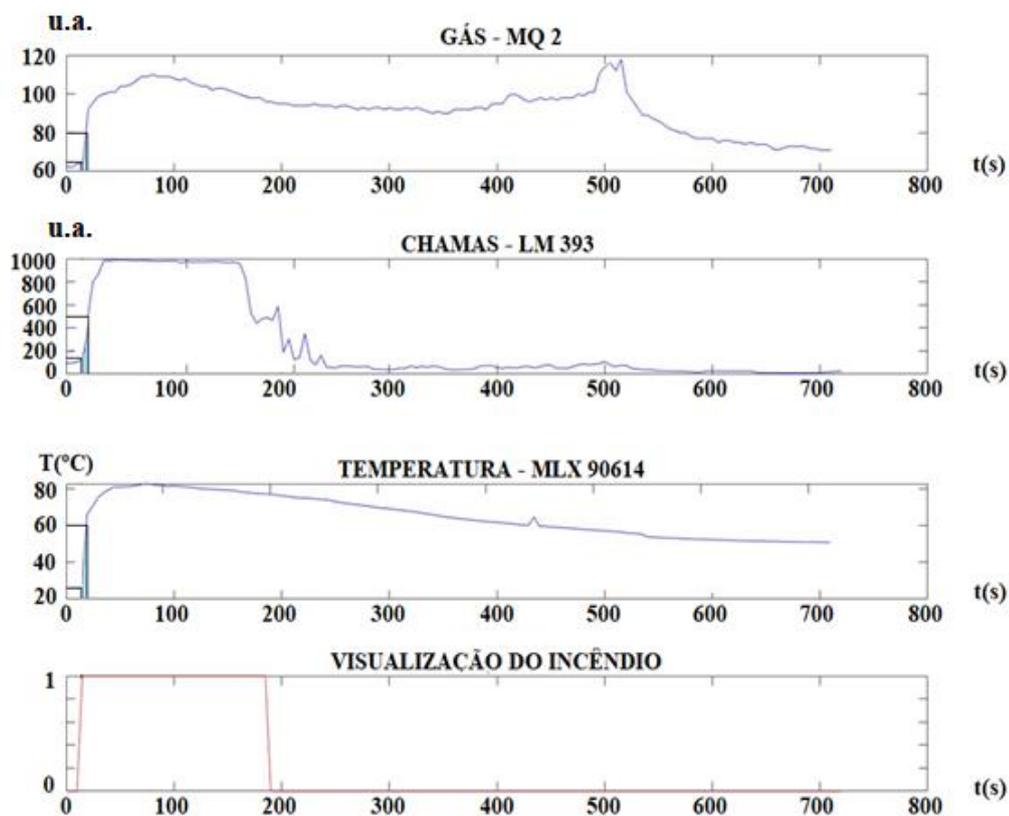
Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Na terceira e última combustão realizada com uso de folhas de papel A-4, ao avaliar os gráficos da figura 54, notou-se que antes do início da queima o lapso temporal foi mínimo, durante pouquíssimos segundos. Isto se deu, porque quase a totalidade da preparação do experimento aconteceu antes do acionamento do sistema, de modo que a análise já se iniciou quase no momento em que começou a combustão.

Entre 5s e 10s, houve elevação suave nos níveis dos três sensores, mas estas mudanças foram mais perceptíveis do que nas duas primeiras queimas com papel. Durante este intervalo de tempo, os níveis de chama variaram entre 250 u.a. e 450 u.a., os níveis gasosos e de fumaça variaram entre 60 u.a. e 70 u.a. e a temperatura ficou praticamente estável, em torno de 25° C.

Iniciado o incêndio, a partir do instante 10 s (figura 54\_início da faixa azul do gráfico), passados mais 5s, o sensor de chamas já ultrapassou o valor de corte e registrou 900 u.a. em  $t=10$  s do início do incêndio. Neste intervalo de tempo, o sensor de gás ultrapassou a marca dos 80 u.a. e a temperatura passou de 60°C, podendo ser percebido, com base nestas informações, que 10s após a caracterização do incêndio, todos os sensores tinham sido acionados.

**Figura 54:** Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 3ª combustão de papel



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Em caráter geral, no que diz respeito à sensibilidade, pode-se afirmar que no caso da queima de papel A4, o sensor de chamas é o primeiro a detectar, em seguida o sensor de gás e, por último, o sensor de temperatura.

#### 4.3.2.2 Resultados das queimas com MDF

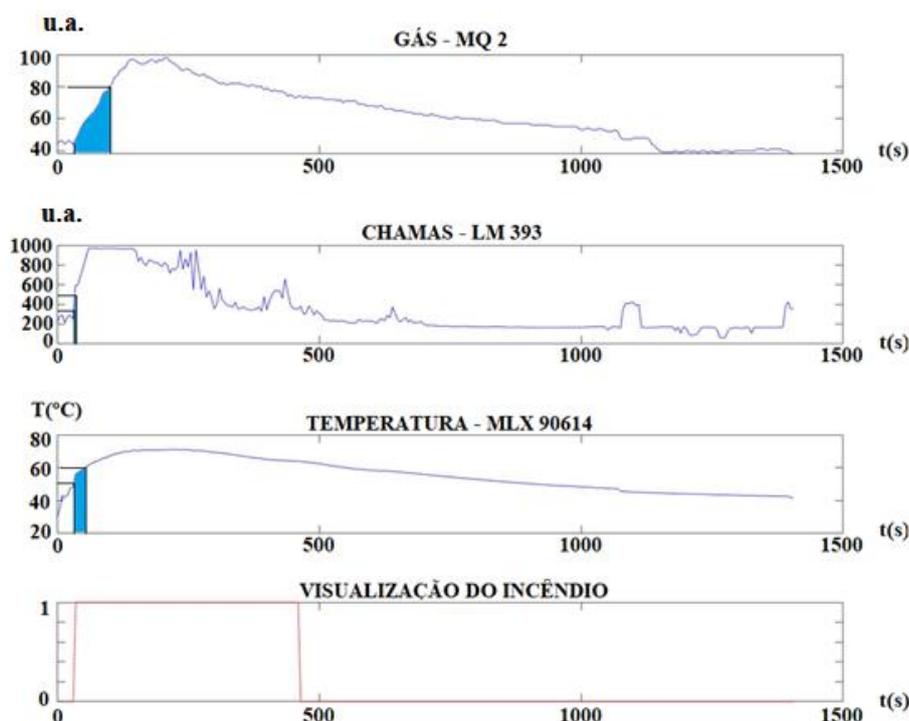
Os gráficos da figura 55 mostram as variações das medidas feitas pelos sensores de gás, chamas e temperatura em função do tempo, exceto o último gráfico, que mostra a evolução do fogo com o passar do tempo, indo da condição de não incêndio (0) para condição de incêndio (1) e, após um período de desenvolvimento do incêndio, retorna à condição de não incêndio (0), momento em que há alta concentração de fumaça, redução contínua da temperatura e ausência de chama, cujo sensor passa a apresentar valores tendendo a zero. Este comportamento do desenvolvimento do incêndio e das respostas dos sensores ao fogo ocorre de maneira similar nos gráficos das figuras 55, 56 e 57, que se referem à 1ª, 2ª e 3ª queima com emprego de MDF.

Até que se iniciasse a combustão, passaram-se cerca de 25s. Neste período de tempo, foram feitas as preparações finais do experimento. Iniciada a queima, o sensor de chamas se modificou suavemente, assumindo valores entre 200 u.a. e 300 u.a., a temperatura oscilou entre 35°C e 45°C, enquanto o sensor de gases permaneceu no mesmo nível, isto porque os níveis de chamas estiveram próximos aos do início da queima.

Do início da combustão (25s) até o instante 50s houve pouquíssima fumaça, de modo que o sensor de gases se manteve no mesmo nível neste período, ficando em torno de 50 u.a. O sensor de chamas, por sua vez, passou de 350 u.a. para 500 u.a., e o sensor de temperatura apresentou elevação de 40° C para 50 °C.

