



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

BRUNO GAVINHO SERDEIRA

**Proposta de Sistema Embarcado para
Monitoramento de Sistemas de Iluminação
Pública**

NITERÓI
(Novembro/2024)

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

BRUNO GAVINHO SERDEIRA

**Proposta de Sistema Embarcado para Monitoramento de
Sistemas de Iluminação Pública**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Felipe Sass

NITERÓI
(Novembro/2024)

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S481p Serdeira, Bruno Gavinho
Proposta de Sistema Embarcado para Monitoramento de Sistemas
de Iluminação Pública / Bruno Gavinho Serdeira. - 2024.
162 p.: il.

Orientador: Felipe Sass.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2024.

1. Iluminação pública. 2. Monitoramento. 3. LED. 4. IoT.
5. Produção intelectual. I. Sass, Felipe, orientador. II.
Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III.
Título.

CDD - XXX

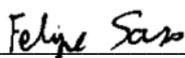
BRUNO GAVINHO SERDEIRA

PROPOSTA DE SISTEMA EMBARCADO PARA MONITORAMENTO DE SISTEMAS
DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

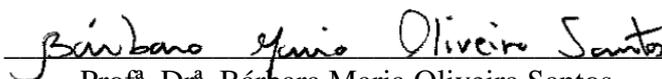
BANCA EXAMINADORA



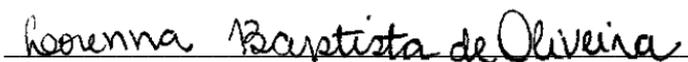
Prof. Dr. Felipe Sass – Orientador
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof^a. Dr^a. Bárbara Maria Oliveira Santos
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ



Dr^a. Lorena Baptista de Oliveira

Niterói
(Novembro/2024)

Dedico este trabalho aos meus pais, cuja fé e apoio inabalável foram o combustível que me impulsionou ao longo da minha jornada.

Agradecimentos

Primeiramente à minha família, pela compreensão, paciência, confiança e por todo apoio durante minha trajetória.

À Neoenergia, pelo suporte e patrocínio, por meio do Programa Bercas, que foi essencial para a realização deste trabalho.

A todos que conheci na equipe do LabLux – UFF, por todo o suporte dado e por proporcionar um ambiente para a realização deste trabalho.

Ao NITEE, por proporcionar um ambiente para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Alan Lopes Pombo, pela assistência no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Bruno Costa de Matos, por toda ajuda e conhecimento transmitido.

Ao professor e orientador Felipe Sass, pelo auxílio prestado sempre que necessário, tornando possível o desenvolvimento deste trabalho.

Por último, à UFF como instituição de ensino, por proporcionar um ambiente de crescimento e aprendizado que foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Com os avanços tecnológicos na área de iluminação, a tecnologia LED tomou protagonismo no cenário internacional devido a sua alta eficiência energética e maior vida útil. Entretanto, assim como qualquer equipamento, essa tecnologia também está sujeita a falhas. A Internet das Coisas é uma tecnologia que permite, dentre outras coisas, a conexão de dispositivos de sensoriamento com as interfaces disponibilizadas para o usuário via rede, permitindo o monitoramento de diversos equipamentos. Como consequência, é possível uma resposta mais rápida dos entes responsáveis pela manutenção dos ativos de iluminação, uma vez que as tecnologias IoT permitem a visualização dos parâmetros monitorados em tempo real. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar os sistemas de iluminação pública no intuito de auxiliar as prefeituras e concessionárias quanto a manutenção destes ativos. Os dados obtidos serão enviados para a rede por meio do protocolo MQTT e devem ser apresentados ao usuário em formato de *dashboard* por meio do Node-RED. A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o sistema desenvolvido apresentou um desempenho satisfatório, demonstrando a capacidade de operar de forma independente e estável, havendo, assim, potencialidade de implementação para o monitoramento da iluminação pública. Além disso, o Node-RED se mostrou uma ótima ferramenta para a criação da interface e de notificações, proporcionando adaptabilidade e escalabilidade à proposta.

Palavras-chaves: Iluminação pública, monitoramento, LED, IoT, Arduino, MQTT, Node-RED.

Abstract

With advances in lighting technologies, LED equipment has gained international prominence due to its high energy efficiency and extended lifespan. However, like any equipment, this technology is also subject to failures. The Internet of Things is a technology that enables, among other things, the connection of sensors with interfaces made available to the user via a network, allowing the monitoring of various equipment. Consequently, a quicker response from entities responsible for maintaining lighting assets is possible, as IoT technologies allow the visualization of monitored parameters in real time. This work aims to develop a system capable of monitoring public lighting systems to support municipalities and utilities in the maintenance of these assets. Data will be transmitted to the network using the MQTT protocol and presented to the user in a dashboard format via Node-RED. The results indicate that the developed system performed satisfactorily, demonstrating the ability to operate independently and stably, highlighting its potential in public lighting monitoring. Additionally, Node-RED proved to be an excellent tool for interface and notification design, providing adaptability and scalability to the proposed solution.

Keywords: Public lighting; monitoring, LED, IoT, Arduino, MQTT, Node-RED.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO NA QUANTIDADE DE PONTOS DE IP A GÁS E A ENERGIA ELÉTRICA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (RJ) (DE 1857 A 1933).	9
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO NA QUANTIDADE DE PONTOS DE IP NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (RJ) (DE 1940 A 2022).	11
FIGURA 3 - COMPOSIÇÃO DO PARQUE DE IP DO RIO DE JANEIRO (RJ) REFERENTE AO ANO DE 2003.	14
FIGURA 4 - ATIVOS DE IP QUE FORAM TRANSFERIDOS PARA OS MUNICÍPIOS.	19
FIGURA 5 - CIRCUITOS EXCLUSIVOS DE IP.	19
FIGURA 6 - COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE IP BRASILEIRO NO PERÍODO DE 1995 A 2023.	22
FIGURA 7 - LÂMPADA VAPOR DE MERCÚRIO EM ALTA PRESSÃO.	23
FIGURA 8 - CIRCUITO TÍPICO PARA O FUNCIONAMENTO DE UMA LÂMPADA VAPOR DE MERCÚRIO.	24
FIGURA 9 - LÂMPADA LVS.	25
FIGURA 10 - CIRCUITO TÍPICO PARA O FUNCIONAMENTO DE UMA LVS.	25
FIGURA 11 - LÂMPADA LVM.	26
FIGURA 12 - CIRCUITOS TÍPICOS DE ACIONAMENTO DA LVM COM IGNITOR.	27
FIGURA 13 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM LED.	28
FIGURA 14 – TÉCNICA DE CONVERSÃO POR FÓSFORO UTILIZADO EM LÂMPADAS LED.	29
FIGURA 15 - ESQUEMA CONCEITUAL DA ESTRUTURA DE UM DRIVER.	30
FIGURA 16 - ESTRUTURA DE UMA LUMINÁRIA LED.	30
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO FLUXO LUMINOSO.	32
FIGURA 18 - ESPECTRO VISÍVEL AO OLHO HUMANO E AS CORES PERCEBIDAS.	33
FIGURA 19 - TEMPERATURA DE COR CORRELATA.	34
FIGURA 20 - ESPECTRO LUMINOSO TÍPICO DE UMA LÂMPADA VAPOR DE MERCÚRIO.	35
FIGURA 21 - ESPECTRO LUMINOSO TÍPICO DE UMA LVS.	36
FIGURA 22 - ESPECTRO LUMINOSO TÍPICO DE UMA LVM.	36
FIGURA 23 - ESPECTRO LUMINOSO TÍPICO DE UMA LUMINÁRIA LED.	36
FIGURA 24 - EXEMPLOS DE <i>RETROFIT</i> .	38
FIGURA 25 - ARQUITETURA DA IoT.	46
FIGURA 26 - COMPOSIÇÃO DA PLACA ARDUINO.	50
FIGURA 27 - COMPOSIÇÃO DO MÓDULO NODEMCU.	51
FIGURA 28 - COMPOSIÇÃO DO MÓDULO ESP-WROOM-32.	52
FIGURA 29 - COMPOSIÇÃO DO RASPBERRY PI MODELO B.	53
FIGURA 30 - ESQUEMÁTICO DO SISTEMA PROPOSTO PARA O MONITORAMENTO DA IP.	58
FIGURA 31 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO ENTRE O ARDUINO E O ESP-01 UTILIZANDO UM DIVISOR DE TENSÃO.	59
FIGURA 32 – ARQUITETURA <i>PUBLISH/SUBSCRIBE</i> .	64
FIGURA 33 - EXEMPLO DE HIERARQUIA BASEADA EM TÓPICOS.	64
FIGURA 34 – DO LADO ESQUERDO DA FIGURA O MÓDULO ZMPT101B UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO, DO LADO DIREITO O MÓDULO ACS758-50B UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DA CORRENTE.	66
FIGURA 35 - ESQUEMÁTICO DO SHIELD DESENVOLVIDO.	67
FIGURA 36 - MÓDULO DE AQUISIÇÃO DESENVOLVIDO, CONTENDO O SHIELD DESENVOLVIDO, O MÓDULO ZMPT101B (AZUL), O MÓDULO ACS758-50B (ROXO) E O ESP-01 (PRETO).	67
FIGURA 37 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A CALIBRAÇÃO.	71
FIGURA 38 - CONEXÕES REALIZADAS PARA O PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO.	71
FIGURA 39 - DEFASAGEM ENTRE OS SINAIS DOS MÓDULOS DE TENSÃO E CORRENTE.	72
FIGURA 40 - FLUXOGRAMA PARCIAL DESENVOLVIDO NO NODE-RED.	74
FIGURA 41 - <i>LAYOUT</i> DA INTERFACE GERADA PELO NODE-RED.	75
FIGURA 42 - NOTIFICAÇÃO GERADA NO DASHBOARD DO NODE-RED CASO A CORRENTE SEJA MAIOR QUE O VALOR MÍNIMO DEFINIDO DENTRO DO HORÁRIO PRÉ-ESTABELECIDO.	76

FIGURA 43 - NOTIFICAÇÃO GERADA NO DASHBOARD DO NODE-RED CASO A POTÊNCIA ATIVA SEJA MENOR QUE O VALOR DEFINIDO DENTRO DO HORÁRIO PRÉ-ESTABELECIDO.....	76
FIGURA 44 - DADOS SALVOS EM ARQUIVO .TXT A PARTIR DE FORMATAÇÃO NO NODE-RED.....	78
FIGURA 45 - CONEXÕES REALIZADAS PARA O TESTE DE ESCALABILIDADE.....	80
FIGURA 46 - CONEXÕES REALIZADAS PARA O TESTE DE ESCALABILIDADE.....	81
FIGURA 47 – ABAS PARA A SELEÇÃO DO SISTEMA A SER MONITORADO.....	87
FIGURA 48 - <i>DASHBOARD</i> REFERENTE A CARGA 1.....	87
FIGURA 49 - <i>DASHBOARD</i> REFERENTE A CARGA 2.....	88
FIGURA 50 - DADOS SALVOS EM ARQUIVO DE TEXTO REFERENTES A CARGA 1.....	89
FIGURA 51 - DADOS SALVOS EM ARQUIVO DE TEXTO REFERENTES A CARGA 2.....	89
FIGURA 52 - DADOS DO TESTE SALVOS EM ARQUIVO DE TEXTO.....	90
FIGURA 53 – <i>DASHBOARD</i> REFERENTE A ENSAIO.....	91
FIGURA 54 – EM DESTAQUE, TRECHO PERCORRIDO DE 13,3 KM DA BR-101.....	101
FIGURA 55 - LUMINÁRIAS DE TECNOLOGIA LVM COM DEFEITO.....	101
FIGURA 56 - LUMINÁRIAS DE TECNOLOGIA LVS COM DEFEITO.....	102
FIGURA 57 - LUMINÁRIAS DE TECNOLOGIA LED COM DEFEITO.....	103
FIGURA 58 - VERIFICAÇÃO DO <i>FIRMWARE</i> GRAVADO.....	105
FIGURA 59 - PERFIL DA TENSÃO FORNECIDA PELA FONTE EM 220V.....	135
FIGURA 60 - PERFIL DA TENSÃO FORNECIDA PELA FONTE EM 127V.....	136
FIGURA 61 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 1 EM 220V.....	136
FIGURA 62 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 1 EM 127V.....	137
FIGURA 63 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 2 EM 220V.....	137
FIGURA 64 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 2 EM 127V.....	138
FIGURA 65 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 3 EM 220V.....	139
FIGURA 66 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 3 EM 127V.....	140
FIGURA 67 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 4 EM 220V.....	141
FIGURA 68 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 4 EM 127V.....	141
FIGURA 69 - PERFIL DA TENSÃO FORNECIDA PELA REDE EM 220V.....	142
FIGURA 70 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 5 EM 220V NA PACIFIC 110-ADX.....	143
FIGURA 71 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 5 EM 220V NA REDE.....	144
FIGURA 72 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 6 EM 220V NA PACIFIC 110-ADX.....	145
FIGURA 73 - PERFIL DE CORRENTE DA CARGA 6 EM 220V NA REDE.....	145

Lista de Tabelas

TABELA 1 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO E DA TARIFA MÉDIA DE IP POR REGIÃO DE 2013 A 2022.	21
TABELA 2 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA.	31
TABELA 3 - FLUXO LUMINOSO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE IP.....	33
TABELA 4 - ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR EM DIFERENTES TECNOLOGIAS DE IP.	34
TABELA 5 - VIDA ÚTIL EM DIFERENTES TECNOLOGIAS DE IP.	37
TABELA 6 - FATOR DE POTÊNCIA E DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL EM TECNOLOGIAS DE IP.	37
TABELA 7 - COMPARATIVO DOS GASTOS MENSIS DAS TECNOLOGIAS DE IP (LUMINÁRIAS EQUIVALENTES EM RELAÇÃO AO FLUXO LUMINOSO).	39
TABELA 8 - PRINCIPAIS SUBSTITUIÇÕES DE POTÊNCIA PARA LÂMPADAS DE DESCARGA DE 250 W.	39
TABELA 9 - TAXA DE FALHA E CUSTO UNITÁRIO MÉDIO DE SUBSTITUIÇÃO DOS ATIVOS DE IP.	40
TABELA 10 - EFICIÊNCIA MÍNIMA POR POTÊNCIA DECLARADA EM LM/W PARA LÂMPADAS VAPOR DE SÓDIO.	41
TABELA 11 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA LUMINÁRIAS COM LÂMPADAS VAPOR DE SÓDIO.	41
TABELA 12 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA LUMINÁRIAS COM TECNOLOGIA LED.	42
TABELA 13 - LIMITE DAS CORRENTES HARMÔNICAS.	43
TABELA 14 – COMPARAÇÃO DAS PLATAFORMAS DE <i>HARDWARE</i>	53
TABELA 15 – COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO.	57
TABELA 16 - CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.	79
TABELA 17 - CARGAS UTILIZADAS.	82
TABELA 18 - ERRO RELATIVO DA TENSÃO MEDIDA.	83
TABELA 19 - ERRO RELATIVO DA CORRENTE MEDIDA.	83
TABELA 20 - ERRO RELATIVO DA POTÊNCIA ATIVA MEDIDA.	84
TABELA 21 - ERRO RELATIVO DA POTÊNCIA APARENTE MEDIDA.	84
TABELA 22 - ERRO RELATIVO DO FATOR DE POTÊNCIA MEDIDO.	85
TABELA 23 - CARGAS UTILIZADAS.	86
TABELA 24 - VALORES NOMINAIS DAS CARGAS ENSAIADAS EM 220 V.	86
TABELA 25 - MÉDIA DOS RESULTADOS OBTIDOS EM 220 V.	88
TABELA 26 - MÉDIA DOS RESULTADOS OBTIDOS.	91
TABELA 27 - PROJEÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE IP BRASILEIRO.	104
TABELA 28 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO DA FONTE.	135
TABELA 29 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE DA CARGA 1.	136
TABELA 30 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE DA CARGA 2.	138
TABELA 31 – ORDENS HARMÔNICAS DA CARGA 2 AVALIADAS PELA IEC 61000-3-2 [38].	138
TABELA 32 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE DA CARGA 3.	139
TABELA 33 - ORDENS HARMÔNICAS DA CARGA 3 AVALIADAS PELA IEC 61000-3-2 [38].	140
TABELA 34 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE DA CARGA 4.	141
TABELA 35 – ORDENS HARMÔNICAS DA CARGA 4 AVALIADAS PELA IEC 61000-3-2 [38].	142
TABELA 36 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO DA REDE.	143
TABELA 37 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE DA CARGA 5.	144
TABELA 38 - ORDENS HARMÔNICAS DA CARGA 5 AVALIADAS PELA IEC 61000-3-2 [38].	144
TABELA 39 - DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE DA CARGA 6.	146
TABELA 40 - ORDENS HARMÔNICAS DA CARGA 6 AVALIADAS PELA IEC 61000-3-2 [38].	146

Lista de Quadros

QUADRO 1 – EXEMPLO DE CREDENCIAIS DE ACESSO A UMA REDE PRÉ-DETERMINADA.	60
QUADRO 2 – EXEMPLO DE TÓPICO.	61
QUADRO 3 – TRECHO DE CÓDIGO PARA IMPLEMENTAÇÃO DO PROTOCOLO MQTT.	65
QUADRO 4 – EXEMPLO DE ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA ATIVA.	69
QUADRO 5 – EXEMPLO DE ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA TENSÃO RMS.	69
QUADRO 6 – EXEMPLO DE ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA CORRENTE RMS.	70
QUADRO 7 – MÉTODO UTILIZADO PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS.	72

Lista de Abreviaturas e Siglas

ADC	<i>Analogic to Digital Converter</i>
AIS	Ativo Imobilizado em Serviço
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CA	Corrente Alternada
CEE	Comissão Estadual de Energia
CME	Companhia Mineira de Eletricidade
CME	Comissão Municipal de Energia
COSIP	Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública
DAC	<i>Digital to Analogic Converter</i>
DHT	Distorção Harmônica Total
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
EMI	Interferência Eletromagnética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IIoT	<i>Industrial IoT</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	Iluminação Pública
IRC	Índice de Reprodução de Cores
ISM	<i>Industrial, scientific, and medical</i>
LabLux - UFF	Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense
LED	<i>Light Emitting Diode</i>

LP-WAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LVM	Lâmpada Vapor Metálico
LVS	Lâmpada Vapor de Sódio
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MIC	Ministério da Indústria e Comércio
MME	Ministério das Minas e Energia
MQTT	<i>Message Queue Telemetry Transport</i>
NITEE	Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica
PFC	<i>Power Factor Correction</i>
PPP	Parceria Público-Privada
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
Ra	Índice de reprodução de cor geral
RELUZ	Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes
RFID	Identificação por Radiofrequência
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
RIOLUZ	Companhia Municipal de Energia e Iluminação
STF	Supremo Tribunal Federal
TCC	Temperatura de Cor Correlata
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TIP	Taxa de Iluminação Pública
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura do Trabalho	4
Capítulo 2 - Sistemas de Iluminação Pública	6
2.1 Histórico da Iluminação Pública no Brasil	7
2.1.1 O Caso do Rio de Janeiro (RJ)	8
2.2 Legislação e Gestão dos Ativos de IP no Brasil	14
2.2.1 Legislação e Gestão da IP após a Constituição de 1988	15
2.3 Comparação das Tecnologias de IP	21
2.3.1 Tecnologias Empregadas	22
2.3.1.1 Lâmpadas Vapor de Mercúrio em Alta Pressão	23
2.3.1.2 Lâmpadas Vapor de Sódio em Alta Pressão	24
2.3.1.3 Lâmpadas Vapor Metálico	26
2.3.1.4 Luminárias LED	27
2.3.2 Eficiência Energética	30
2.3.3 Fluxo Luminoso	31
2.3.4 Índice de Reprodução de Cor	33
2.3.5 Vida Útil	35
2.3.6 Fator de Potência e Distorção Harmônica	37
2.3.7 Custos Envolvidos nos Sistemas de IP	38
2.4 Resoluções Normativas dos Equipamentos Utilizados na IP	40
2.4.1 Regulamentação Vigente para Lâmpadas Vapor de Sódio	40
2.4.2 Regulamentação Vigente para Luminárias LED	42
Capítulo 3 - Cidades Inteligentes e os Sistemas de Iluminação Pública	44
3.1 IoT e as Cidades Inteligentes	44
3.2 Plataformas de <i>Hardware</i>	48
3.2.1 Arduino	49
3.2.2 ESP8266 e ESP32	50
3.2.3 Raspberry Pi	52
3.2.4 Comparação das Tecnologias	53
3.3 Comunicação Sem Fio	54
3.3.1 Bluetooth	54
3.3.2 Wi-Fi	55

3.3.3	ZigBee	55
3.3.4	LoRa.....	56
3.3.5	Comparação das Tecnologias	56
Capítulo 4 - Metodologia		58
4.1	Conectividade do Sistema com a Nuvem.....	59
4.1.1	Algoritmo para Conexão Wi-Fi.....	60
4.1.2	Protocolo de Comunicação MQTT	61
4.1.2.1	MQTT QoS.....	61
4.1.2.2	Persistência de Mensagens.....	62
4.1.2.3	Arquitetura <i>Publish/Subscribe</i>	63
4.1.2.4	Cliente e <i>Broker</i>	64
4.1.2.5	Implementação.....	65
4.2	Módulos para Aquisição de Dados.....	65
4.3	Processamento dos Dados Coletados	67
4.4	Calibração do Sistema.....	70
4.4.1	Problemas Encontrados	71
4.5	Interface Disponibilizada ao Usuário	73
4.5.1	Desenvolvimento do Fluxo	73
4.5.1.1	Disponibilização dos dados em <i>dashboard</i>	74
4.5.1.2	Criação de Notificações	75
4.5.1.3	Disponibilização dos Dados em Arquivo <i>.txt</i>	77
4.6	Teste de Funcionamento	78
Capítulo 5 - Resultados e Discussões		82
5.1	Teste de Desempenho	82
5.2	Teste de Escalabilidade	86
5.3	Teste de Identificação de Luminárias Defeituosas	90
Capítulo 6 - Conclusão.....		92
6.1	Trabalhos Futuros	93
Bibliografia		94
Apêndice A – Motivação Particular		100
Apêndice B – Tabelas Adicionais.....		104
Apêndice C – Verificação de Funcionamento e Atualização do ESP-01.....		105
Apêndice D – Códigos.....		106
Apêndice E – Perfil harmônico das Cargas Utilizadas.....		135

Capítulo 1 - Introdução

Os sistemas de iluminação têm passado por diversas transformações ao longo dos últimos anos. Os equipamentos de iluminação LED (*Light Emitting Diode*) têm ganhado cada vez mais espaço no cenário internacional devido a sua alta eficiência energética, maior vida útil e por não conter poluentes como o mercúrio. Responsável por cerca de 3% do consumo anual de energia elétrica no Brasil, a iluminação pública (IP) também foi impactada pela disseminação da tecnologia LED, podendo ser empregada na substituição de lâmpadas vapor de sódio [1]. Segundo uma projeção realizada por Araujo et al. [2], a substituição de todo o parque brasileiro de IP pela tecnologia LED resultará na redução de cerca de 61% do consumo. A tecnologia LED possibilita também a aplicação do conceito de cidades inteligentes [3]. Dado os avanços tecnológicos com o uso de IOTs (*Internet of Things*), diversos sistemas embarcados que possibilitam o monitoramento e controle das luminárias são objeto de estudo e desenvolvimento.

Diante deste cenário de inserção da tecnologia LED no parque de IP brasileiro, apesar dos benefícios, ainda é possível identificar luminárias que apresentam funcionamento defeituoso, tais como a queima antes do fim da vida útil, módulos que não acendem ou ficam piscando, e que permanecem ligadas constantemente inclusive durante o período diurno. Esses problemas, além de gerarem custos não esperados relacionados com a manutenção ou troca do equipamento, e com perdas técnicas e não técnicas, trazem malefícios à segurança pública e à orientação e segurança do trânsito. Segundo Santos e Farias [4], o funcionamento inadequado da IP em período diurno acaba sendo contabilizado como uma perda não técnica, confundindo-se com outras perdas, tais como o furto de energia elétrica e as ligações clandestinas, onerando os consumidores que, ao final, acabam pagando por essas perdas.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através do Art. 21 da Seção X da Resolução nº 414/2010, afirma que a elaboração de projeto, a implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de IP são de responsabilidade do poder público municipal ou distrital, ou ainda de quem tenha recebido deste a delegação para prestar tais serviços [5]. Em 2021, essa resolução foi revogada, dando lugar à Resolução nº 1000/2021 que ratificou as responsabilidades do poder público quanto a IP no Art. 451 da Seção II [6].

Anteriormente a Resolução nº 414/2010, as concessionárias de distribuição eram responsáveis pela gestão dos ativos de IP.

O Brasil possui ao todo 5570 municípios. Com um parque de IP consistindo em cerca de 18 milhões de pontos de iluminação, o custo da energia já representa o segundo maior item de despesa de grande parte dos municípios, comprometendo de 3% a 5% do orçamento [1], [2], [7]. Muitos desses municípios encontraram na estruturação de projetos de Parceria Público-Privada (PPP) uma solução para a gestão dos ativos de IP, uma vez que a falta de capacidade técnica do quadro administrativo municipal tornava a atuação direta pouco eficiente, além de dificuldades orçamentárias e financeiras [8].

1.1 Motivação

Em 2017, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) instituiu por meio da Portaria n.º 20, de 15 de fevereiro de 2017 os requisitos técnicos e de qualidade a serem seguidos por luminárias com lâmpada de descarga até 600 W e luminárias com tecnologia LED a serem utilizadas na iluminação pública viária [9]. Após cinco anos, esse regulamento foi substituído pela Portaria n.º 62, de 17 de fevereiro de 2022, unificando outros regulamentos que eram auxiliares a Portaria n.º 20, de 15 de fevereiro de 2017 [10].

Apesar dos regulamentos citados, ainda é possível identificar luminárias com funcionamento defeituoso. No caso das luminárias com lâmpadas de descarga, tais como a lâmpada vapor de sódio (LVS) e vapor metálico (LVM), o problema mais comum ocorre com os componentes do reator eletromagnético, responsável por acionar a lâmpada, especificamente o ignitor e o capacitor [11]. Segundo Simões [11], o ignitor é o que mais apresenta falhas, dado que, mediante a um problema na rede ou caso a lâmpada esteja quebrada, mal encaixada ou queimada, ele começa a dar partida na lâmpada repetidamente a ponto de se danificar devido à elevação da temperatura. Os relés fotoelétricos, utilizados em ambas tecnologias, são apontados por [1] como um dos pontos mais sensíveis dos sistemas de iluminação, dado que a instalação inapropriada ou o defeito deste componente fará com que as luminárias fiquem acesas ou apagadas fora do horário previsto para o seu funcionamento.

Em relação à gestão e manutenção dos ativos de IP, deve-se destacar que um sistema de IP de tecnologia LED é muito distinto de um com tecnologia de descarga. De acordo com Casagrande [12], enquanto a manutenção de um sistema com lâmpadas LVS ou LVM

envolve, na maior parte dos casos, rotinas usuais de substituição dos componentes defeituosos, a fotocélula, o reator ou a própria lâmpada, em um sistema de IP a LED a manutenção é muito mais complexa, uma vez que envolve a análise de muito mais alternativas e variáveis diante de um defeito, tais como: o conjunto óptico ou fotométrico, o *driver* ou um dos componentes do *driver* como o capacitor, que são sabidamente um ponto crítico para sua vida útil, o dispositivo de proteção contra surtos (DPS), o relé fotoelétrico, ou os cabos. Dessa forma, observa-se que na IP com tecnologia LED não há componentes avulsos à lâmpada, com a manutenção podendo envolver a troca da luminária em si. Apesar dos possíveis componentes de uma luminária LED que são susceptíveis a falhas serem conhecidos, observa-se uma carência de estudos no Brasil que investiguem e apontem os motivos para sua ocorrência.

Quanto a tarifação, os municípios, por meio da Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (COSIP) que é recolhida na fatura de energia dos consumidores, devem realizar a manutenção dos ativos de IP, a instalação de novos pontos de iluminação e repassar à concessionária apenas o valor referente ao consumo de energia. Neste sentido, o consumo mensal da IP deve ser apurado de acordo com o Art. 468 disposto na Seção V da Resolução nº 1000/2021 [6]. Dado que, na maior parte dos casos, os sistemas de IP ainda não possuem medição realizada pela distribuidora ou pelo poder público municipal, o consumo mensal por ponto de iluminação é estimado de acordo com o item IV desse artigo, que considera a carga instalada e o período de utilização para o faturamento diário, este último sendo definido pela Resolução Homologatória ANEEL nº 2.590, de 13 de agosto de 2019.

De acordo com a Resolução 2590/2019 [13], o tempo para o faturamento da iluminação em cada município varia entre 11h22min e 11h29min. No entanto, como mostrado em [1], as concessionárias não são efetivamente remuneradas, dado que, em alguns cenários, a duração média da noite é maior do que o tempo para o faturamento instituído pela ANEEL. A desatualização cadastral da quantidade de pontos de iluminação e da carga instalada também se torna um problema por esse método. Segundo uma nota técnica emitida pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), a carência de dados sistematizados e detalhados do parque de iluminação pública das cidades e seu respectivo consumo de energia resulta em uma escassez de estudos que estimem o potencial de eficiência energética da IP municipal [14]. Nesse sentido, [15] propõe o uso de geotecnologias para a realização do cadastramento informatizado de todos os pontos de IP, visando instrumentalizar a gestão

dos serviços e otimizar a fiscalização do faturamento junto às concessionárias. Em projeto piloto feito por [16], visando a efficientização dos procedimentos de gerenciamento, logística e da manutenção da IP, além do cadastro e atualização da base de dados de infraestrutura da IP, foram considerados também: o controle das equipes de manutenção, a otimização de rotas e alocação de equipes e a criação de relatórios e auditorias.