No instante 50s, ficou caracterizado, de fato, o início do incêndio (figura 55\_início da faixa azul do gráfico), 10s após, o sensor de chamas passou dos 500 u.a e no segundo 70, registrou níveis acima de 800 u.a. A temperatura do objeto, por sua vez, chegou a 60 °C entre os instantes 80 s e 90 s. O sensor de gás, contudo, só registrou o nível de corte quando tinha se passado cerca de 80s do início da constatação visual do incêndio.

**Figura 55:** Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 1ª combustão de MDF



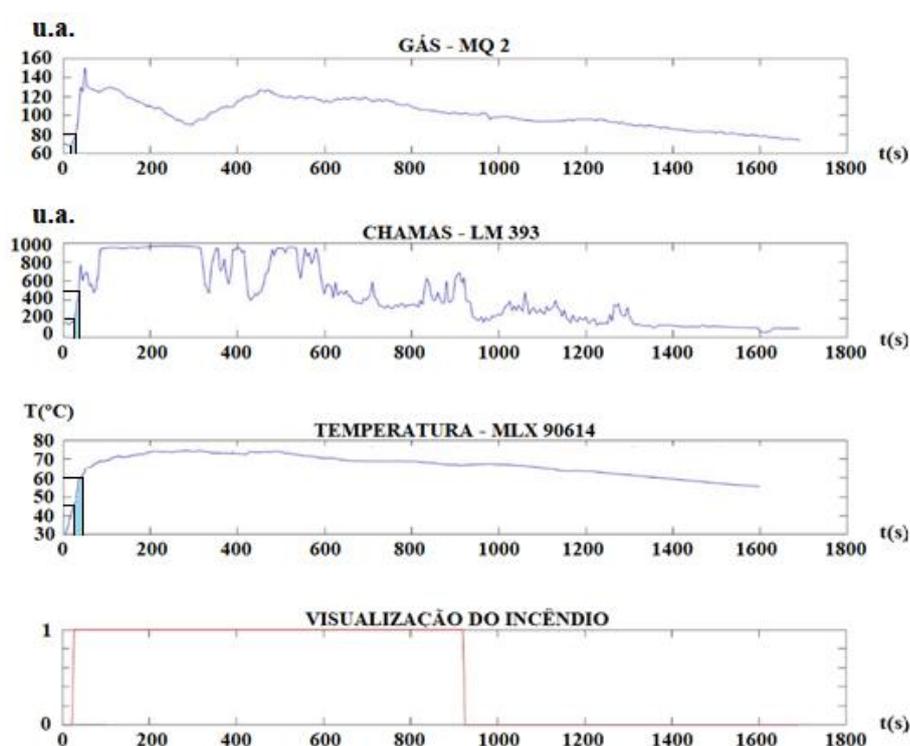
Fonte: Elaborada pelo autor

Acerca da segunda queima de MDF, analisando os gráficos da figura 56, percebeu-se que o início da combustão se deu quase que imediatamente, pois as preparações finais do

experimento ocorreram antes do acionamento dos sensores. Nos 10s iniciais, é perceptível uma elevação da temperatura, a qual foi de 30°C para 45°C, enquanto os níveis de fumaça e de chamas permaneceram praticamente inalterados.

Passada a fase inicial do fogo, evidenciou-se o incêndio, de fato (figura 56\_início da faixa azul do gráfico), e o sensor de chamas passou dos 500 u.a. em 10s. Neste mesmo intervalo de tempo, o nível do sensor de gás e fumaça foi de 60 u.a. para 80 u.a. Com mais 10 s, a temperatura havia chegado a 60° C. Este resultado mostrou que em 15s do início do incêndio todos os sensores já tinham atingido o limite de corte.

**Figura 56:** Gráfico dos sensores MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 2ª combustão de MDF

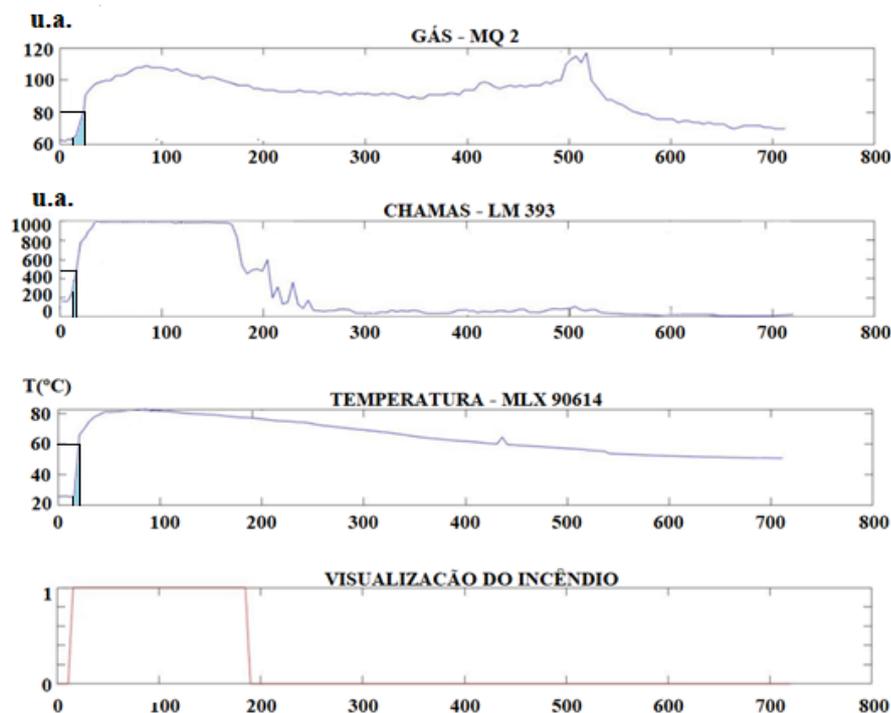


Fonte: Elaborada pelo autor

A última queima de MDF está representada pelos gráficos da figura 57. Quando a combustão foi iniciada, nos primeiros 20s o nível dado pelo sensor de gás variou entre 60 u.a. e 65 u.a., já o sensor de chamas ficou em torno de 180 u.a. e a temperatura entre 25°C e 30°C. Após este tempo, iniciou-se o incêndio propriamente dito. Passados 10s deste início, a temperatura já havia chegado aos 60°C; neste mesmo tempo o sensor de chamas passou do limiar de corte e com 15s do início do incêndio, registrava o valor de 800 u.a., e entre o instante 40s e 45 s após o início do experimento o sensor de gás passou dos 80 u.a. Conclui-se, portanto, que 25 s após o começo do incêndio, todos os sensores já tinham sido sensibilizados.

Em linhas gerais, no caso das queimas nas quais o MDF foi o material combustível, notou-se que sensor de chamas foi o primeiro a detectar o incêndio, em seguida, o sensor de temperatura se mostrou mais sensível, e o sensor de gases foi o último a ter sua sensibilidade acionada.

**Figura 57:** Gráfico v2 MQ-2, LM393 e MLX 90614 na 3ª combustão de MDF



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Em se tratando do processo de calibração como um todo, existem algumas observações que carecem ser feitas, às quais estão relacionadas tanto às características apresentadas nos gráficos quanto às propriedades físicas e químicas dos materiais combustíveis utilizados nos experimentos. Dentre estas observações, convém elencar as seguintes:

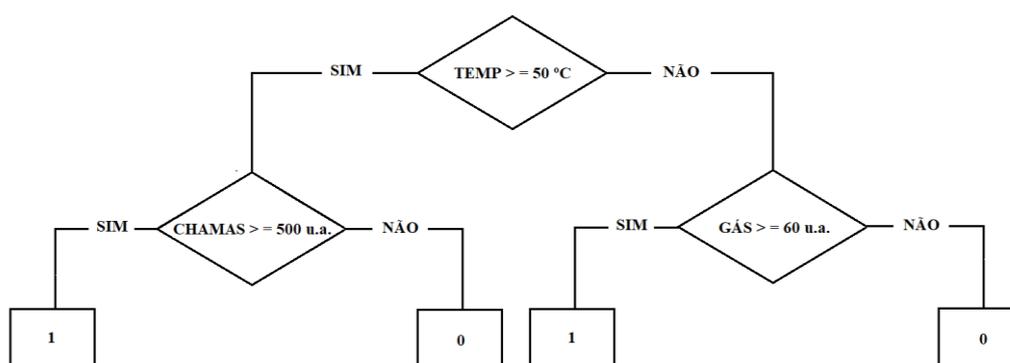
- A queima do MDF é mais lenta que a queima do papel, uma vez que o MDF é uma disposição mais compactada da celulose.
- Ao observar os gráficos da variação da temperatura em função do tempo em todas as queimas e compará-los com o gráfico da figura 17, nota-se que há similaridades entre as curvas características do incêndio, embora a carga de incêndio considerada só atinja, no máximo, a temperatura de 90°C na fase mais desenvolvida da combustão.
- Para os dois materiais utilizados nas queimas realizadas, o sensor que mais rapidamente detecta o incêndio é o sensor de chamas.