Os encargos referentes à administração e conservação da infraestrutura de iluminação pública são elevados, sendo suportados pela população que, em muitas ocasiões, não desfruta de um serviço de qualidade. Além disso, a compensação pela energia fornecida pelas concessionárias não se mostra suficiente [1]. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar os sistemas de IP no intuito de auxiliar as prefeituras e concessionárias quanto a manutenção destes ativos. Apêndice A

Além das motivações apresentadas, o Apêndice A mostra as motivações pessoais do autor para o desenvolvimento deste estudo.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho consiste em desenvolver um sistema capaz de monitorar os sistemas de IP, fornecendo dados relevantes para tomada de decisão das prefeituras e concessionárias quanto a manutenção destes ativos. O sistema em questão irá monitorar grandezas elétricas, tais como: tensão, corrente, potência aparente e ativa, e fator de potência. Os dados obtidos serão enviados para a rede por meio do protocolo MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*) e devem ser apresentados ao usuário em formato de *dashboard* por meio do Node-RED. Além disso, os dados adquiridos devem ser salvos em um arquivo de texto do modo a facilitar sua extração para outras ferramentas de análise de dados.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho encontra-se disposto da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta uma breve contextualização do tema e descreve o objetivo desta dissertação;

No Capítulo 2, é fornecido um breve histórico da IP no Brasil, em especial, na cidade do Rio de Janeiro, local que experimentou diversas inovações tecnológicas na área da

iluminação. Tópicos de legislação e gestão destes ativos também são abordados, tendo como foco as mudanças realizadas desde a Constituição de 1988 até às regras atualmente vigentes. Após, uma comparação das características elétricas e fotométricas entre as atuais tecnologias utilizadas na IP são apresentados alguns conceitos da área de luminotécnica. Por fim, as normas para que o equipamento de iluminação possa ser empregado na IP são fornecidas, sendo detalhados alguns dos critérios elétricos e fotométricos;

No Capítulo 3, são introduzidos os principais conceitos de cidades inteligentes e IoT, com foco para os sistemas de IP. Após, algumas plataformas de *hardware* e tecnologias de comunicação sem fio comumente aplicados em diversos projetos IoT são brevemente apresentados e comparados;

O Capítulo 4 detalha a metodologia utilizada para o desenvolvimento, teste e validação de dados do projeto. É descrito, também, o funcionamento do protocolo MQTT, adotado para o transporte de dados, e do Node-RED, para a criação de *dashboards*;

No Capítulo 5, são expostos os resultados obtidos e a sua análise crítica.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta dissertação, assim como as sugestões de trabalhos futuros;

Capítulo 2 - Sistemas de Iluminação Pública

A trajetória da iluminação artificial remete a tempos muito remotos, alinhando-se com as demandas do desenvolvimento humano ao longo da história. Até alguns séculos atrás, a atividade produtiva estava restrita ao período diurno, durante a presença do Sol. Após o pôr do Sol, no período noturno, as atividades eram bastante limitadas, em que as pessoas, não havendo melhor opção, se recolhiam aos seus aposentos para descansar. A iluminação artificial mudou esse ciclo, dessa forma, sendo possível estender os horários das atividades, sejam elas de trabalho ou de lazer, o que possibilitou o desenvolvimento da economia, da cultura e do conhecimento científico [4].

Em relação aos sistemas de IP, um dos primeiros registros ocorreu em 1415 na Inglaterra, sendo fundamentado na prevenção e garantia da segurança pública após comerciantes solicitarem providências para combater a criminalidade [4]. Quanto a fonte energética, inicialmente a iluminação pública das cidades era feita por meio dos lampiões, sendo utilizados para o seu acionamento o óleo vegetal, mineral ou animal e, posteriormente após a descoberta do petróleo como fonte energética em meados do século XIX, o querosene e o gás [17].

Com o advento da produção de energia elétrica, a história da iluminação atual se deu em meados do século XIX quando Thomas Alva Edison deu publicidade e escala comercial de produção à lâmpada incandescente, transformando-a em um produto para consumo [4], [17]. Desde então, os sistemas de IP passaram por diversas transformações e incorporação de diversas tecnologias – lâmpadas incandescentes, lâmpadas vapor de mercúrio de alta e baixa pressão, lâmpadas fluorescentes, LVS e LVM e, por fim, as lâmpadas LED – com o objetivo de melhorar a iluminação e a eficiência do sistema. O presente referencial teórico baseou-se em uma revisão de literaturas que abordam assuntos relativos ao histórico do sistema de iluminação pública no Brasil, a legislação do setor e responsabilidades, a comparação das tecnologias atualmente utilizadas e suas respectivas resoluções normativas.

2.1 Histórico da Iluminação Pública no Brasil

Após séculos do uso de lenha, velas de cera e das lamparinas que usavam óleo vegetal, mineral ou animal, foi Irineu Evangelista de Souza, futuro Barão de Mauá, que apresentou uma proposta viável de iluminação à gás para a cidade do Rio de Janeiro (RJ) em 1850 [17]. Com monopólio da exploração por 25 anos, o primeiro sistema de iluminação a gás implantada no país possuía uma rede de 20 km de dutos de ferro com gás hidrogênio carbonado [4].

Em 1876, Dom Pedro II, incitado com o que viu após visitar a exposição da Filadélfia, concedeu a Thomas Alva Edison o privilégio de introduzir no país os aparelhos e processos de sua invenção, destinados à utilização da energia elétrica na iluminação pública [4], [18]. Em 1879, foi inaugurada a primeira instalação de iluminação elétrica permanente do Brasil na Estação Central da Estrada de Ferro D. Pedro II da cidade do Rio de Janeiro (RJ), hoje chamada Central do Brasil. Essa instalação, que funcionou por sete anos, compreendia dois dínamos *Gramme* acionados por uma locomotiva de 7 CV, que supriram energia elétrica a seis lâmpadas de arco, do tipo *Jablochkoff*, que passaram a iluminar o local, em substituição dos 46 bicos de gás existentes até então [18].

Desde então, a implementação de sistemas de IP, utilizando energia elétrica, aumentou significativamente no país. Em 1881, foi instalada no Rio de Janeiro (RJ) a primeira iluminação externa pública do país em trecho do Jardim do Campo da Aclamação, atual Praça da República, que contava com 16 lâmpadas de arco voltaico, sendo alimentadas por dois dínamos acionados por uma máquina a vapor [17]. Neste mesmo ano, realizou-se a primeira demonstração de iluminação de edificações no Brasil durante a inauguração da Exposição Industrial na cidade do Rio de Janeiro (RJ), onde foram empregadas 60 lâmpadas do sistema Edison, que utilizavam energia elétrica produzida por um dínamo de 10 HP, no prédio do Ministério da Viação e Obras Públicas, situado no Largo do Paço, atual Praça XV de Novembro [18].

Em 1883, na cidade de Campos (RJ), D. Pedro II inaugurou o primeiro serviço público municipal de iluminação elétrica em caráter permanente do Brasil e da América do Sul, que consistia em 39 lâmpadas alimentadas por uma máquina a vapor de 50 HP que acionava três dínamos, totalizando 52 kW de potência [18]. Porto Alegre (RS) foi a primeira capital brasileira a contar com iluminação pública elétrica, sendo o segundo serviço de iluminação em caráter permanente no país após a inauguração da usina termelétrica Velha

Porto Alegre, em 1887. Construída pela Companhia Fiat Lux, essa usina possuía, inicialmente, um dínamo de 160 kW e usava lenha como combustível. Chegando a totalizar 18 MW de capacidade instalada, foi desativada em 1949 [4].

De acordo com Casagrande [12], o marco zero na história da energia elétrica no Brasil e na América Latina se deu a partir da inauguração, em 1889, da primeira usina hidrelétrica de grande porte para “força e luz”, expressão corrente na época para denominar os serviços de força motriz e iluminação, em Juiz de Fora (MG). Conhecida como Marmelos Zero, a usina, que pertencia à Companhia Mineira de Eletricidade (CME), gerava energia elétrica principalmente para atender à Companhia Têxtil Bernardo Mascarenhas, com o excedente destinado à IP da cidade, por meio de dois grupos geradores de 125 kW cada [12], [18].

Em 1896, entrou em operação a hidrelétrica Itamarati em Petrópolis (RJ), sendo esta, a primeira usina do estado do Rio de Janeiro. Pertencente ao Banco Construtor do Brasil, possuía quatro grupos geradores, cada um com 648 kW de potência, destinados à iluminação da cidade [18]. Foi inaugurada, também, a termelétrica Belém, localizada no município de Belém (PA), sendo esta, a primeira usina do estado do Pará. Destinada a iluminação pública e particular, a usina foi construída pela Companhia Urbana de Estradas de Ferro Paraense e contava com oito máquinas a vapor que totalizavam 3200 HP [18].

No contexto abordado, é possível afirmar que a iluminação pública foi um dos segmentos que impulsionaram a exploração de energia elétrica no Brasil. De acordo com Silva [17], a intensificação dessa exploração remonta ao início do século XX, época em que foram fundadas as primeiras companhias geradoras e distribuidoras. A capital do estado do Rio de Janeiro foi uma das primeiras cidades brasileiras a experimentar diversas inovações tecnológicas na área de iluminação. Segundo Casagrande [12], na primeira metade do século XX foram instalados cerca de 10.000 pontos por década. A seguir, o caso do Rio de Janeiro (RJ) será abordado com o propósito de ilustrar a evolução dos sistemas de IP a partir do século XX.

2.1.1 O Caso do Rio de Janeiro (RJ)

Apesar dos diversos avanços na geração de energia elétrica e o seu uso para a IP, no início do século XX o sistema de iluminação à gás continuava sendo amplamente utilizado, com o seu apogeu no Rio de Janeiro (RJ) ocorrendo em 1912, quando foram registrados

22.440 combustores [19]. Em 1913, a iluminação a gás começou a ser trocada pela elétrica, com sua substituição total ocorrendo em 31 de dezembro de 1933 [17]. A Figura 1 apresenta a evolução na quantidade de pontos dos sistemas a gás e a energia elétrica.

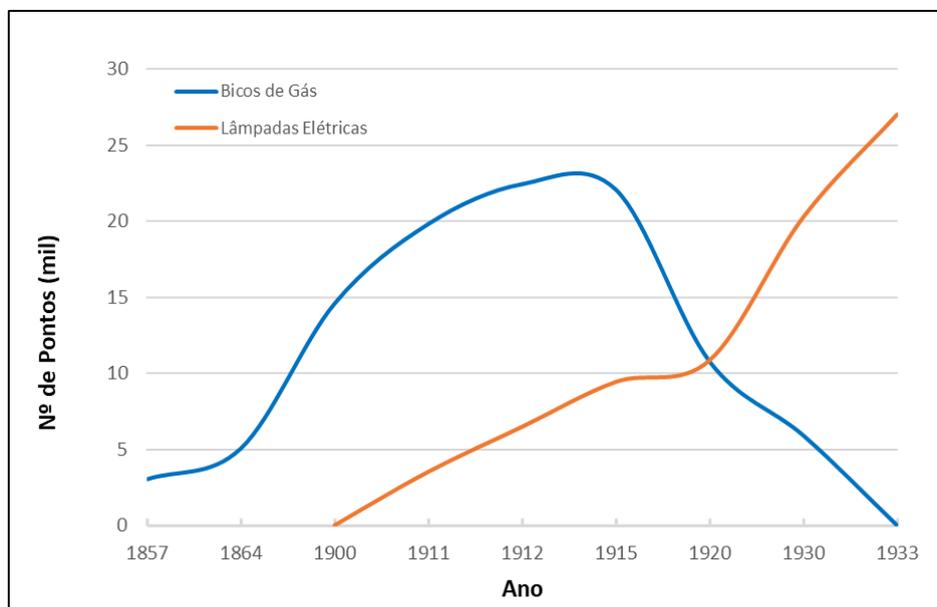


Figura 1 - Evolução na quantidade de pontos de IP a gás e a energia elétrica na cidade do Rio de Janeiro (RJ) (de 1857 a 1933).

Fonte: Elaboração própria com dados de [19].

De acordo com [19], nos primeiros anos do século XX a capital do Rio de Janeiro viria a receber diversos projetos e obras de urbanização. Nesse contexto, na Avenida Central, atualmente Avenida Rio Branco, foi inaugurada em 1905 a iluminação pública elétrica com a utilização de lâmpadas de arco voltaico, cuja alimentação era suprida por uma pequena usina instalada na Rua da Alfândega. No entanto, as limitações de carga e a desconfiança quanto ao desempenho da nova tecnologia levaram à adoção de um sistema misto, ou seja, lampiões a gás e luminárias elétricas eram utilizadas lado a lado. Em 1908, foi inaugurada, no bairro da Urca, a primeira iluminação de caráter ornamental no Brasil, sendo utilizadas lâmpadas Edison de filamento de carvão [18].

A chegada da *The Rio de Janeiro Tramway, Light and Power Company Ltd*, empresa de origem canadense, em 1904 foi de vital importância para o desenvolvimento da cidade, viabilizando as primeiras tentativas de industrialização que, até então, eram dificultadas por limitações nos serviços de produção de energia elétrica. Em 1911, as instalações de IP da Light atingiam 150 km com 3522 lâmpadas elétricas. Com capacidade total instalada de 37 MW, os consumidores de luz e força utilizavam cerca de 223.392 lâmpadas incandescentes

e 1739 lâmpadas a arco voltaico. Após diversas expansões, a distribuição de energia elétrica superava os 410 GWh, dos quais 92 GWh (22%) eram destinados a iluminação pública [19].

Desde a primeira aplicação, a lâmpada incandescente passou por uma série de aperfeiçoamentos que viriam a consagrá-la como a melhor tecnologia para iluminação na primeira metade do século XX. Em 1913, o filamento a carvão foi substituído pelo fio metálico enrolado em hélice, que operava em atmosfera gasosa inerte, fazendo com que a lâmpada incandescente passasse a operar com uma eficiência luminosa de até 20% [17]. Segundo [19], as primeiras experiências com essa nova tecnologia ocorreram em 1915, quando novas instalações foram feitas no Rio de Janeiro (RJ). Em 1920, iniciou-se uma completa remodelagem dos sistemas de IP. A partir dessa data, as lâmpadas de arco voltaico começaram a ser substituídas e todos os novos sistemas foram implementados com lâmpadas incandescentes.

Na década de 30, segundo [19], a modernização dos sistemas de iluminação e o aumento de sua eficiência permitiram que a engenharia da iluminação – luminotécnica – se destacasse no mundo. Tornou-se possível a inversão das luminárias, a utilização de refletores superiores que direcionavam a luz para baixo (quando a iluminação era feita com o uso de gás, os postes tinham que ser do tipo “coluna” para melhor operação da chama do gás) e a introdução de postes ornamentais, demonstrando uma preocupação estética que anteriormente era ignorada.

Nessa mesma época, a capital do estado do Rio de Janeiro recebeu o título de “cidade-luz sul-americana”, sendo reconhecida como uma das mais bem iluminadas do mundo e comparada, inclusive, com Paris [17]. A tecnologia vapor de mercúrio foi introduzida em 1936, sendo utilizada na remodelagem do Túnel Novo, que conecta Botafogo a Copacabana, sendo utilizadas 15 lâmpadas. No entanto, muito em razão do sucesso das lâmpadas incandescentes, essa tecnologia progrediu lentamente, pouco se fazendo notar, ao contrário de outras capitais do país [19]. Nas décadas seguintes, os sistemas de iluminação continuaram se expandindo em ritmo acelerado. A Figura 2 mostra a evolução na quantidade de pontos do sistema de IP até o ano de 2022.

Na década de 40 o crescimento constante da população e as mudanças econômicas, causadas pela Segunda Guerra Mundial, começavam a impor inúmeras providências. Nesse contexto, a IP passou por transformações, assumindo uma importância maior e passando a ser cuidadosamente estudada. Com um número crescente de veículos, aumento de sua velocidade máxima e com o desenvolvimento da vida noturna, a iluminação adquiriu um

papel vital de segurança, após perceber-se que acidentes automobilísticos poderiam ser evitados com uma boa iluminação dos logradouros públicos, que, à época, empregavam cerca de 34.928 pontos de iluminação. A tecnologia fluorescente foi utilizada pela primeira vez ao final da década, quando, em 1949, a Inspeção de Iluminação inaugurou um conjunto fluorescente de origem inglesa num trecho de 10 km da Avenida Brasil [19].