- Se a combustão for lenta, a temperatura do objeto se eleva mais rapidamente com passar do tempo do que a concentração de fumaça e, nestes casos, o sensor de temperatura geralmente detecta mais rapidamente o incêndio, se comparado à detecção realizada pelo sensor de gases nestes casos.
- Se a combustão for rápida, a elevação da concentração de gases e fumaça acontece numa velocidade maior que a temperatura do objeto e, nestes casos, o sensor de gases e fumaça, geralmente, detecta o incêndio mais rapidamente que o sensor de temperatura

Sob a lógica binária para determinação da ocorrência ou não do incêndio, se chegou a um resultado com base na inspeção visual feita por um observador humano e outro decorrente de cada tupla numérica formada pelos valores medidos pelos sensores em certa leitura. Os dados foram submetidos a uma rotina do MATLAB para análise, sendo obtidos os novos parâmetros de corte para cada sensor, de modo a otimizar o percentual de concordância entre os dados de entrada e de saída, reduzindo ocorrência de falsos positivos e falsos negativos. Das estratégias de solução pronunciadas pelo MATLAB, foi escolhida aquela que desse um alto nível de assertividade ao SDI e, ao mesmo tempo, trouxesse uma lógica de programação simples, feita com base numa árvore de decisão com o mínimo de folhas possíveis.

Assim foi refeita a programação a partir dos novos pontos de corte, constituindo-se como valor de corte para o sensor de temperatura o valor de 50° C, e esta foi a primeira grandeza analisada pelo SDI. Quando atingido este valor, foi observado se a medida fornecida pelo sensor de chamas é igual ou maior que 500 u.a. Se sim, o incêndio era confirmado, se não, o sistema voltava a verificar a temperatura. Caso a temperatura seja menor que 50 °C, é visto se o nível de gás é maior ou igual a 60 u.a. Se sim, a configuração de incêndio era confirmada, caso contrário, o sistema fazia nova avaliação, voltando à análise da temperatura (figura 58).

**Figura 58:** Fluxograma da heurística escolhida para programação, obtida pelo uso do método de árvore



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

### 4.3.3 Fase de Validação

Em ação seguinte ao estabelecimento da estratégia que se mostrou mais apropriada à implementação na programação do SDI, foi dada abertura à fase de validação dos resultados alcançados na etapa de calibração, sendo realizadas duas queimas nesta nova fase: (i) a primeira delas chamada de preliminar, por ter como alvos principais a redução da umidade do local de testes e a conferência dos parâmetros de calibração dos sensores; e (ii) a segunda queima realizada para consumação do teste, tendo já implementada no SDI a programação feita com base nos parâmetros estabelecidos pelo MATLAB.

Depois de feita a verificação da sensibilidade e da precisão dos sensores e confirmado o funcionamento adequado do SDI durante a primeira queima, foi esperado o reestabelecimento das variáveis medidas pelos sensores aos níveis de condições normais para o ambiente, para em seguida ser dado início à segunda queima. Esta teve como combustíveis pedaços de folhas de papel A4 e pedaços de MDF, totalizando 500 gramas de material celulósico. A combustão foi realizada em presença do SDI e do sprinkler, a fim de comparar o tempo de resposta ao incêndio dado pelo SDI com o tempo de resposta à mesma situação oferecido pelo *sprinkler*, mediante as condições estabelecidas no caso prático deste estudo.

Nesta comparação, foi comprovado que no caso específico testado o SDI detectou o incêndio de acordo com os parâmetros esperados, sendo acionado 20 segundos após ter sido observado o início da configuração de incêndio através de observação visual. O *sprinkler*, por sua vez, demorou aproximadamente 1 minuto até atingir a temperatura de 68°C, que é o valor previsto para o rompimento da ampola, contudo a mesma não quebrou, embora submetida a temperaturas entre 70°C e 80°C por mais de 2 minutos, perfazendo um total de mais de 3 minutos desde a percepção visual do início do incêndio.

Baseado nos testes experimentais realizados e nos resultados da análise feita pelo MATLAB, através do emprego do método de árvore de decisão sobre os dados fornecidos pelo SDI, ficou evidenciado que, para o caso particular estudado nesta pesquisa, o tempo resposta dado pelo SDI proposto é inferior àquele apresentado pelo *sprinkler* de ampola vermelha. Com relação ao nível de assertividade do SDI constituído, a estrutura de árvore utilizada fornece um desempenho de cerca de 94%, o que significa em termos concretos que a cada 100 análises efetuadas o resultado de 6 delas será contraditório com relação à situação real, mostrando falsos positivos ou falsos negativos dentre estes casos.

#### 4.3.4 Comparações dos resultados obtidos com a literatura

Inicialmente, pode-se destacar as principais diferenças operacionais existentes entre o SDI proposto e os detectores de incêndios convencionais mais utilizados nas edificações urbanas. Ao contemplar as características básicas destes detectores expressas no referencial teórico, percebe-se que, com exceção do detector multissensorial, os demais detectores analisam apenas uma variável associada ao incêndio (chamas, temperatura ou fumaça), sob uma lógica pela qual o incêndio se confirma quando o nível de corte do sensor é ultrapassado. O problema é que um detector que percebe apenas uma variável do ambiente relacionada ao cenário de incêndio está altamente propenso a alarmes falsos, pois não raramente poderá estabelecer resposta não correspondente ao que acontece no compartimento da edificação.

Mesmo o detector multissensorial, composto pelo detector de fumaça e de temperatura, pode apresentar uma análise inconsistente, pois parte do pressuposto de que apenas quando os limiares dos dois sensores são alcançados simultaneamente o incêndio é confirmado, o que pode significar uma interpretação equivocada, considerando que em uma queima lenta pouca fumaça é liberada inicialmente, mas a temperatura se eleva com certa rapidez, o que pode retardar a detecção do incêndio, ou, ainda, uma queima com pouca liberação de fumaça pode ter chamas e temperaturas altas em pouco tempo, mas este tipo de sensor pode demorar a detectá-lo, a depender da concentração dos gases liberados no ambiente.

Além dos detectores convencionais, existem também pesquisas como a realizada por Rashid e Rafid (2017), na qual a identificação de sensibilização simultânea de quatro sensores de chamas resultava na ativação de um solenoide, permitindo a passagem de água para os *sprinklers*. A questão é que neste caso, assim como nos detectores convencionais, há apenas a consideração do limiar de uma variável crítica para se definir a ocorrência ou não de incêndio, o que pode levar o sistema a respostas erradas. Entretanto, para reduzir a ocorrência de falsos positivos, utilizaram-se da superposição de resultados, de modo que o sistema só era acionado quando os quatro sensores de chamas eram sensibilizados simultaneamente.

Diferentemente da referida pesquisa, ao invés de lançar mão da ideia de superposição das respostas dos sensores para reduzir casos de respostas discordantes com a situação real, o SDI ora proposto observa três variáveis relacionadas à presença de incêndio: chamas, fumaça e temperatura. Através do emprego do método de árvore de decisão, cada combinação de três valores dado pelos sensores em um certo momento de leitura forma uma proposição composta que irá confirmar ou não a ocorrência do incêndio.

Encontram-se também na literatura pesquisas que empregam estratégias fundamentadas em outros princípios lógicos, pelas quais é possível reduzir ainda mais os casos de falsos positivos ou de falsos negativos, pois apresentam uma heurística que classifica com elevado grau de assertividade não apenas as situações bem definidas de incêndio ou não incêndio, mas também aquelas ditas intermediárias, assim chamadas por serem de difícil distinção, pois exibem características de ambos estados ao mesmo tempo. Um exemplo deste tipo de trabalho foi o estudo feito por análise de dados feita sob uma lógica *fizer* e um viés multissensorial, mostrando ótima sensibilidade, conseguindo com o protótipo desenvolvido registrar 83% de taxa de sucesso e 17% de taxa de alarmes falsos, de modo que em seis casos de teste o sistema falhou em apenas um dezes (OBANDA, 2017).

Ao realizar a comparação entre o resultado alcançado no último trabalho citado e aquele que foi obtido no estudo desenvolvido na presente dissertação, é possível perceber que, muito embora tenha sido considerado somente um par de estados definidos para cada variável observada na pesquisa, obteve-se uma redução considerável no número de avaliações equivocadas por parte do SDI quando se empregou a estratégia de *machine learning* chamada de árvore de decisão, de tal maneira que foi atingido um nível de assertividade em torno de 94%, detectando-se o incêndio em patamar satisfatório perante o cenário estudado, além de apresentar um ótimo tempo de resposta perante o sinistro, conseguindo ser mais rápido na detecção que tecnologias já consolidadas, a exemplo do *sprinkler*.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 PRINCIPAIS AVANÇOS

Ao final desta pesquisa, verificou-se que o uso de água pluvial para composição da RTI de Prédio do PRODEMA mostrou ser algo recomendado, desde que sejam tomadas as devidas medidas para garantir permanentemente a manutenção do nível da RTI, como por exemplo a implementação de um sistema integrado de reservatórios, conforme sugerido nos resultados. O emprego de reservatório principal e secundário se justifica, pois em um mês de poucas chuvas, inserido em um ano de inóxia de água pluvial, a média diária de volume de água acumulada é de 2,41 m<sup>3</sup>, volume este correspondente a 48,2% da necessidade de água da RTI para o caso de sistema de hidrantes do tipo 1 (5m<sup>3</sup>) e, aproximadamente, 24,1% da quantidade de água necessária à RTI com sistema de hidrantes do tipo 2 (10 m<sup>3</sup>).

Quanto ao fornecimento de energia elétrica ao SDI através do SHGE/EF, para a modelagem e condições estabelecidas, notou-se que são necessários uma corrente de 0,186 A, sob uma tensão de 9V, para que o sistema permaneça ativo, resultando numa potência média de 1,67 W, e um consumo diário de 40,2 Wh. Em contrapartida, para o mês de menor produção energética por parte de SHGE/EF, segundo série histórica entre 2015 a 2020 contida no banco de dados na base de sensoriamento remoto TERRACLIMATE, este sistema é capaz de gerar energia a uma potência de 14,69 W durante 12 horas por dia, o que resulta numa produção diária de 176,34 Wh. Observando os resultados, nota-se que a quantidade de energia gerada é mais de quatro vezes maior que a energia demandada, sendo possível afirmar que a energia produzida pelo SHGE/EF é suficiente para manter o sistema em funcionamento, contanto que devidamente armazenada em sistemas de baterias.

Acerca do SDI constituído, pode-se afirmar que foram obtidos bons resultados na ação de detecção de incêndios envolvendo a queima de MDF e papel. Este sistema foi capaz de identificar o incêndio em um período em torno de 20s após o início do mesmo ser observado, sendo este intervalo de tempo bem inferior ao utilizado pelo *sprinkler* de ampola vermelha para detecção do sinistro, período este que foi de mais de 3 minutos a partir do início da percepção visual do incêndio. Em relação à estratégia de solução que oferece menor nível de incerteza na identificação do estado de incêndio ou não incêndio, foi empregado o método de árvore de decisão, o qual permitiu que se chegasse a um nível de acurácia de 94%.

## 5.2 FATORES LIMITANTES

Dentre as principais limitações enfrentadas durante a pesquisa, pode-se falar, inicialmente, da falta de acesso aos espaços da universidade entre os meses de abril de 2020 e maio de 2021, o que dificultou e inviabilizou a realização de certas atividades experimentais feitas nas dependências da instituição, provocando atrasos no cumprimento de etapas, já que houve redução de horas disponíveis para realização das tarefas, sendo feitas adequações para que fosse possível atender aos objetivos da pesquisa. Somou-se às causas de atrasos a demora no recebimento de artigos comprados para realização dos experimentos, advindos de outros entes federativos e países no período da pandemia.

Foi também fator limitante neste trabalho o reduzido nível de precisão da estimativa de volume de água pluvial a ser coletada para RTI e da produção energética destinada ao SDI, intrínseco aos equipamentos empregados nos processos de sensoriamento por satélite, os quais apresentam discrepância entre as informações por eles levantadas e os valores de referência acerca da pluviosidade, obtidos de forma direta em cada ponto considerado. Desta maneira, observa-se que por mais que se tome pontos distantes uns dos outros, em dados provenientes de sensoriamento por satélite, a variação média dos índices pluviométricos dentro de um município relativos a diferentes pontos é relativamente pequena e, portanto, precisará de aprofundamento para realização das adequações necessárias.

## 5.3 DESDOBRAMENTOS DA PESQUISA

Em razão da diversidade de assuntos no contexto desta pesquisa e devido à consequente ampliação e aprofundamento em temas a ela associados, foram feitas, paralelamente ao desenvolvimento deste trabalho, atividades que possibilitaram avanços em áreas afins. Dentre estas atividades, podemos destacar duas: o estabelecimento de um sistema de *datalogger* e a constituição de um sistema de detecção de fonte de calor – SDFC – com emprego de IoT.

O sistema de *datalogger* foi feito para efetuar medições de corrente e de tensão do SHGE/EF, e sua estruturação foi realizada em três etapas: (i) montagem do hardware composto por dispositivos eletrônicos, suportes e acessórios para estruturação física do Sistema de Aquisição de Dados – SAD (figura 59); (ii) estruturação de software para implementação da heurística do sistema de DATALOGGER; e (iii) montagem da instrumentação para realizações de medições acerca da geração de energia do SHGE/EF construído.

Os dispositivos eletrônicos foram conectados a uma *proto-board* que foi fixada, junto com o Arduino, a uma superfície plana de MDF, em formato retangular. O regulador de tensão e os sensores de corrente INA219 e de tensão foram fixados diretamente sobre o referido suporte (figura 59). O software foi desenvolvido na plataforma Arduino, estabelecendo limites de leitura a cada sensor, conforme previsto na configuração de cada um deles.

**Figura 59:** Instrumentação para testes com o SAD

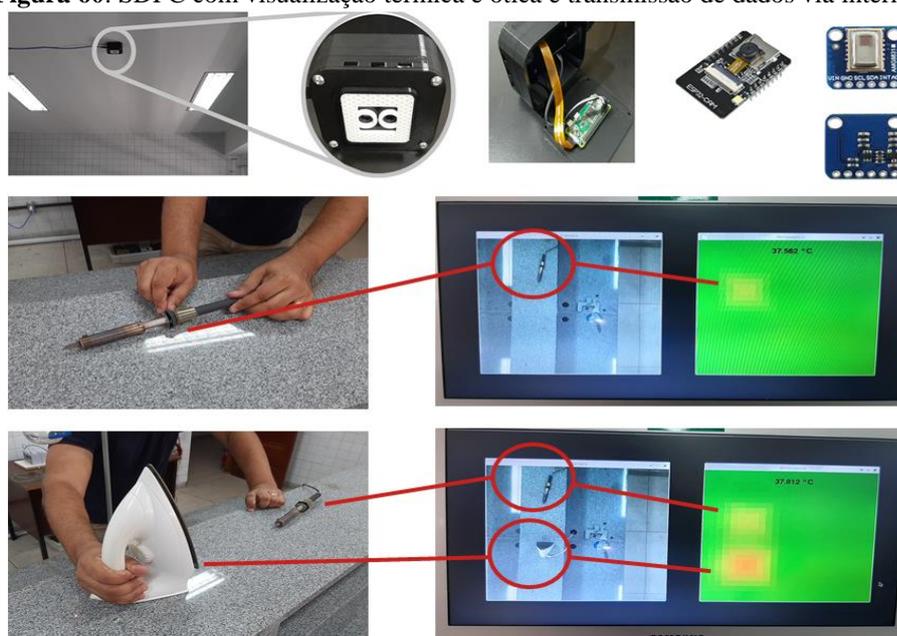


Fonte: Elaboração própria do autor, 2021

Embora tenham sido realizadas etapas referentes à calibragem dos sensores por meio de conferência de tensão e corrente neles registradas e os valores registrados no multímetro, além da realização de regulagem destes sensores, o SAD ainda não se encontra apto a efetuar de forma adequada as aferições para aquisição de dados referentes ao SHGE/EF. Contudo, a estruturação do SAD está em fase adiantada em seu processo de implementação e, quando estiver pronto, este sistema será importante para continuidade desta pesquisa, pois irá permitir a medição direta dos valores referentes às propriedades elétricas do SHGE/EF.