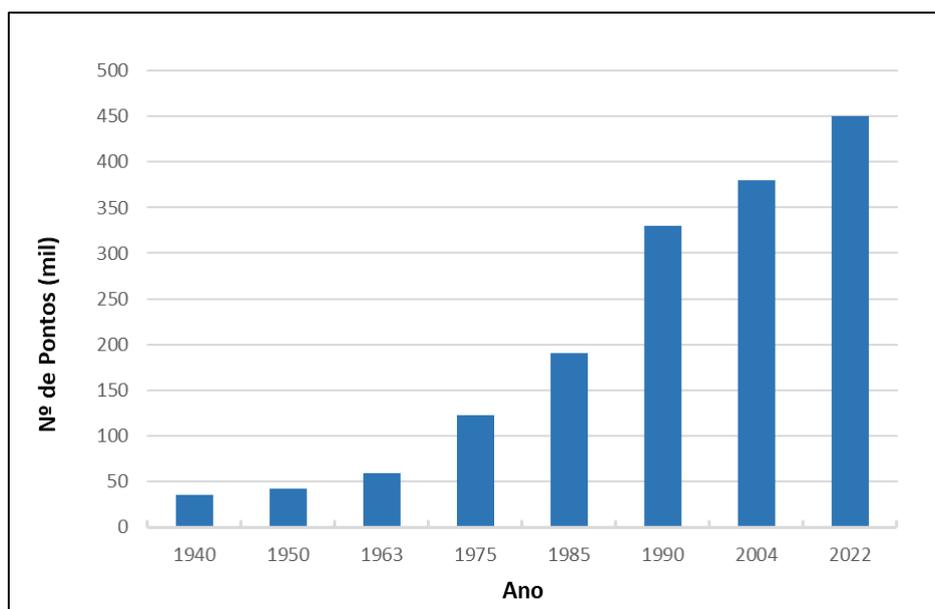


Figura 2 - Evolução na quantidade de pontos de IP na cidade do Rio de Janeiro (RJ) (de 1940 a 2022).

Fonte: Elaboração própria com dados de [19], [20].

No início da década de 50, o Rio de Janeiro (RJ) era a cidade com a melhor iluminação do Brasil, totalizando cerca de 42.470 pontos de iluminação. Ao longo da década, a pesquisa e o desenvolvimento de novas técnicas de iluminação viabilizaram a fabricação de lâmpadas fluorescentes e as de vapor de mercúrio e sódio, essas sendo mais eficientes do que as anteriores, fazendo com que todas as lâmpadas de arco voltaico fossem substituídas até o final da década [19].

Devido a maior eficiência e vida útil, em 1953 foram instaladas na Avenida Beira-Mar, em caráter experimental, dez luminárias de fabricação nacional equipadas com lâmpadas vapor de mercúrio, substituindo as lâmpadas incandescentes existentes [17]. Nos últimos anos da década, o governo local, estimulado pelo grande volume de vendas no mercado, determinou que toda a IP da cidade passasse a ser feita com lâmpadas fluorescentes, com a Avenida Perimetral sendo um dos principais exemplos de novos projetos de iluminação na época [19]. No entanto, segundo Fróes [17], essas lâmpadas apresentavam uma limitação técnica, dado que, como se tratavam de lâmpadas de baixa

pressão, a potência influenciava diretamente no tamanho do bulbo. As maiores lâmpadas fluorescentes da época mediam 2,44 metros de comprimento, atingindo até 215 W.

Na década de 60, a IP foi marcada pelo início da utilização em larga escala das lâmpadas de descarga, como a vapor de mercúrio, surgindo também a LVS de alta pressão em 1965 que, mais tarde, viria a se consagrar como a mais indicada para a iluminação de vias públicas dada a sua maior eficiência. Essa década também foi marcada pelo incremento das indústrias voltadas para o setor de iluminação, com fábricas de lâmpadas e luminárias se desenvolvendo e espalhando pelo país. Em 1963, os serviços de IP na cidade do Rio de Janeiro contavam com 59.264 lâmpadas, das quais 5.000 eram fluorescentes e 88 eram lâmpadas vapor de mercúrio, sendo o restante incandescente [19].

Na década de 70, as dificuldades orçamentárias e os entraves burocráticos – principalmente após a fusão entre o estado da Guanabara com o estado do Rio de Janeiro, formando o novo estado do Rio de Janeiro com a cidade do Rio de Janeiro como capital – motivaram a busca por soluções que alinhavam eficiência e economia na IP, com a cidade assistindo à substituição da iluminação incandescente pela iluminação a vapor de mercúrio de alta pressão de boa parte do sistema [19]. Em julho de 1975, a instalação e manutenção de 33 mil pontos de iluminação ficavam sob a responsabilidade da Comissão Estadual de Energia (CEE), enquanto a Light mantinha o controle sobre 90 mil lâmpadas incandescentes. Foi nessa época que teve início o uso da LVS, sendo a ponte Rio-Niterói o primeiro local a adotar essa tecnologia [17].

A década de 80 também foi marcada pela ampliação e efficientização dos sistemas de iluminação. De acordo com [19], afim de oferecer à população condições adequadas de lazer nos períodos noturnos, a Comissão Municipal de Energia (CME) – que substituiu a CEE em 1975 – buscou na tecnologia LVS a solução para a iluminação de grandes avenidas, monumentos, túneis e instalações de grande porte. Em 1985, a IP era uma das principais reivindicações das comunidades, dado que 20% dos logradouros da cidade ainda não tinham qualquer tipo de iluminação. Nessa época, a CME¹ era responsável por 140 mil pontos de iluminação e a Light ainda mantinha cerca de 50 mil lâmpadas incandescentes.

A partir da Portaria Interministerial nº 1.877, de 30 de dezembro de 1985, do Ministério das Minas e Energia (MME) e do Ministério da Indústria e Comércio (MIC), viria a ser criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). O objetivo era atingir, através de ações coordenadas, maior coerência na fixação de programas e metas,

¹ Comissão Municipal de Energia

além de definir políticas fiscais e creditícias afim de estimular o intercâmbio de experiências entre as concessionárias e a racionalização do uso da energia elétrica ao incentivar o aumento da eficiência dos equipamentos elétricos e dos processos industriais [18]. Desde então, diversas ações em eficiência energética passaram a ser implementadas em colaborações entre os governos e as concessionárias de energia elétrica. Na área de iluminação pública, lâmpadas incandescentes e mistas foram inicialmente substituídas por lâmpadas de vapor de mercúrio [12].

Em agosto de 1990, a CME² foi extinta e substituída pela Companhia Municipal de Energia e Iluminação (RIOLUZ). A empresa, com o objetivo de aumentar a qualidade e expandir o sistema de IP, ficou responsável por sua gestão na cidade do Rio de Janeiro (RJ), que, à época, contava com cerca de 330 mil pontos de luz. Ainda sob responsabilidade da Light, os 40 mil pontos com lâmpadas incandescentes foram repassados à RIOLUZ ao longo da década [19].

No ano de 2000, viria a ser instituído pela Eletrobras no âmbito do PROCEL, com o apoio do MME, o Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes (RELUZ). Com o objetivo de expandir os sistemas de IP eficientes, diminuindo o consumo de energia e valorizando os espaços públicos em parceria com as concessionárias e os municípios, à época, o programa atuava na substituição de lâmpadas incandescentes, mistas e vapor de mercúrio, pelas LVM e LVS. Atualmente essas tecnologias, no âmbito do programa RELUZ, estão sendo substituídas por luminárias LED [2].

Em 2004, a RIOLUZ administrava um sistema com cerca de 380 mil pontos de IP contendo lâmpadas incandescentes, fluorescentes, mistas, vapor de mercúrio, LVM e LVS. Participante do programa RELUZ, promoveu a economia de energia a partir da substituição de lâmpadas menos eficientes pelas LVM e LVS [19]. A Figura 3 apresenta a composição do parque de IP da cidade do Rio de Janeiro (RJ) nessa época.

No decorrer dos anos, foram realizadas diversas iniciativas por parte dos agentes envolvidos no setor para aumentar a eficiência energética da IP. Com a chegada das luminárias LED, o programa RELUZ viria a realizar em âmbito nacional, em 2017, a 1ª Chamada Pública do Procel Reluz para a efficientização de pontos de IP envolvendo essa tecnologia. Após quatro anos, já na 3ª Chamada, além da melhor iluminação das vias públicas, o programa resultou, em média, em uma redução de 54% da demanda [21]. Em 2021, a Prefeitura do Rio, por meio de uma PPP, começou a implantar o programa Luz

² Comissão Municipal de Energia

Maravilha, visando modernizar todo o sistema de IP do município (450 mil pontos de luz) usando luminárias LED até 2022 [20]. Em agosto de 2023, a cidade já contava com 457 mil luminárias LED instaladas. Dado o sucesso do programa, foi prevista a instalação de mais 80 mil pontos de iluminação a LED [22].

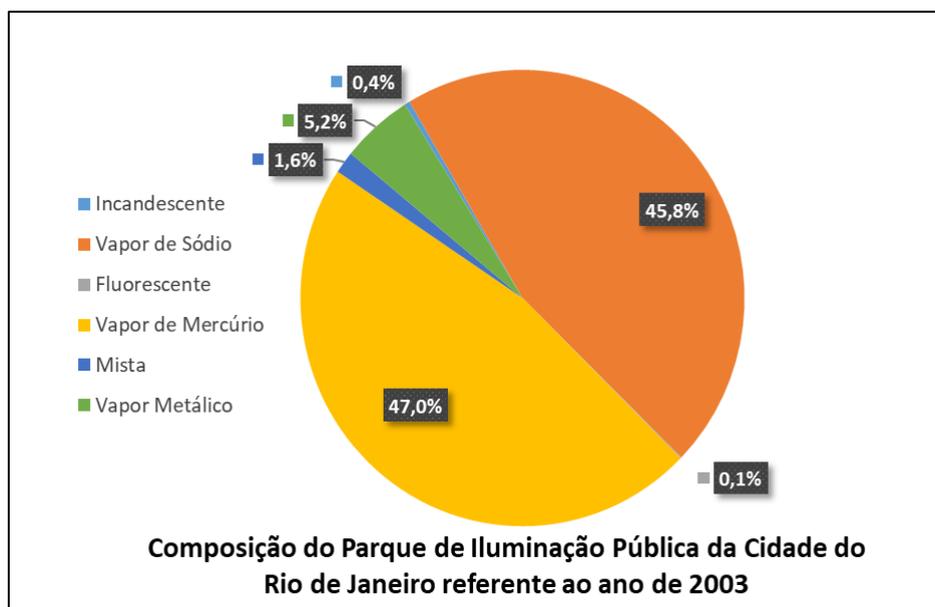


Figura 3 - Composição do parque de IP do Rio de Janeiro (RJ) referente ao ano de 2003.

Fonte: Elaboração própria com dados de [17].

2.2 Legislação e Gestão dos Ativos de IP no Brasil

Até as primeiras décadas do século XX, as concessões referentes à energia elétrica se encontravam na esfera municipal em razão da pouca influência que tinham sobre a atividade econômica, se limitando a fornecer iluminação pública ou doméstica para as cidades. Nesse período, o fornecimento de energia elétrica era considerado uma atividade privada, onde os contratos de concessão eram celebrados diretamente com os municípios, modelo esse que persistiria até 1934 [17].

A partir dos anos 30, viria a predominar o modelo estatizante. Dessa forma, muitas concessionárias se tornariam estatais. Destaca-se também nesse período, a criação do Código de Águas em 1934, decretando a União como poder concedente dos serviços de energia elétrica em substituição aos estados e municípios, obrigando, assim, a adaptação dos contratos existentes ao código. Dessa forma, após a Constituição de 1934 e do Código de

Águas, o fornecimento de energia elétrica passou a ser tratado como serviço público. Após o Decreto Lei nº 3.763, de 25/04/1941, estabeleceu-se a obrigatoriedade de celebração de contratos entre os municípios e as concessionárias para a prestação de serviços de IP, sendo assim, o primeiro marco legal definindo a IP como um serviço público de competência dos municípios [17].

Durante esse período até a Constituição Federal de 1988, de acordo com Casagrande [12], verifica-se que o serviço de IP era gerido, em determinados locais, pelas concessionárias, enquanto, em outros, pelos municípios, cada região apresentando suas peculiaridades. Na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, o parque de IP era inicialmente gerido pela Light, e, conforme demonstrado no Capítulo 2.1.1 deste trabalho, seus ativos foram gradualmente transferidos para a gestão municipal. Em contrapartida, no Estado de Minas Gerais prevaleceu a tradição de deixar a gestão do serviço de IP a cargo da concessionária de energia [12]. A seguir, serão detalhadas as legislações e os agentes envolvidos na gestão da IP desde a Constituição de 1988 até os dias atuais.

2.2.1 Legislação e Gestão da IP após a Constituição de 1988

A Constituição Federal de 1988 determina em seu Art. 30 que a prestação dos serviços públicos de iluminação pública é de competência dos municípios, tendo em vista que se trata de um serviço público de interesse local, de acordo com os seguintes termos da lei:

Art.30. Compete aos Municípios:

(...)

V – organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, incluído o de transporte coletivo, que tem caráter essencial; [23]

Observa-se que, devido às concessionárias de energia serem estatais, durante muito tempo a IP foi gerida pelo governo federal ou estadual em diversos estados. Segundo Casagrande [12], O Art. 21, alínea XII, item b da Constituição de 1988, gerou uma interpretação que deu margem para a aceitação de que a IP não fosse necessariamente administrada pelos municípios, podendo ser gerida pelo governo federal ou estadual.

Art.21. Compete a União:

(...)

XII - explorar, diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão:
(...)
b) os serviços e instalações de energia elétrica e o aproveitamento energético dos cursos de água, em articulação com os Estados onde se situam os potenciais hidroenergéticos; [23]

Esse cenário começou a mudar a partir de 1996, quando o setor elétrico viria a passar por uma reestruturação, desverticalizando o setor em segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização [12]. Constituída através do Decreto nº 2.335, de 06 de outubro de 1997, a ANEEL viria a criar grande parte da regulamentação existente em relação aos serviços de IP. Criada na forma de autarquia vinculada ao MME, sua finalidade é regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, regulamentando e criando critérios para exploração da concessão dos serviços do setor elétrico [4].

Durante esse período diversas empresas concessionárias de energia foram sendo privatizadas. Dessa forma, entrando em conflito com a Constituição, dado que, caso as distribuidoras continuassem a gerenciar a IP, esta não mais estaria a cargo do poder público, ficando claro, assim, que a IP deveria ser gerenciada pelos municípios [12]. Após a privatização, visando focar na venda de energia e gestão das redes de energia elétrica, muitas distribuidoras transferiram seus ativos de IP para os municípios. No entanto, como apontado por [17], houve a piora na gestão do parque de IP em alguns casos devido a deficiência e a falta de experiência dos municípios na manutenção do sistema.

Com o objetivo de regulamentar o setor elétrico, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 456, de 29 de novembro de 2000, estabelecendo as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Em relação a IP, a resolução estabelecia que:

Art. 114. A responsabilidade pelos serviços de elaboração de projeto, implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública é de pessoa jurídica de direito público ou por esta delegada mediante concessão ou autorização, podendo a concessionária prestar esses serviços mediante celebração de contrato específico para tal fim, ficando o consumidor responsável pelas despesas decorrentes.

Parágrafo único. Quando o sistema de iluminação pública for de propriedade da concessionária, esta será responsável pela execução e custeio dos respectivos serviços de operação e manutenção. [24]

A partir do Art. 114, infere-se que cabe ao município gerenciar a IP, podendo delegar, inclusive para a concessionária, a responsabilidade da gestão desses ativos mediante um contrato específico. No entanto, conforme apontado por [12], o parágrafo único gerou uma

contradição, uma vez que é admitido que a concessionária fosse proprietária do sistema de IP. Dada essa peculiaridade, foram previstos dois tipos de tarifa: a B4a quando o poder público é detentor do serviço; e a B4b, quando a concessionária é quem detém os ativos de IP, conforme trecho da lei:

Art. 116. As tarifas aplicáveis aos fornecimentos de energia elétrica para iluminação pública serão estruturadas de acordo com a localização do ponto de entrega, a saber:

I - Tarifa B4a: aplicável quando o Poder Público for o proprietário do sistema de iluminação pública; e

II - Tarifa B4b: aplicável quando o sistema de iluminação pública for de propriedade da concessionária. [24]

A manutenção da gestão da IP também foi um tema bastante debatido após a Constituição de 1988. Para a manutenção desses ativos, muitos municípios se valiam da Taxa de Iluminação Pública (TIP) com base em critérios próprios de cobrança. No entanto, o Supremo Tribunal Federal (STF) declarou a inconstitucionalidade dessa cobrança, dado que serviços públicos de natureza indivisível – que podem ser usufruídos por toda coletividade, como no caso da IP – não poderiam ser remunerados mediante cobrança de taxa. Dado que muitos municípios não tinham condições efetivas de custear a IP por meios dos seus impostos, em 2002 o Congresso Nacional, em emenda à Constituição, instituiu a COSIP, uma receita de ordem vinculada (com destinação específica) para que os municípios fizessem a gestão e o custeio dos sistemas de IP, sendo essa uma nova classe de tributos [8], [17].

Com o objetivo de atualizar a Resolução nº 456/2000, em 2010 a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. Essa resolução eliminou as contradições existentes quanto à responsabilidade pela IP, deixando claro que seu gerenciamento deve ser feito pelo município ou delegada mediante concessão ou autorização. A Resolução nº 456/2000 também não definia o que era IP, algo que mudou com a nova resolução. Nesse sentido, Resolução 414/2010 define em seu Art. 2º, inciso XXXVI, IP como sendo “*serviço público que tem por objetivo exclusivo prover de claridade aos logradouros públicos, de forma periódica, contínua ou eventual*” [5].

Art. 21. A responsabilidade pelos serviços de elaboração de projeto, implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública é de pessoa jurídica de direito público ou por esta delegada mediante concessão ou autorização.

Parágrafo único. A distribuidora pode prestar esses serviços mediante celebração de contrato específico para tal fim, ficando a pessoa jurídica de direito público responsável pelas despesas decorrentes. [5]

O Art. 218 estabeleceu que as distribuidoras de energia deveriam realizar a transferência dos ativos de IP para os municípios. Segundo Pinho [8], grande parte das distribuidoras de energia estaduais realizavam a gestão da IP até então. Esse artigo também estabeleceu um cronograma para que as distribuidoras realizassem essa transferência, sendo estipulado um prazo de dois anos inicialmente. No entanto, de acordo com Casagrande [12], sob a alegação de não haver condições de assumir a administração desses ativos, muitos municípios se organizaram para solicitar a prorrogação deste prazo. Dessa forma, a ANEEL estendeu o prazo para 31 de dezembro de 2014 para todos os municípios, dando mais tempo para se adaptarem.

Art. 218. Nos casos onde o sistema de iluminação pública estiver registrado como Ativo Imobilizado em Serviço – AIS da distribuidora, esta deve transferir os respectivos ativos à pessoa jurídica de direito público competente no prazo máximo de 24 (vinte e quatro) meses, contados da data da publicação desta Resolução. [5]

De acordo com a Resolução 414/2010 [5], as distribuidoras de energia ainda podiam ser as prestadoras do serviço de manutenção da IP caso fossem as ganhadoras do processo licitatório junto aos municípios, porém não sendo mais a proprietária desses ativos. Em relação à medição e faturamento, o Art. 24 definiu que a tarifa aplicável ao fornecimento de energia elétrica para IP é a Tarifa B4a, ou seja, aquela que não incorpora o custo da manutenção da prestação do serviço pela concessionária. Segundo Souza et al. [1], à época, a Tarifa B4b, aplicada quando os ativos de IP eram de responsabilidade das concessionárias, era cerca de 9,5% superior a Tarifa B4a. O mesmo artigo também estabelece que o tempo a ser considerado para consumo diário na IP deve ser de 11h52min.

Os ativos transferidos para os municípios são apenas aqueles de uso exclusivo para a IP, tais como: lâmpada, luminária, relé fotoelétrico, reator, braço da luminária e condutores. Os postes e as redes de distribuição continuaram sendo da concessionária. A Figura 4 exemplifica os ativos transferidos. Em instalações exclusivamente destinadas à IP, uma exceção ocorre, pois o fornecimento de energia é destinado apenas para atender a essa finalidade. Nesses casos, todos os componentes, como postes, torres e eletrodutos, são ativos

de iluminação pública e, portanto, pertencem ao município [12]. A Figura 5 mostra alguns exemplos.

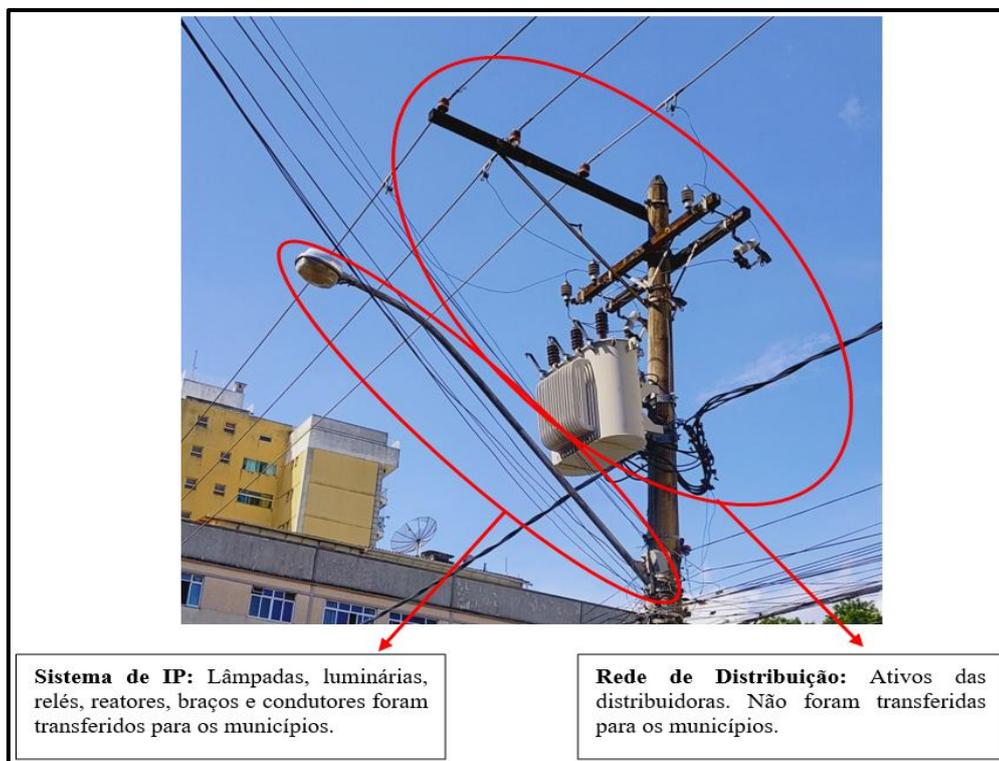


Figura 4 - Ativos de IP que foram transferidos para os municípios.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 5 - Circuitos exclusivos de IP.

Fonte: Elaboração própria.

Em 2019, a ANEEL publicou a Resolução Homologatória nº 2.590 de 13 de agosto de 2019, atualizando, para cada município, os tempos a serem considerados para o consumo diário na IP para os casos em que o faturamento é estimado, ou seja, onde o sistema não possui medição. Dessa forma, cada município passa a ter um tempo específico para o faturamento da iluminação, que varia de 11h22min a 11h29min dependendo da sua latitude, sendo a média nacional de 11h27min, acarretando uma redução média de 25 minutos (3,5%) em relação ao tempo estabelecido pela Resolução 414/2010. De acordo com Souza et al. [1], no entanto, em alguns cenários a duração média da noite é maior do que o tempo para o faturamento instituído pela ANEEL, fazendo com que a concessionária não seja efetivamente remunerada.

Em 2021 a ANEEL revogou a Resolução 414/2010 e, em substituição, publicou Resolução Normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021, que reúne em uma só norma o conteúdo dos regulamentos anteriores da agência relacionados aos direitos e deveres dos consumidores de energia. Em relação à IP, a resolução dedica um capítulo inteiro, contendo, ao todo, 27 artigos para regulamentar o setor. A partir do Art. 451, observa-se que o entendimento quanto a responsabilidade pelos ativos de IP foi mantida, sendo estas dos municípios.

Art. 451. A elaboração de projeto, a implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública são de responsabilidade do poder público municipal.

§ 1º A distribuidora pode prestar os serviços dispostos no caput mediante celebração de contrato específico para tal fim, ficando a pessoa jurídica de direito público responsável pelas despesas decorrentes. [6]

Outro ponto que cabe destaque se refere ao cadastro de pontos de IP. De acordo com Echevarría et al. [14] e Júnior et al, [15] o cadastramento é de vital importância para dimensionar o valor das despesas com energia elétrica e contribui para otimizar a fiscalização do faturamento junto à concessionária. A falta de um cadastro atualizado dificulta a estimação do potencial de eficiência energética da IP do município em projetos de efficientização. Nesse sentido, a nova resolução aborda esse tópico por meio de 4 artigos na Seção IV, estabelecendo prazos para a atualização cadastral e recomendado a integração dos cadastros do poder público municipal com os da distribuidora [6].

2.3 Comparação das Tecnologias de IP

De acordo com dados do anuário estatístico de 2023 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [25], em um período de 10 anos a média de consumo na IP foi de cerca de 14,3 TWh, sendo que a tarifa média em R\$/MWh cresceu 254%, passando de R\$161,00/MWh em 2013 para R\$409,00/MWh em 2022. Em 2008 haviam cerca de 14,7 milhões de pontos de iluminação, já em 2023, estima-se cerca de 18 milhões de pontos [7], [12]. A Tabela 1 mostra a evolução do consumo por região geográfica e da tarifa média nesse intervalo de tempo.

Tabela 1 - Evolução do consumo e da tarifa média de IP por região de 2013 a 2022.

Ano	Consumo por Região (TWh)					Total (TWh)	Tarifa Média (R\$/MWh)
	SE	NE	S	CO	N		
2013	5.950	3.044	2.224	1.458	836	13.512	161
2014	6.113	3.199	2.313	1.510	908	14.043	179
2015	6.364	3.330	2.359	2.290	991	15.333	253
2016	6.351	3.476	2.446	1.686	1.075	15.035	259
2017	6.407	3.727	2.518	1.755	1.036	15.443	269
2018	6.555	3.706	2.575	1.777	1.078	15.690	307
2019	6.569	3.870	2.606	1.716	1.084	15.845	326
2020	6.223	3.932	2.541	1.678	1.089	15.483	321
2021	4.817	3.988	2.465	1.705	1.059	14.034	403
2022	5.487	3.779	2.409	1.649	1.033	14.358	409

Fonte: Elaboração própria com dados de [25].

Diante desse cenário, é necessário buscar soluções com o propósito de aumentar a eficiência energética do parque de iluminação pública. Por meio de programas de incentivo visando o consumo eficiente, os sistemas de IP no Brasil vêm passando por transformações em relação a sua composição. A Figura 6 mostra a evolução da composição do sistema de IP brasileiro ao longo de três décadas. Os dados de 2023 foram obtidos a partir de uma projeção realizada com a metodologia apresentada em [2], onde, como composição inicial do parque de IP, foram utilizados os dados apresentados em [1]. A Tabela 27, localizada no Apêndice B, mostra a projeção realizada.

Dado o contexto do desenvolvimento do setor de IP no cenário nacional, critérios relacionados ao desempenho e à qualidade de energia elétrica (QEE) podem ser utilizados para comparar as tecnologias disponíveis no mercado, sendo eles: a eficiência energética, o fluxo luminoso, o índice de reprodução de cor, a vida útil dos dispositivos, o fator de potência e correntes harmônicas. Nesse sentido, o Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense (LabLux – UFF) conduziu alguns estudos relacionados a esse tema [26]–[28].

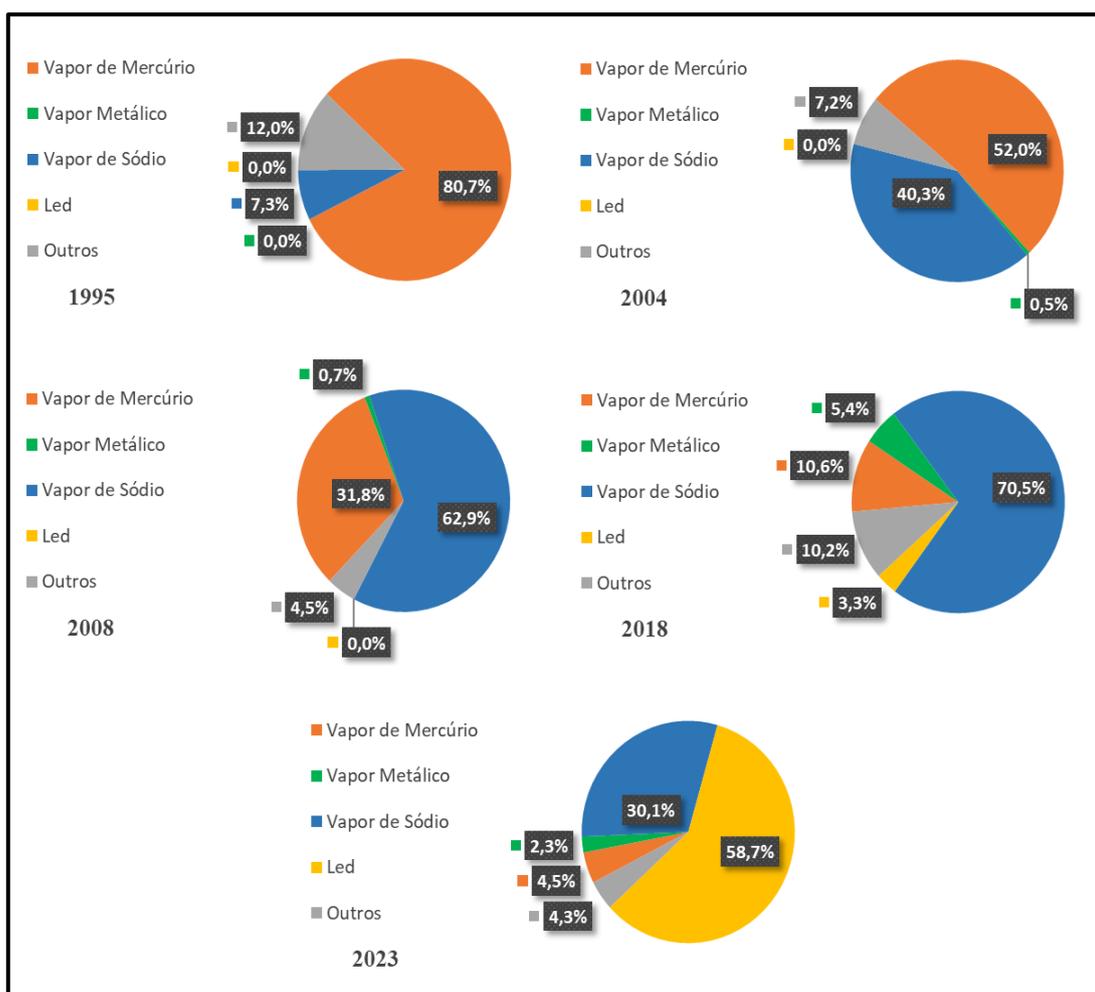


Figura 6 - Composição do sistema de IP brasileiro no período de 1995 a 2023.
Fonte: Elaboração própria com dados de [1], [2], [12].