O SDFC com uso de tecnologia de IoT consiste num módulo composto por câmera VGA anexa a uma placa ESP 32 e sensor térmico AMG 8833, com propósito de visualizar e perceber no ambiente fontes de calor colocadas na área de varredura do sistema. Foram feitos testes preliminares com uso de um ferro de solda e um ferro elétrico, ambos conectados na tomada de energia e dispostos sobre a bancada central do laboratório do PRODEMA/UFPB. O compartimento com os dispositivos eletrônicos do SDFC foi colocado no teto, e através desse sistema, durante o aquecimento dos materiais, foi possível visualizar na tela do computador as imagens dos locais onde estavam as fontes de calor, variando entre as tonalidades amarela e vermelha, indo da primeira à segunda quanto mais aquecido estivesse o material (figura 60).

**Figura 60:** SDFC com visualização térmica e ótica e transmissão de dados via internet



Fonte: Elaboração própria do autor, 2021

Assim como o SAD, o SDFC está em fase inicial de testes, e o desenvolvimento dele será importante para a evolução do SDI ora proposto, pois em momentos mais avançados dos estudos poderão ser implementados ao SDFC os sensores usados no SDI, e pelo emprego da internet instituir comunicação entre sistema, usuários e central de informações, transformando o SDI em um sistema de detecção e monitoramento de incêndio (SDMI). Além disso, será possível fornecer funções de reconhecimento de objetos, de modo a dotá-lo de inteligência.

#### 5.4 PRÓXIMOS PASSOS

No que concerne às próximas medidas a serem adotadas para continuidade da pesquisa, recomenda-se o levantamento de informações contidas em bases de dados captados através de pluviômetros físicos instalados na região da Grande João Pessoa, por órgãos responsáveis pelo estabelecimento de estatísticas sobre o assunto, tais como a Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs) e a Agência Nacional das Águas (ANA), e a partir da análise da pluviosidade entre os anos de 2015 e 2020 estabelecer a estimativa pluviométrica da região.

Outra iniciativa importante é comparar os resultados obtidos em bases de dados advindos de pluviômetros físicos com aqueles oriundos de bases de dados de sensoriamento remoto por satélite. Mediante esta comparação, recomenda-se a identificação das discrepâncias e o emprego de ferramentas estatísticas para adequação dos dados. A seguir, pode-se constituir um pluviômetro de baixo custo para levantamento de dados pluviométricos e, por um período

mínimo de um ano, tabular os dados da coleta para traçar gráficos de precipitação de volume de água pluvial no local, organizando-os por semana, por mês e por ano. De posse destes dados, convém compará-los com aqueles já consolidados e, a partir desta comparação, realizar uma modelagem estatística para desenvolvimento de um software que seja capaz de fornecer a precipitação média de um ponto qualquer localizado na grande João Pessoa.

Quanto à parte de energia, é adequado estabelecer adaptações ao aerogerador, de modo que torne viável seu uso no SHGE/EF, visto que produziu energia com eficiência extremamente baixa, necessitando, portanto, da implementação de melhorias. Outra sugestão consiste no estudo do melhoramento da instrumentação de captação energética, a partir do rastreamento do fluxo de carga no sistema, com montagem de três conjuntos de sensores, sendo um entre a carga e o controlador, um entre a placa e o controlador e um entre o controlador e as baterias, de modo que seja possível variar as condições de trabalho e se encontrar os parâmetros mais adequados para maximização do aproveitamento da energia fornecida pela placa e pelo aerogerador.

Em relação ao SDI, sugere-se o aumento da quantidade de testes para cada material e do número de materiais testados, para se verificar a sensibilidade dos sensores diante dos mais diversos produtos da combustão provenientes da queima daqueles materiais mais comumente usados nas edificações. É importante ainda que se procure otimizar a programação pela qual é feita a análise de dados captados pelos sensores, inclusive com implementação de lógica *fizer* e rede neural, à medida que o processo for ficando mais denso e robusto.

Ainda no contexto da constituição do SDI, é preciso trabalhar no sentido de melhorar a estabilidade do circuito pela adequação dos sensores, de modo a ser desenvolvida uma prototipagem mais apurada e compacta, otimizando os itens eletrônicos do SDI. É preciso ainda estabelecer um estudo para implementação do IoT, para que, em atividade conjunta com o microcontrolador, seja possível transferir os dados obtidos pelos sensores para uma central de controle e para o usuário do serviço, pela utilização da *internet*, e por meio de imagens térmicas e visuais estabelecer o acompanhamento remoto do ambiente em tempo real.

A área em estudo se encontra em plena ascensão na comunidade científica e envolve duas questões intensamente discutidas no seio da sociedade, que são a necessidade de se fazer uso de recursos renováveis em substituição àqueles que não são renováveis e a utilização de IoT para automação de processos realizados em objetos e dispositivos utilizados no cotidiano. Assim sendo, a continuação desta pesquisa é algo viável e necessário, constituindo-se como importante fomento ao desenvolvimento de produtos que sejam eficientes e sustentáveis na área de segurança contra incêndio em edificações urbanas.

## REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, J. T. et al. **TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015**. Scientific data, v. 5, p. 170191-170191, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Água no mundo: situação da água no mundo**. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/agua-no-mundo>>. Acesso em: 04 mai. 19.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. 2020. In: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/23-estimativas-de-eva-potranspiracao-real-por-sensoriamento-remoto/view>>. Acesso em: 10 jun. 21.

ALPAYDIN, E. **Introduction to Machine Learning**. 4ª ed. Cambridge: MIT Press, 2020. 712 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Grupo setorial de sistema de detecção e alarme de incêndios**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/externas/54a-legislatura/tragedia-em-santa-maria-rs/reunioes-1/audiencias-publicas/apresentacao-abinee>>. Acesso em: 21 jul. 21.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.714 – Sistemas de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 25 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.527 – Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 14 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16.400 – Chuveiros automáticos para controle e supressão de incêndios — Especificações e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018. 78 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.626 – Sistemas Prediais de água fria e de água quente – projeto, execução, operação e manutenção**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 56 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16.981– Proteção contra incêndio em áreas de armazenamento em geral, por meio de sistemas de chuveiros automáticos - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 240 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 17.240 – Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 54 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.897 – Sistemas de proteção contra incêndio por chuveiros automáticos – requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 118 p.

ATMEL CORPORATION. **8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash**: Datasheet. 2015. 294 p.

BAGDADDE, A. H.; ZHANG, L. **Electrical power crisis solution by the developing renewable energy based power generation expansion**. In: 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, 2019, Okinawa. Energy Reports, v. 6, n. 2, p. 480-490, 2020.

BARRETT, E. C.; MARTIN, D. W. **The use of satellite data in rainfall monitoring**. London: Academic Press, 1981, 340 p.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 528 p.

BAUDRILLARD, J. **A sociedade de consumo**. Lisboa: Edições 70, 1995. 213 p.

BEAUDOING, H.; RODELL, M.; NASA/GSFC/HSL. **GLDAS Noah Land Surface Model L4 3 hourly 0.25 x 0.25 degree V2.1 (GLDAS\_NOAH025\_3H)**. In: Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2020a. Disponível em: <[https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS\\_NOAH025\\_3H\\_2.1/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_NOAH025_3H_2.1/summary)>. Acesso em: 20 abr. 21.