2.3.1 Tecnologias Empregadas

Antes de realizar uma comparação entre as características elétricas e fotométricas das tecnologias atualmente empregadas, lâmpadas de descarga e luminárias de LED, é fundamental compreender os princípios de funcionamento de cada uma delas.

2.3.1.1 Lâmpadas Vapor de Mercúrio em Alta Pressão

Durante muito tempo, as lâmpadas vapor de mercúrio foram a tecnologia predominante no país. Com a criação do PROCEL em 1985, houve um forte incentivo a substituição de lâmpadas incandescentes e mistas por lâmpadas vapor de mercúrio, consolidando a predominância dessa tecnologia durante as décadas de 80 e 90 [12].

Essas lâmpadas são constituídas por um tubo que contém gases, como argônio ou outro gás inerte, e vapor de mercúrio sob pressão, nos quais se estabelece um arco elétrico. Para estabelecer o arco elétrico, é necessário que uma corrente elétrica percorra os eletrodos, fazendo-os emitir elétrons livres que percorrerão o tubo de descarga até o eletrodo oposto. Ao percorrer esse caminho ao longo do tubo, esses elétrons se chocam com os átomos do vapor de mercúrio, retirando elétrons desses átomos de órbitas mais internas para as mais externas. Quando esse elétron retorna à órbita original, ocorre a emissão de um fóton. Essa energia radiante é emitida na faixa do ultravioleta, que é convertida no espectro visível da luz somente após passar pela camada interna de material fluorescente [12]. A Figura 7 representa esquematicamente uma lâmpada vapor de mercúrio.

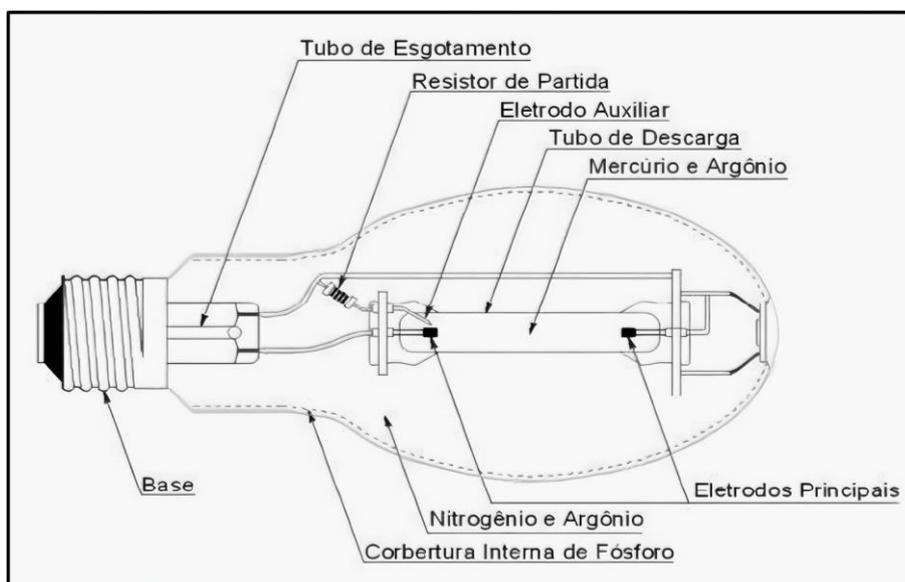


Figura 7 - Lâmpada vapor de mercúrio em alta pressão.

Fonte: [12].

Outro elemento também presente, conforme se observa na Figura 7, se trata do eletrodo auxiliar. Também chamado de eletrodo de partida, esse elemento é conectado em série com um resistor de partida, que está fora do tubo de descarga. Uma vez que a tensão de alimentação, tipicamente entre 127V e 220V, não é o suficiente para iniciar a partida, a

função desses elementos é de permitir a ignição da lâmpada, descartando, dessa forma, a necessidade de se utilizar um ignitor externo, como no caso das LVS. A partida ocorre devido ao menor espaço entre o eletrodo principal e auxiliar. Dessa forma, ao aplicar a tensão de alimentação, ocorre uma descarga inicial entre esses elementos, limitada pela resistência de partida em série. Em seguida, essa descarga se expande, provocando a descarga entre os eletrodos principais. Com o gradual aquecimento dos gases e aumento da pressão, o fluxo luminoso vai crescendo até atingir o seu máximo após cerca de 4 minutos. [12]

Esse tipo de lâmpada, assim como todas as lâmpadas de descarga, necessita da utilização de um reator para auxiliar na partida e no controle e estabilização da corrente. Visando a correção do baixo fator de potência do reator, utiliza-se um capacitor em paralelo com a lâmpada e o reator, reduzindo, assim, as perdas do sistema [12]. A Figura 8 representa o circuito do conjunto descrito.

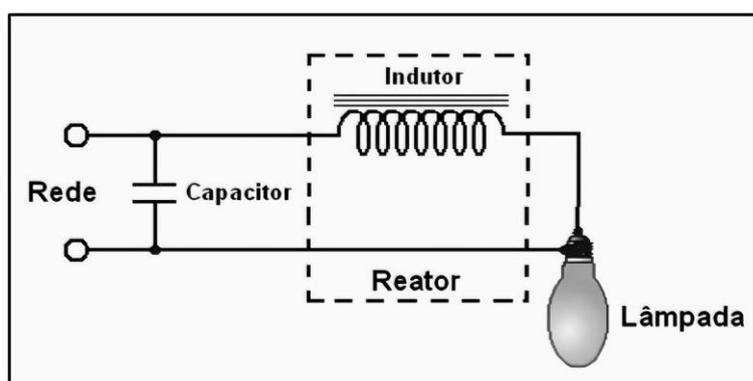


Figura 8 - Circuito típico para o funcionamento de uma lâmpada vapor de mercúrio.
Fonte: [12].

2.3.1.2 Lâmpadas Vapor de Sódio em Alta Pressão

Apesar de ter surgido em 1955 e com funcionamento semelhante ao das outras lâmpadas de descarga, o uso massificado das LVS ocorreu no Brasil, como ficou demonstrado na Figura 6, apenas após 1995, em substituição às lâmpadas vapor de mercúrio devido a sua melhor eficiência luminosa e vida útil [12].

Essas lâmpadas são constituídas por um tubo de descarga comprido e estreito, feito de óxido de alumínio translúcido, um material cerâmico capaz de suportar altas pressões e temperaturas (até 1000 °C). Eletrodos de nióbio estão localizados em cada extremidade dentro do tubo, cujo meio é preenchido por gás inerte (xenônio ou argônio), vapor de mercúrio e vapor metálico. O tubo de descarga fica dentro de um bulbo externo de vidro

tubular ou ovoide, cujo meio pode ser preenchido com nitrogênio e argônio para reduzir as perdas de calor com o meio externo, dessa forma, aumentando a pressão no interior do tubo de descarga, a eficiência da lâmpada e protegendo as partes metálicas contra a oxidação [12]. A Figura 9 representa esquematicamente uma LVS.

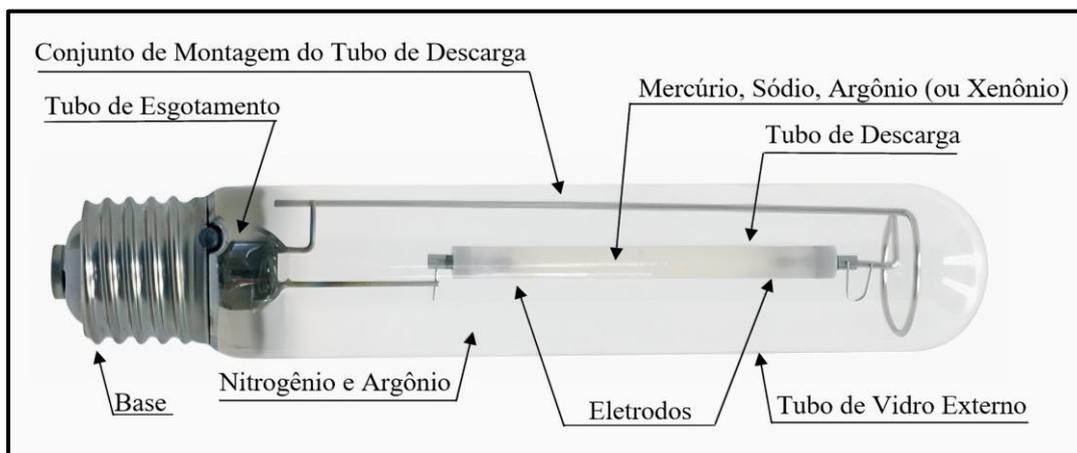


Figura 9 - Lâmpada LVS.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 10 mostra o circuito típico para o funcionamento desse tipo de tecnologia. O acionamento também é realizado por meio de um reator, no entanto, dada a inexistência de um elemento interno à lâmpada para a sua ignição, é necessário a utilização de um ignitor externo para dar a partida. Esse elemento é responsável por dar um pulso inicial de alta tensão – que varia de 1,5 kV a 5 kV dependendo da potência da lâmpada – para ionizar o gás no interior do tubo de descarga, estabelecendo, assim, o arco elétrico. Após o estabelecimento do arco elétrico, a lâmpada precisa de cerca de 5 minutos para atingir o seu fluxo luminoso nominal. Assim como para as lâmpadas vapor de mercúrio, um capacitor é utilizado em paralelo ao conjunto no intuito de corrigir o fator de potência. [12]

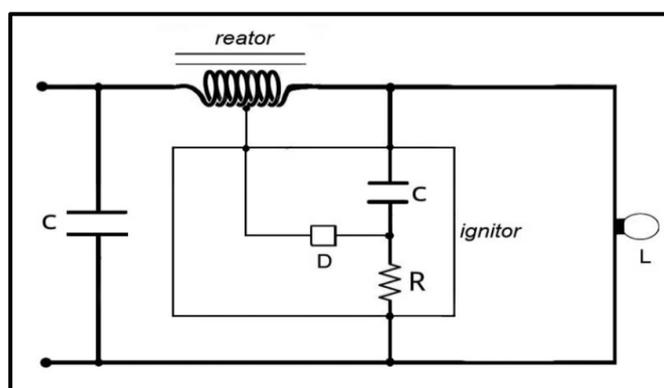


Figura 10 - Circuito típico para o funcionamento de uma LVS.

Fonte: [12].

2.3.1.3 Lâmpadas Vapor Metálico

Com surgimento em 1964, essa lâmpada tem o funcionamento semelhante ao das lâmpadas vapor de mercúrio e LVS, sendo também uma lâmpada de descarga em alta pressão, porém com uma mistura de gases e vapores que lhe conferem maior temperatura de cor e reprodução de cor. Em relação à constituição, as LVM se diferenciam das LVS em seu tubo de descarga. Nesse tipo de lâmpada, o interior do tubo de descarga é constituído por argônio, mercúrio e uma mistura de iodetos metálicos [12]. A Figura 11 representa esquematicamente uma LVM.

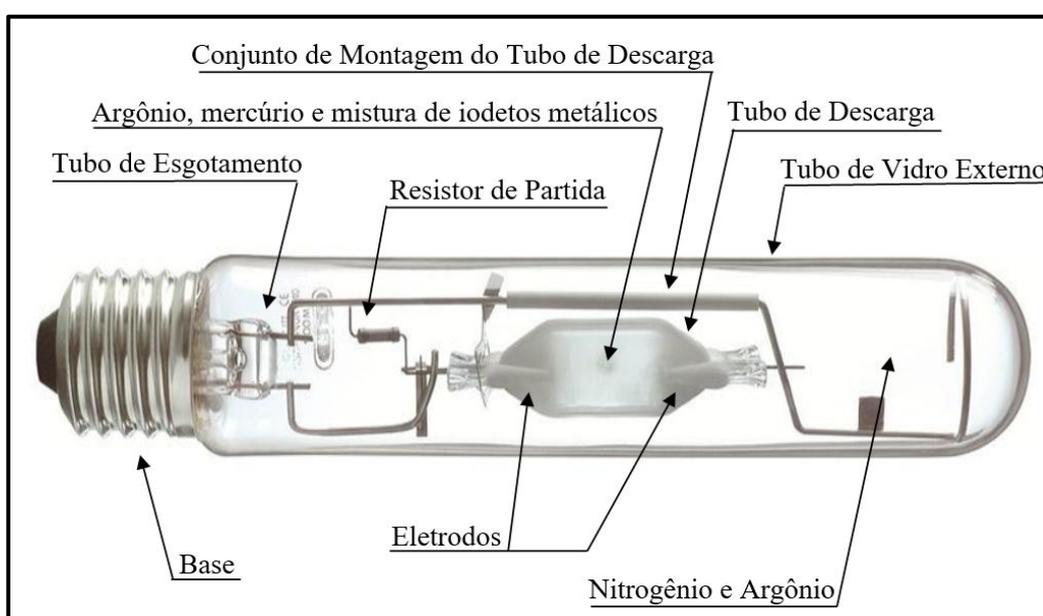


Figura 11 - Lâmpada LVM.

Fonte: Elaboração própria.

Em relação ao acionamento deste tipo de lâmpada, também se utiliza um reator, no entanto, há duas situações a serem consideradas para a sua partida. Alguns modelos de menor potência possuem resistor de partida localizado dentro da lâmpada, dispensando, assim, a utilização de um ignitor externo. Nos outros casos o ignitor é o elemento responsável por dar a partida, estabelecendo o arco elétrico no interior do tubo de descarga. Após a partida, é preciso de 5 a 10 minutos para que o fluxo luminoso máximo seja atingido [12]. A Figura 12 demonstra o circuito das duas situações descritas.

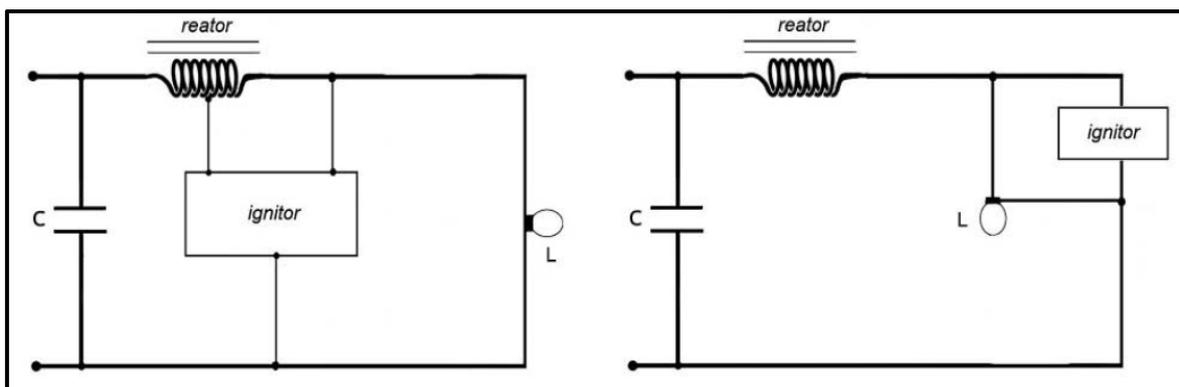


Figura 12 - Circuitos típicos de acionamento da LVM com ignitor.

Fonte: [12].

2.3.1.4 Luminárias LED

Passando por diversas transformações desde o descobrimento dos efeitos da eletroluminescência em diodos em 1907, a tecnologia LED para iluminação de ambientes só começou a ser concebida a partir do desenvolvimento dos LED de alto brilho e dos LED de potência no final da década de 90. Com correntes nominais típicas de 20 mA, os LEDs de alto brilho trabalham em baixos níveis de potência, já os LED de potência, com correntes nominais típicas de 300 mA até 1,5 A, trabalham com níveis de potência maiores e possuem maior fluxo luminoso e eficiência luminosa, dessa forma, sendo os mais indicados para aplicação na IP [12], [27].

Os LEDs presentes nas lâmpadas e luminárias são construídos com semicondutores dopados, formando uma junção P-N assim como ocorre em um diodo convencional. Os semicondutores do tipo N são dopados com impurezas de modo a criar um cristal com excesso de elétrons, enquanto os semicondutores do tipo P são dopados de forma que se tenha falta de elétrons, interpretada como um excesso de lacunas. Quando uma corrente elétrica atravessa o cristal na direção da polarização direta, ocorre um fluxo de elétrons da região N para a região P, ao mesmo tempo em que ocorre um movimento de lacunas da região P para a região N. Quando um elétron migra da região N para a região P, ele se desloca de um nível de energia superior (banda de condução) para um nível inferior (banda de valência), recombinando-se com uma lacuna na região P. Nesse processo de recombinação, que ocorre na junção semicondutora, o elétron libera energia na forma de um fóton, emitindo luz. O comprimento de onda do fóton emitido, ou seja, a cor da luz emitida, é dado pela

diferença entre os níveis de energia, que varia de acordo com o material semiconductor utilizado [12], [29]. A Figura 13 demonstra o princípio de funcionamento de um LED.

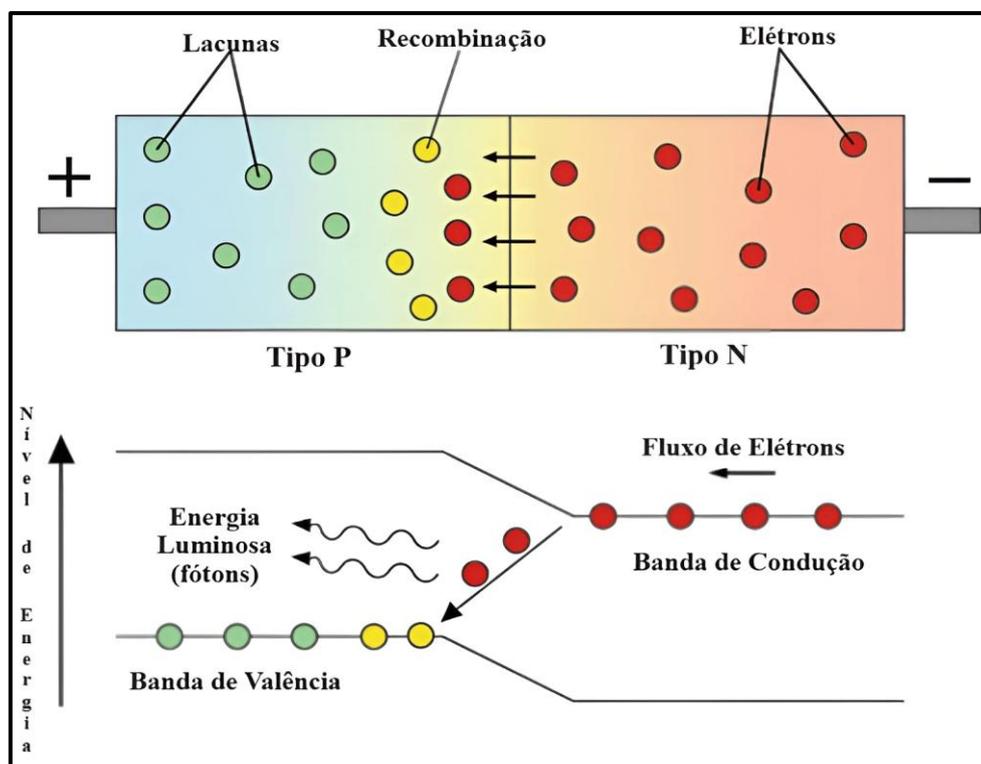


Figura 13 - Princípio de funcionamento de um LED.

Fonte: Adaptado a partir de [29].

Com a finalidade de evitar o superaquecimento do componente e, conseqüentemente, sua vida útil, o LED de potência é construído em *chips*. O *chip* é um componente que é envolvido em um encapsulamento plástico e depositado sobre um dissipador térmico de cobre ou alumínio. Essa estrutura conduz o calor produzido na pastilha semicondutora para uma superfície com melhor capacidade de dissipação para o ambiente externo. Visando maximizar a extração da luz do LED, diversos materiais, como as lentes, são utilizados sobre o *chip*, melhorando a eficiência luminosa da lâmpada ou luminária. [12]

O LED, sendo um dispositivo monocromático, emite luz em comprimento de onda definidos, sendo, assim, incapazes de emitir a cor branca a partir de apenas um único cristal semiconductor. Dessa forma, para produzir a luz branca são utilizados essencialmente dois métodos, o tricromático RGB (*Red, Green, Blue*) e o dicromático de conversão com fósforo. No método tricromático são empregados três *chips*, cada um emitindo comprimentos de onda relativos ao vermelho, verde e azul, resultando, assim, na cor branca. Já no método dicromático de conversão com fósforo utiliza-se apenas um *chip*, que emite a cor azul. Esse *chip* é revestido com uma camada de fósforo que converte parte da luz azul para

comprimentos de ondas maiores, próximas ao amarelo, em um fenômeno conhecido como fosforescência. O conjunto dos comprimentos de onda emitidos após a conversão resulta na luz branca. A quantidade de fósforo influencia a luz resultante, de forma que LEDs com maior quantidade de fósforo apresentam uma cor mais amarelada, enquanto, caso contrário, apresentam uma cor mais azulada. Atualmente, a maioria dos LEDs empregados para a iluminação utilizam a técnica de conversão com fósforo [12]. A Figura 14 apresenta os casos que utilizam a técnica de conversão com fósforo. A temperatura de cor das amostras é de 3000K, 4000K e 6500K respectivamente.



Figura 14 – Técnica de conversão por fósforo utilizado em lâmpadas LED.

Fonte: Elaboração própria.

Em relação à alimentação, o LED apresenta maior eficiência quando alimentado em corrente contínua constante. Visando proporcionar esse cenário, são utilizados dispositivos como os *drivers*. Esses dispositivos, além de alimentar os LEDs com níveis adequados de corrente contínua constante, devem ser capazes de garantir imunidade à interferência eletromagnética (EMI), alto fator de potência e baixa distorção harmônica de corrente [12]. A Figura 15 apresenta um esquema conceitual da estrutura de um *driver*. Nem todos os *drivers* apresentarão todos os estágios, como o filtro de linha EMI, para filtrar componentes harmônicas e o estágio de correção de fator de potência (PFC).

Uma luminária LED é um sistema composto, além dos próprios LEDs, pela estrutura óptica, de dissipação térmica e pelo *driver*. Caso um desses elementos não seja bem projetado, a luminária poderá perder eficiência e durabilidade, fazendo com que esse sistema

seja mais complexo do que as outras tecnologias abordadas [12]. A Figura 16 apresenta esquematicamente a estrutura de uma luminária LED.

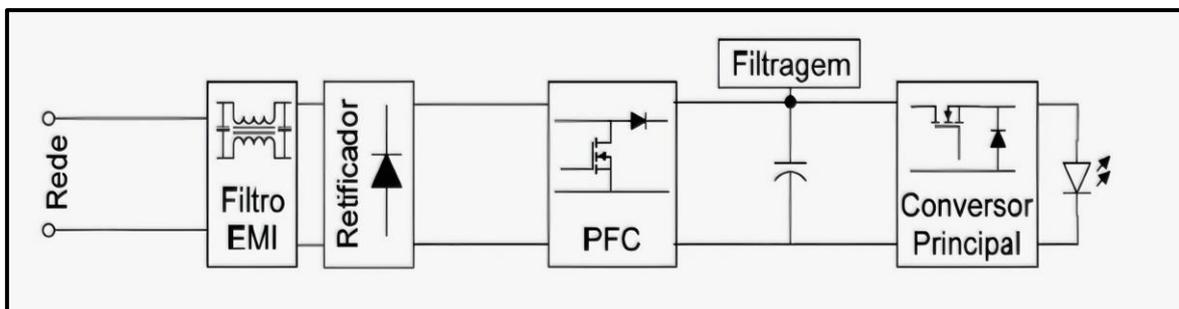


Figura 15 - Esquema conceitual da estrutura de um driver.

Fonte: Adaptado a partir de [12].

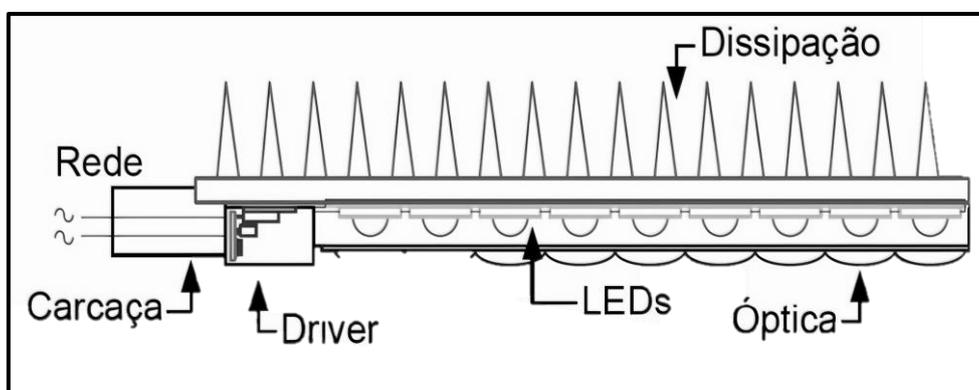


Figura 16 - Estrutura de uma luminária LED.

Fonte: [12].

2.3.2 Eficiência Energética

A eficiência energética é determinada pela relação entre o trabalho realizado e a energia gasta para o mesmo, sendo este um parâmetro essencial como critério de desempenho de um equipamento. Nos sistemas de iluminação, esse valor é obtido a partir do fluxo luminoso em função da potência demandada, sendo, então, medido em lúmen/watt. Em relação aos sistemas de IP, geralmente são consideradas de três a quatro tipos de lâmpadas em grande parte dos estudos. A partir da Tabela 2 constata-se que a tecnologia LED possui eficiência superior as demais. Apesar da alta eficiência apresentada pelas tecnologias LVS e LVM, deve-se salientar que apenas o elemento lâmpada é considerado, não sendo contemplado, portanto, a potência gasta pelo reator para mantê-la em funcionamento. De acordo com os resultados apresentados por Pereira et al. [27], como as lâmpadas de descarga necessitam de um reator para a sua correta operação, a demanda de

potência do conjunto é maior do que a declarada pela lâmpada, fazendo com que, ao final, a eficiência seja menor do que o apresentado.

Tabela 2 - Eficiência energética para diferentes tecnologias de iluminação pública.

Tecnologia	Eficiência Energética (lm/W)
Lâmpada Vapor de Mercúrio	35 – 65
Lâmpada Vapor de Sódio	80 – 150
Lâmpada Vapor Metálico	70 – 130
Luminária LED	70 – 160

Fonte: Elaboração própria com dados de [30].

2.3.3 Fluxo Luminoso

O fluxo luminoso é definido como a quantidade de energia radiada a partir de uma fonte luminosa por unidade de tempo dentro do espectro visível ao olho humano, com comprimento de onda estando na faixa de 380nm até 760nm [31]. Tendo dimensão de potência, o fluxo radiante, sendo esta toda a radiação emitida por uma fonte abrangendo todo o espectro eletromagnético, é medido em watts, ao passo que o fluxo luminoso é medido em lumens (lm). Essa diferença se deve ao fato do fluxo luminoso estar associado ao espectro da visão humana, ou seja, todo o fluxo radiante capaz de causar sensibilidade visual nas células especializadas contidas na retina do olho humano [12]. O fluxo luminoso é definido segundo a equação (1).

$$\Phi = k_m \int_{380}^{780} \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

onde:

- $\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ é a distribuição espectral do fluxo radiante, em W/nm;
- $V(\lambda)$ é a eficácia luminosa espectral para a visão humana;
- k_m é o valor do watt-luminoso = 683 lm/W para a visão fotópica;
- λ é o comprimento de onda da radiação, em nm; e
- Φ é o fluxo luminoso, em lm;

Sob uma iluminação elevada, como à luz do sol do meio-dia por exemplo, a sensibilidade visual máxima ocorre para o comprimento de onda de 555 nm, que corresponde a um tom amarelo-esverdeado. Dada uma radiação monocromática de 1 W nesse comprimento de onda e o valor do coeficiente k_m igual a 683 lm/W, denota-se que essa radiação equivale a 683 lumens, o que corresponde ao máximo rendimento que uma fonte luminosa pode fornecer. É possível compreender melhor matematicamente o fluxo luminoso por meio do gráfico da Figura 17, onde a curva preta representa a distribuição espectral de um LED branco e a laranja a curva de resposta relativa do olho humano aos comprimentos de onda das radiações. Nesse sentido, o fluxo luminoso, conforme a equação (1), pode ser interpretado como a área em comum sob as duas curvas, representada pela região escura do gráfico [12].

Em relação a IP, a Tabela 3 mostra um comparativo do fluxo luminoso de três tipos de lâmpadas disponíveis no mercado brasileiro nas potências de 100 W e 150 W, sendo essas potências típicas. O levantamento foi realizado a partir dos dados fornecidos no site dos fabricantes, sendo pesquisados seis no total. Por questões éticas as marcas utilizadas não serão divulgadas. Em ambas as potências, a tecnologia LED é a que possui o maior fluxo luminoso.

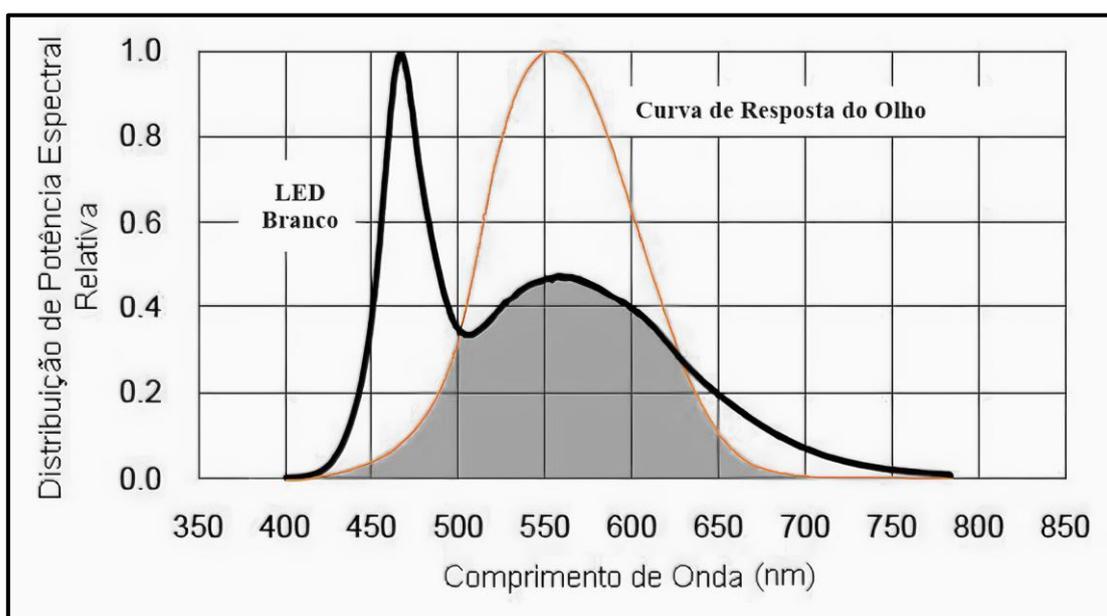


Figura 17 - Representação gráfica do fluxo luminoso.