BELMEZITI, A.; COUTARD, O., de GOUVELLO, B. **How much drinking water can be saved by using rainwater harvesting on a large urban area? Application to Paris Agglomeration**. Water Science & Technology, v. 70, n. 11, p. 1782-1788, 2014.

BRASIL. Entenda como a matriz elétrica brasileira está mudando: Usinas híbridas, que utilizam mais de um tipo de fonte de geração de energia elétrica, têm ganhado espaço. **Governo Federal**, Brasília, Brasil. Energia Elétrica. 30 ago. 21. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/entenda-como-a-matriz-eletrica-brasileira-esta-mudando>>. Acesso em: 06 set. 21.

BRAYLEY, A. W. **A Complete History Of The Boston Fire Department**: Including The fire-alarm Service and the Protective Department, from 1630 to 1888, v. 1. Charleston: Nabu Press, 2011.

BRENTANO, Telmo. **A proteção contra incêndios no projeto de edificações**. 3ª ed. Porto Alegre: Gráfica EPECÊ, 2015. 640 p.

BRIGADE DE SAPEURS-POMPIERS DE PARIS. **Historique**. Disponível em: <<https://www.pompiersparis.fr/fr/presentation/historique>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

CALVETTI, L; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. **Integração do radar meteorológico doppler do SIMEPAR e uma rede de pluviômetros para a estimativa da precipitação**. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte. p. 1137-1144. Anais. São José dos Campos: INPE, 2003.

CASTRO, R. M. G. **Energias renováveis e produção descentralizada**: introdução à energia eólica. 4ª ed. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2009. 94 p.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013. 1107 p.

CHAPMAN, S. J. **Programação em MATLAB para engenheiros**. 3<sup>a</sup> ed. Boston: Cengage Learning, 2016. 632 p.

CINCINNATI FIRE MUSEUM. **Cincinnati's Firefighting History**. Disponível em: <<https://www.cincyfiremuseum.com/explore-the-museum/history/>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

COLOMBELLI, A.; GHISSETTI, C.; QUATRARO, F. **Green technologies and firms' market value: a micro-econometric analysis of European firms**. *Industrial and Corporate Change*, v. 29, n. 3, p. 855–875, 2020.

COLOMBO, L. O. R.; FAVOTO, T. B.; CARMO, S. N. **A evolução da sociedade de consumo**. *Akrópolis*, v. 16, n. 3, p. 143-149, 2008.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **About CEN**. Disponível em: <<https://www.cencenelec.eu/about-cen/>>. Acesso em: 18 jan. 2022.

COOK, E. F. **Man, energy, society**. Estados Unidos: W. H. Freeman, 1976. 478 p.

COOMBES P.J.; ARGUE J.R.; KUCZERA G. **Figtree place: a case study in water sensitive urban development (WSUD)**. *Urban Water*, v. 1, n. 4, p. 335-343, 2000.

CUPERTINO, A. F. **Desenvolvimento de um Simulador de Módulos Fotovoltaicos para Testes de Conversores Estáticos**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A2ZNYP>>. Acesso em: 20 mai. 2021.

DASTBAZ, M.; PATTINSON, C.; AKHGAR, B. **Green Information Technology: A Sustainable Approach**. 1<sup>a</sup> Ed. Burlington: Morgan Kaufmann Books, 2015, 348 p.

DEWITT, W. E. **Compreendendo dispositivos de detecção de fogo**. Técnica segurança em Risco. Disponível em: <<http://www.risco.com.br/Boletins/Compreendendo-Dispositivos-de-Deteccao-de-Fogo.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

DOMENECH, L.; SAURÍ, D. **A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona: social experience, drinking water savings and economic costs**. *Journal Cleaner Production*, v. 19, n. 6-7, p. 598-608, 2011.

DOSHI, Vidhi. Fire guts delhis natural history museum. **The Guardian**, Nova Deli, Índia, 26 abr. 2016. News. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/world/2016/apr/26/massive-fire-guts-delhis-natural-history-museum>>. Acesso em: 15 mai. 2020.

DUPONT, E.; KOPPELAAR, R.; JEANMART, H. **Global Available Wind Energy with Physical and Energy Return on Investment Constraints**. *Applied Energy*, v. 209, Pages 322-338, 2017.

EVERSTINE, C. N. **The Establishment of Legislative Power in Maryland**. Maryland Law Review, v. 12, n. 2., Spring, 1951.

FAHRENBRUCH, A. L.; BUBE, R. H. **Fundamentals of Solar Cells**. 1ª ed. London: Academic Press, 1983.

FIORAVANTI, Carlos. **A provável origem das chamas**: Laudo aponta sobrecarga em ar-condicionado e falhas do sistema elétrico como causas do incêndio do Museu Nacional. Revista Pesquisa Fapesp, ed. 279, 2019. Disponível em: <[https://revista.pesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2019/05/057\\_mn\\_279.pdf](https://revista.pesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2019/05/057_mn_279.pdf)>. Acesso em: 15 mai. 2020.

FMAPPROVALS. **HISTORY**: More Than a Century of Technical Integrity. Disponível: <<https://www.cencenelec.eu/about-cen/>>. Acesso em: 12 mai. 2020.

FORTMANN J. **Modeling of Wind Turbines with Doubly Fed Generator System**. Duisburg: Springer Vieweg Verla, 2015.

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DO CONTESTADO. **O Corpo de Bombeiros da Polícia do Estado de Santa Catarina e Legislação pertinente**. Apostila do curso de Pós-Graduação lato Sensu em Engenharia de Segurança do trabalho, disciplina de proteção contra incêndios, Florianópolis, 1999.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6ª ed. Recife: Atlas, 2008. 200 p.

GLOBAL AMÉRICA. **Detector de fumaça linear por feixe óptico**. Disponível em: <<https://globalamerica.com.br/detector-de-fumaca-por-feixe-optico/>>. Acesso em: 24 abr. 2021.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Country Trends**. Disponível em: <<https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCtot,EFctot>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Glossary**. Disponível em: <<https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

GODFREY, A. **An Account of the new Method of Extinguishing Fires by Explosion and Suffocation**. Introduced by Ambrose Godfrey of Covent-Garden, Chymist. ... By the Introducer. Print Editions. Farmington Hills: Gale ECCO, 2018. 60 p.

GOGONEA, R. M.; GUITA, S. I.; SASEANU, A. S. **Biocapacity—Premise of Sustainable Development in the European Space**. Sustainability, v.12, n. 3, p.1037, 2020.

GOLLNER, M.; KIMBALL, A.; VECCHIARELLI, T. **Fire Safety Design and Sustainable Buildings**: Challenges and Opportunities Report of a National Symposium. Courtyard Marriott – Magnificent Mile, Chicago, Illinois. National Fire Protection Association, 2012.

GOOGLE MAPS. **Imagem de satélite do Prédio do Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba**. João Pessoa, Brasil, 2021. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/place/PRODEMA/@-7.1396502,-34.8448797,949m/data=>

!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7acc2b97e426991:0x9a01949e16480b5!8m2!3d-7.1399669!4d-34.8443781>. Acesso em: 18 set. 21.

GOOGLE MAPS. **Imagem de satélite do prédio do Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba.** Disponível em: <<https://www.google.com/maps/place/PRODEMA/@7.1394985,34.8487474,1899m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7acc2b97e426991:0x9a01949e16480b5!8m2!3d-7.1399669!4d-34.8443781>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

GRANT, C. C. **History of NFPA.** Disponível em: <<https://www.nfpa.org/About-NFPA/NFPA-overview/History-of-NFPA>>. Acesso em: 22 abr. 2020.

GROUP RAINDROPS. **Aproveitamento da Água de Chuva.** 1ª Ed. Curitiba: Organic Trading, 2002.

HAFEZI, P. Al menos 20 bomberos mueren por derrumbe de edificio en Teherán. **Reuters.** Ankara, Turquia, 19 jan. 2017. Noticias Principales. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/iran-desastre-idESKBN1532MY>>. Acesso em: 27 ago. 2021.

HANWEI ELETRONICS GROUP CORPORATION. **Technical data MQ-2 gas sensor.** Datasheet. [201-?]. 3 p.

HECKTHEUER, L. A. **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos.** 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2125/000314640.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 03 abr. 2020.

HERRMANN, T.; SCHMIDA, U. **Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects.** Urban Water, v. 1, n. 4, p. 307-316, 2000.

HOGAN, M. J. **The Marshall Plan: America, Britain and the reconstruction of western Europe, 1947-1952.** 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 500 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Sobre meteorologia – Instrumentos meteorológicos. Disponível: <[https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia#:~:text=Pluvi%C3%B3grafo%20%2D%20Registra%20a%20quantidade%20de,modo%20indireto%20%2D%20em%20porcentagem%20\(%25\).](https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia#:~:text=Pluvi%C3%B3grafo%20%2D%20Registra%20a%20quantidade%20de,modo%20indireto%20%2D%20em%20porcentagem%20(%25).>)>. Acesso: 02 out. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **SINMETRO - Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.** Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/inmetro/sinmetro.asp?iacao=imprimir>>. Acesso: 26 jun. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **About us.** Disponível em: <<https://www.iso.org/about-us.html>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** 2ª ed. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

KIPPER, F. D.; GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. **Análise de variação dos coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos com a irradiância**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado. Anais. Gramado: ABES, 2018.

KIRKPATRICK, D. D.; HAKIM, D.; GLANZ, J. Why Grenfell Tower Burned: Regulators Put Cost Before Safety. **The New York Times**, Londres, Inglaterra, 24 jun. 2017. World. Disponível em: < <https://www.nytimes.com/2017/06/24/world/europe/grenfell-tower-london-fire.html>>. Acesso em: 18 mai. 2020.

LABELLAPANSA, A. et al. **Prototype for early detection of fire hazards using fuzzy logic approach and Arduino microcontroller**. International Journal of Advanced Computer Research, v. 9, n. 44, 2019.

LETCHER, T.; FTHENAKIS, V. M. **A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems**. 1ª ed. London: Academic Press, 2018. 540 p.

LIMA, A. C. O. RESSUREIÇÃO, K. R. F. **Edificações com sistema de águas pluviais: Um estudo de caso**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, ed. 11, v. 06, p. 134 -153. Nov. 2018. ISSN:2448-0959

LUMENS ENGENHARIA. **Memorial descritivo de sistemas eletrônicos equipamentos ativos de rede – Estádio Independência**. Projeto LE – 833. Belo Horizonte: Lumens, 2011.

LUTAKAMALE, A. S.; KAIJAGE, S. **Wildfire Monitoring and Detection System Using Wireless Sensor Network: A Case Study of Tanzania**. Wireless Sensor Network, v. 9, p. 274-289, 2017.

MACHADO, C. C. C. *et al.* **Distúrbio ondulatório de leste como condicionante a eventos extremos de precipitação em Pernambuco**. Revista Brasileira de Climatologia. Ano 08, v. 11, p. 146-188, Jul/Dez 2012.

MAGNONI, P. H. J. **Estimativa de recarga de águas subterrâneas por Sensoriamento remoto e computação em nuvem**. 100 p. Dissertação. (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020. Disponível em: < [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/194259/magnoni\\_phj\\_me\\_botfca.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/194259/magnoni_phj_me_botfca.pdf?sequence=5&isAllowed=y)>. Acesso em: 04 ago. 2021.

MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados**. São Paulo: Editora Novatec, 2005. 263 p.

MASON, C. **A short history of asia**. 3ª ed. New York: Red Globe Press, 2014. 360 p.

MAXFIELD, V. A. **The Military Decorations of the Roman Army**. 1ª ed. v. 1. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1981. 304 p.

MAY, S.; PRADO, R. T. A. **Estudo da Qualidade da Água de Chuva para Consumo Não Potável em Edificações**. CLACS' 04 – I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e ENTAC 04, – 10º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo. Anais. São Paulo, 2004.

MCNALLY, A. *et al.* **A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications**. Scientific data, v. 4, n. 1, p. 1-19, 2017.

MCNALLY, A.; NASA/GSFC/HSLFLDAS. **Noah Land Surface Model L4 Global Monthly 0.1 x 0.1 degree (MERRA-2 and CHIRPS)**. Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2018. Disponível em: <[https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/FLDAS\\_NOAH01\\_C\\_GL\\_M\\_001/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/FLDAS_NOAH01_C_GL_M_001/summary)>. Acesso em: 18 mai. 21.

MCNALLY, A. *et al.* **Acute Water-Scarcity Monitoring for Africa**. Water, v. 11, n. 10, p. 1968, 2019.

MENDONÇA, A.; ZELENOVSKY, R. **Arduíno: Guia avançado para projetos**. Nova Ed. Interciência, 2019. 548 p.

MENEZES, J. **O corpo de bombeiros no Pará**. 2ª ed. Belém: Corpo de Bombeiros Militar do Pará, 2007. 315 p.

MENEZES JUNIOR, R. A.; SANTOS, M. O.; REIS, I. A. O. **Estudo da produção energética de um sistema de energia híbrida eólico fotovoltaico utilizando modelos de previsão de potência a partir de dados de imageamento geoespacial da earth engine platform**. Contribuições ao uso, conservação e gestão dos recursos naturais. 1ª ed. v. 1. p. 159-180. João Pessoa: Editora UFPB, 2020.

MICROELECTRONIC INTEGRATED SYSTEMS – MELEXIS. **MLX90614 family Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39**. 2007. 40 p.

MODERN MASONRY. **The Great Fire of London: a step change for concrete and masonry**. In: \_\_\_\_\_. (org), News & Events, Reino Unido, 03 ago. 2016. Disponível em: <<https://www.modernmasonry.co.uk/MMA/News-Events/2016/The-Great-Fire-of-London-a-step-change-for-concre>>. Acesso em: 23 abr. 2020.

MOL, J. M. D. **Estimativa de precipitação por meio de sensoriamento remoto**. 88 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília, Brasília, 2005. Disponível em: <<http://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/03/JulianaMaria.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

MOTOROLA. **Low offset voltage dual comparator: LM393, LM393A, LM293, LM2903, LM2903V**. 1996. 6 p.

MUENCHEN, J. D. **Uma proposta de detecção de incêndio utilizando o protocolo MQTT para aplicações IoT**. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018.

NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. **Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: métodos e benefícios ambientais**. XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência. Anais. Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Fundamentals of Fire Fighter Skills**. 4ª ed. Sudbury, EUA: Jones and Bartlett PubliSHGE/EFrs, 2018. 1118 p.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 13 – Standard for the Installation of Sprinkler Systems**. EUA: NFPA, 2019.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 72 – National Fire Alarm and Signaling Code**. EUA: NFPA, 2019.

NEGRISSELO, W. *et al.* **Fundamentos de segurança contra incêndio em edificações: Proteção ativa e passiva**. FUNDABOM. 1ª ed. São Paulo: FIREK Educação, 2019. 276p.

NEVES, M. V.; BERTOLO, E.; ROSSA, S. **Aproveitamento e reutilização da água para usos domésticos**. In: 1ª Jornada de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, 2006, Porto. Anais. Porto: FEUP, 2006.

NEWTECH, I. Energia Solar Fotovoltaica: a revolução energética já começou no Brasil. **Portal solar**. São Paulo, Brasil. 10 jan. 16. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-a-revolucao-energetica-ja-comecou-no-brasil.html>>. Acesso em: 12 ago. 21.

NINGBO OSDA SOLAR. **330W Poly solar panel**. Manual. 1 p.

OBANDA, Z. S. **A Multi-sensor fire detection system using an Arduino Uno microcontroller**. 92 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Informação). Strathmore University, Nairobi, 2017. Disponível em: < <https://su-plus.strathmore.edu/bitstream/handle/11071/5686/Multi-sensor%20fire%20detection%20system%20using%20an%20Arduino%20Uno%20microcontroller%20%282%29.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 jan. 2021.

OELZE, S. Notre-Dame, um ano após o incêndio. **Deutsche Welle**, Alemanha, 15 abr. 2020. Cultura. Disponível em: <<https://p.dw.com/p/3auce>>. Acesso em: 15 mai. 2020.

OKADA, H. K. R.; NEVES, A. R. N.; SHITSUKA, R. **Analysis of Decision Tree Induction Algorithms**. Research, Society and Development, v. 8, n. 11, p. 01-15, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Agenda 21. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Rio +20. Documento: o Futuro que queremos. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **Declaração de Estocolmo sobre o Meio Ambiente Humano**. In: Anais Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano. Estocolmo, 1972.

\_\_\_\_\_. **Relatório sobre a Situação da População Mundial 2011: pessoas e possibilidades em um mundo de 7 bilhões**. Fundo de População das Nações Unidas, 2011.

\_\_\_\_\_. **Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Nosso Futuro Comum**. Transmitido à Assembleia Geral da ONU como um anexo ao

documento A/42/427 – Desenvolvimento e Cooperação Internacional para o Meio Ambiente, Editora: Oxford University Press, 1987.

\_\_\_\_\_. **World Population Prospects: The 2014 Revision.** Department of Economic and Social Affairs. New York: United Nations, 2015

PALA, G. K. *et al.* **Rainwater harvesting – A review on conservation, creation & cost-effectiveness.** Materials Today: Proceedings, v. 45, parte 7, p. 6576-6571, 2021.

PICOLO, A. P.; BÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. **Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 4, 4306-1 a 4306-13, 2014.

PARANÁ. **Plano diretor de drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba.** Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Versão 1.0, 2002. 150 p.

PARAÍBA. **Norma técnica nº 004/2013 – CBMPB.** Classificação das Edificações quanto à Natureza da Ocupação, Altura, Carga de Incêndio e Área Construída. Disponível em: <<https://bombeiros.pb.gov.br/wp-content/uploads/2013/10/NT-n%C2%BA-0042013-CBMPB.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 21.

PARAÍBA. **Norma técnica nº 015/2016 – CBMPB.** Sistemas de hidrantes e mangotinhos. Corpo de Bombeiros Militar da Paraíba, Disponível em: <<https://bombeiros.pb.gov.br/wp-content/uploads/2016/10/NT-CBMPB-n%C2%BA-015-2016-SISTEMAS-DE-HIDRANTES-E-MANGOTINHOS.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 21.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014.

PINTO, E. M. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira.** 2001. 156 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-19052006-114716/publico/CapaA.pdf>>. Acesso em: 30 dez. 2020.

PIRENNE, H. **Economic and Social History of Medieval Europe.** Edição Ilustrada. Eastford: Martino Fine Books, 2014. 256 p.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho científico.** 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 276 p.

QUICK RESPONSE FIRE SUPPLY. **About us.** Disponível: <<https://www.qrfs.com/about-us/#:~:text=QRFS%20was%20founded%20in%202010,they%20need%2C%20quickly%20and%20affordably>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

RASHID, R. I.; RAFID, S. M. **An Automated Fire Suppression Mechanism Controlled Using an Arduino.** Tese de Bacharelado do Curso de Ciência em Engenharia Elétrica e Eletrônica da BRAC University. Dhaka, 2017.

REN21. **Renewables 21**: global status report. Disponível em: < [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf) >. Acesso em: 08 jul. 2021.

RICHARDSON, J. **History of Fire Protection Engineering**. 3ª ed. Bethesda: NFPA, 2003. 293 p.

RITCHIE, H.; ROSE, M. **Urbanization**. Publicado online por Our World In Data, 2018. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/urbanization#what-share-of-people-will-live-in-urban-areas-in-the-future>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

ROBERTSON, G. **Postponin Alexandria Dealing with catastrophes and disasters in your library**. In: \_\_\_\_\_. (org.). Robertson on Library Security and Disaster Planning. 1ª ed, p. 137-139, Chandos Publishing Books, 2016.

RODELL, M. et al. **The global land data assimilation system**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 85, n. 3, p. 381-394, 2004.

ROSENBERG, M. Largest Cities Throughout History. **ThoughtCo**, Estados Unidos, 04 nov. 2019. Humanities. Geography. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/largest-cities-throughout-history-4068071>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**, Global Edition. 4ª ed. Londres: Pearson Education, 2021. 1170 p.

SALVADOR, M. A.; MADEIRA, A. P.G. **A História do Corpo de Bombeiros de Juiz de Fora**. Juiz de Fora: Funalfa Edições, 2008.

SCHOFIELD, J. **St Paul's Cathedral: archaeology and history**. 1ª Ed. Barnsley: Oxbow Books, 2016. 209 p.

SCHUTZ, J. A. **Legislators Of The Massachusetts General Court, 1691-1780: A Biographical Dictionary**. 1ª ed. Boston: Northeastern University Press, 1997. 608 p.

SCOFIELD, R.A.; KULIGOWSKI, R.J. **Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events**. Weather and Forecasting, v. 18, n. 6, p.1037 -1051, 2003.

SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra Incêndios no Brasil**. 1ª ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496 p.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Combining remotely sensed actual evapotranspiration and GIS analysis for groundwater level modeling. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 15, p. 462, 2019a.

SILVA, J. M.; BRAGANÇA, L.; COELHO, A.L. **A Segurança Contra Incêndios em Edifícios e a Sustentabilidade**. In: Workshop on Sustainable Construction and Rehabilitation. Portugal. Guimarães, 2014.

SILVA, V. P. **Segurança Contra Incêndio em Edifícios: Considerações para o Projeto de Arquitetura**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2014. 15 p.

SILVA, F. S. C.; FINGER, M.; MELO, A. C. V. **Lógica para programação**. 2ª ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

SILVEIRA, G.; BULLOCK, B. **Machine Learning**: Introdução à classificação. São Paulo: Casa do Código, 2017. 637 p.

SLOOTWEG, J.G. POLINDER, H.; KLING W. L. **Dynamic modeling of wind turbine with doubly fed induction generator**. IEEE Xplore, v. 1, p.644-649, 2001.

SOTO, W. D.; KLEIN, S.; BECKMAN, W. **Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance**. Solar Energy, v. 80, n. 1, p. 78–88, 2006.

SOUZA, J. **Lógica para ciência da computação**: Uma introdução concisa. 2ª ed. Amsterdã: Elsevier, 2008. 240 p.

SZWARCFITER, J. L.; MARKENZON, L. **Estruturas de Dados e Seus Algoritmos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 320 p.

TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. **Sistemas digitais**: princípios e aplicações. 11ª ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2011.

UNDERWRITERS LABORATORIES. **Nossa missão**: trabalhando por um mundo mais seguro. Disponível em: <<https://latam.ul.com/pt-br/sobre-a-ul/nossa-missao>>. Acesso em 30 jun. 2020.

U.S. CENSUS BUREAU. **Global population profile**: 2002. International Population Reports WP/02. Washington: Government Printing Office, 2004.

VAZ, J. C. M. **Análise das ondas de leste sobre a costa leste do nordeste do brasil para o período entre 1999-2009**. 88 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/16568814-Universidade-federal-do-rio-de-janeiro-analise-das-ondas-de-leste-sobre-a-costa-leste-do-nordeste-do-brasil-para-o-periodo-entre-1999-2009.html>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

VIEIRA, C.; MORAIS, V. **MATLAB®**: curso completo. 1ª ed. Lisboa: FCA, 2013. 664 p.

WARD, M. J. **Fire Officer: Principles and Practice**. IAFC – NFPA. 4ª ed. Sudbury, EUA: Jones and Bartlett PubliSHGE/EFrs, 2020. 550 p.

WATSON, A. **The Digest of Justinian**. Edição revisada. v. 1. University of Pennsylvania Press, 2009. 768 p.

WORLD DATA LAB. **Making everyone count**. Disponível em: <<https://worlddata.io/>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE BRASIL. **A Pegada Ecológica da cidade de Natal**. Brasília: WWF-Brasil, 2015.

ZAIZEN, M. et al. **The collection of rainwater from dome stadiums in Japan**. Urban Water, v. 1, n. 4, p. 335-359, 2000.