Fonte: Adaptado a partir de [12].

Tabela 3 - Fluxo luminoso de diferentes tecnologias de IP.

Tecnologia	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)
Lâmpada Vapor de Sódio	100	8.700 – 10800
	150	15.300 – 16.050
Lâmpada Vapor Metálico	100	8.000 – 10.000
	150	9.000 – 12.750
Luminária LED	100	11.000 – 17.000
	150	16.500 – 22.500

Fonte: Elaboração própria.

2.3.4 Índice de Reprodução de Cor

A cor apresentada por um objeto pode variar de acordo com a fonte luminosa pela qual ele está sendo iluminado. As cores estão associadas ao comprimento de onda da radiação eletromagnética na região do espectro visível, que varia entre 380 e 780 nm [12]. A Figura 18 retrata as cores percebidas de acordo com o comprimento de onda emitido.

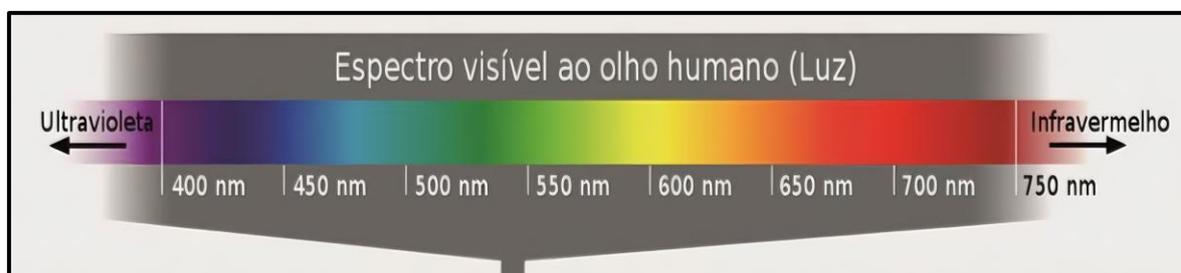


Figura 18 - Espectro visível ao olho humano e as cores percebidas.

Fonte: Adaptado a partir de [12].

Antes de realizar uma comparação caracterizando a qualidade da luz produzida por diferentes tecnologias, é necessário entender dois importantes conceitos, sendo elas a Temperatura de Cor Correlata (TCC) e o Índice de Reprodução de Cores (IRC).

A TCC³ é definida como “a temperatura do radiador de corpo negro, cuja cor percebida mais se assemelha à da lâmpada de descarga”. A cor de um corpo incandescente varia à medida que sua temperatura sobe, atingindo respectivamente as cores vermelho, laranja, amarelo, branco e, finalmente, azul, como demonstrado na Figura 19. Sendo assim,

³ Temperatura de Cor Correlata

uma lâmpada com cor dita fria tem uma TCC⁴ em torno de 6500K e é percebida como uma fonte de luz branca, com uma leve tendência para o azul, enquanto uma lâmpada com cor dito quente apresenta uma TCC⁴ de cerca de 2700K e possui um tom amarelado. [32]

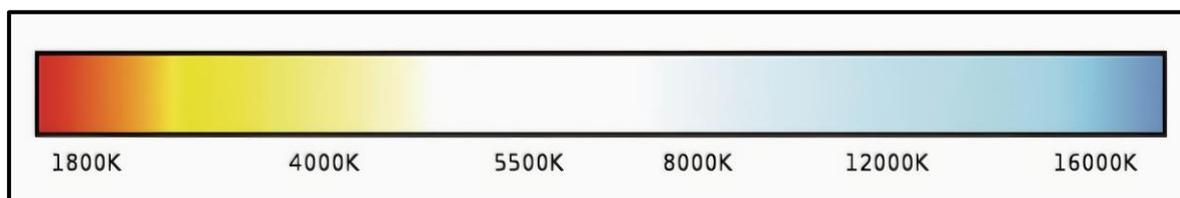


Figura 19 - Temperatura de cor correlata.

Fonte: [12].

O IRC de uma fonte de luz “é o efeito que a fonte tem na aparência da cor dos objetos quando comparada à sua aparência sob uma fonte de referência de TCC⁴ igual”. Os valores medidos são inferiores a 100, sendo a luz solar a referência utilizada possuindo o índice 100. Portanto um IRC mais alto significa melhor fidelidade na reprodução de cores, com índices entre 75 e 100 considerados excelentes, entre 55 e 75 moderadas e entre 0 e 55 ruins. Dentre as tecnologias empregadas na iluminação, a lâmpada incandescente é a que apresenta o melhor IRC, com índices próximos da referência [12], [27], [32]. A Tabela 4 apresenta a fidelidade na reprodução de cor de diferentes tecnologias utilizadas na IP.

Tabela 4 - Índice de reprodução de cor em diferentes tecnologias de IP.

Tecnologia	Índice de Reprodução de Cor (%)
Lâmpada Vapor de Mercúrio	35 – 65
Lâmpada Vapor de Sódio	21 – 24
Lâmpada Vapor Metálico	65 – 85
Luminária LED	70 – 90+

Fonte: Elaboração própria com dados de [2], [27], [30].

A Figura 20, 21, 22 e 23 ilustram a distribuição do espectro luminoso típico das tecnologias vapor de mercúrio, LVS, LVM e LED, respectivamente, indicando a potência emitida para cada comprimento de onda. Para uma lâmpada vapor de mercúrio com TCC⁴ de 4000K os principais picos estão localizados nas cores azul, verde e laranja, justificando o

⁴ Temperatura de Cor Correlata

baixo IRC apresentado por essa tecnologia (Figura 20). Para uma LVS com TCC⁵ de 2000K observa-se picos apenas nas cores amarela e laranja, justificando a péssima reprodução de cores dessa tecnologia (Figura 21). Já em uma LVM com TCC⁵ de 4500K, observa-se picos em diversas faixas, com destaque para as cores azul, verde, amarelo e laranja, dessa forma, aumentando a qualidade da reprodução das cores (Figura 22). Em luminárias LED com TCC⁵ de 4000K, observa-se uma melhor distribuição do espectro, apresentando uma faixa bem distribuída com predominância para as cores azul e laranja, justificando o maior IRC dessa tecnologia (Figura 23). Se tratando da IP, as figuras demonstram o melhor desempenho para a reprodução de cor das luminárias LED e LVM em relação às lâmpadas vapor de mercúrio e LVS. A curva da Figura 21, 22 e 23 foram obtidas a partir do espectro radiômetro HAAS-2000 da Everfine.

2.3.5 Vida Útil

A vida útil do equipamento possui definições diferentes a depender da tecnologia empregada. Para lâmpadas de descarga, a vida útil é definida como o tempo médio em horas em que o equipamento poderá operar sem apresentar falhas. Para produtos de LED o tempo de vida útil estimado é normalmente dado em termos de expectativa de horas de operação até que o fluxo luminoso do equipamento diminua a 70 % do seu valor inicial (denotado L70) [10]. A partir de uma comparação da vida útil de diferentes tecnologias para uso na IP, observa-se que a luminária LED também se sobressai, como demonstrado pela Tabela 5.

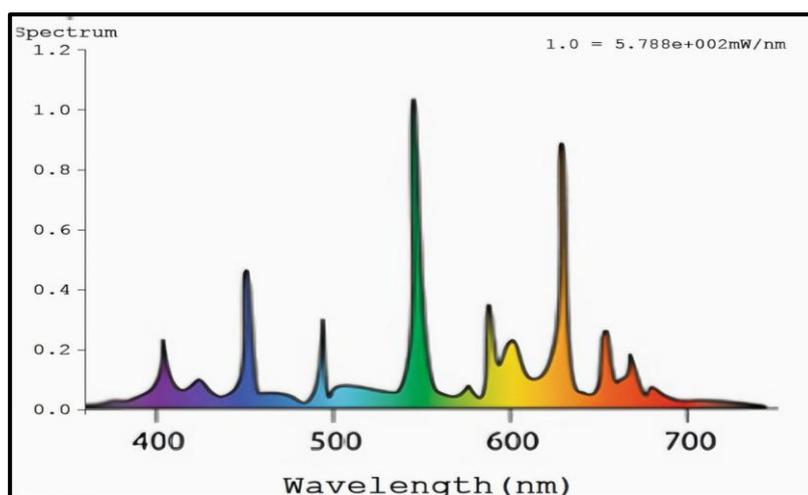


Figura 20 - Espectro luminoso típico de uma lâmpada vapor de mercúrio.

Fonte: Adaptado a partir de [29].

⁵ Temperatura de Cor Correlata

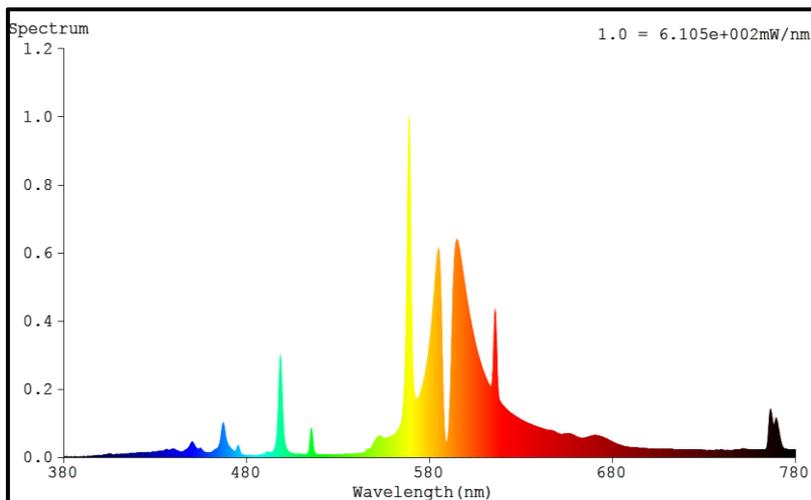


Figura 21 - Espectro luminoso típico de uma LVS.
 Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

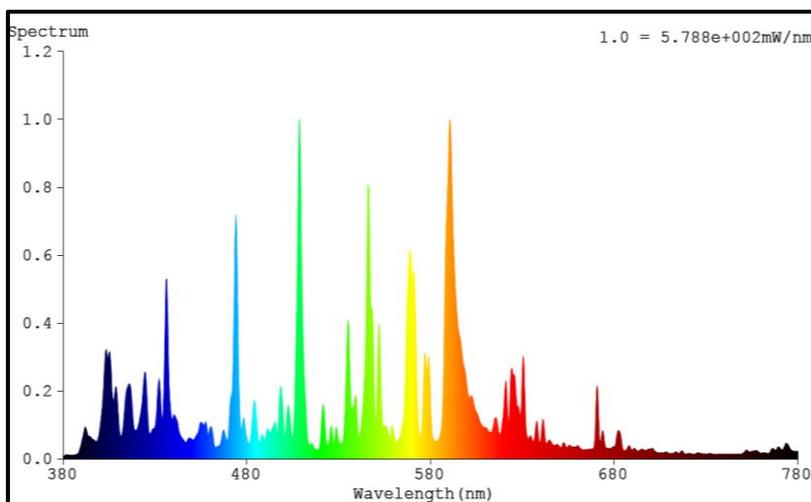


Figura 22 - Espectro luminoso típico de uma LVM.
 Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

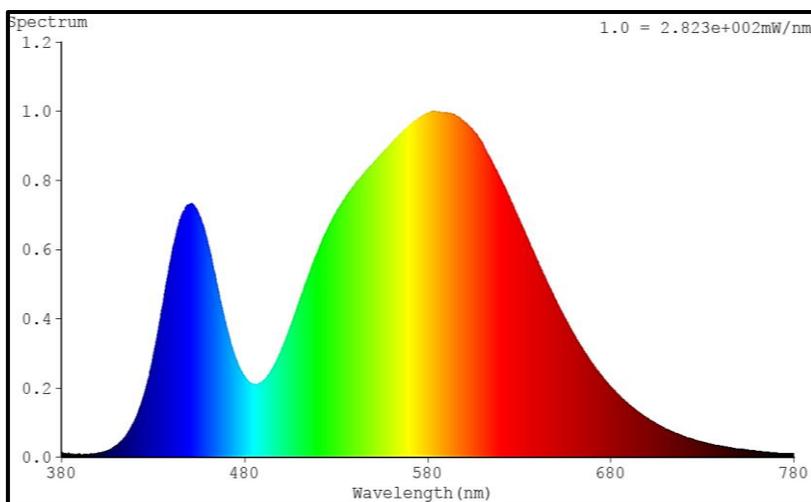


Figura 23 - Espectro luminoso típico de uma luminária LED.
 Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Tabela 5 - Vida útil em diferentes tecnologias de IP.

Tecnologia	Vida Útil (h)
Lâmpada Vapor de Mercúrio	9.000 – 20.000
Lâmpada Vapor de Sódio	10.000 – 32.000
Lâmpada Vapor Metálico	8.000 – 20.000
Luminária LED	40.000 – 90.000

Fonte: Elaboração própria com dados de [2], [29], [30].

2.3.6 Fator de Potência e Distorção Harmônica

A presença de correntes harmônicas pode ser prejudicial para o funcionamento dos dispositivos eletrônicos, causando, dentre outros efeitos, a perdas de eficiência devido ao aumento da corrente, sobre aquecimento, diminuição do fator de potência, diminuição da vida útil e aumento das perdas técnicas no sistema. Nesse sentido, [31] demonstra, a partir de resultados experimentais, a contribuição das correntes harmônicas para as perdas de desempenho e QEE em lâmpadas de tecnologia LED.

Dado a presença de componentes não lineares, como os reatores para as lâmpadas de descarga e os *drivers* para a tecnologia LED, são introduzidas, dessa forma, correntes harmônicas no sistema. Comparando as tecnologias utilizadas na IP, como demonstrado na Tabela 6, observa-se que a luminária LED possui fator de potência maior e menor índice de distorção harmônica. De acordo com Pereira et al. [27], os resultados para lâmpadas de descarga são explicados devido ao alto fator de potência dos reatores utilizados.

Tabela 6 - Fator de potência e distorção harmônica total em tecnologias de IP.

Tecnologia	Fator de Potência	Distorção Harmônica Total (%)
Lâmpada Vapor de Sódio	0,9685	25,28
Luminária LED	0,9750	13,23

Fonte: Elaboração própria com dados de [33].

No sentido de fazer uma análise comparativa entre as luminárias LED e as LVS, [28] e [33] demonstraram de forma mais clara a superioridade da tecnologia LED em relação à QEE, comparando, além do fator de potência e a distorção harmônica total de corrente, o nível das correntes harmônicas com suas respectivas ordens. Apesar da luminária LED funcionar nas tensões 127V e 220V e, ainda permitir a dimerização em alguns casos, [26]

ainda aponta que apesar da melhora do fator de potência e diminuição da distorção harmônica em tensões menores, a corrente demandada aumenta significativamente, podendo causar o sobreaquecimento dos componentes e a diminuição da vida útil. Além disso, o aumento da corrente acarreta o aumento das perdas técnicas no sistema de IP.

2.3.7 Custos Envolvidos nos Sistemas de IP

O *retrofit* tem sido a forma mais comum de promover a redução no consumo de energia com a IP. Atualmente a substituição das lâmpadas de descarga por luminárias LED, além de promover uma economia maior, tem melhorado a percepção do usuário quanto à área iluminada das vias públicas devido ao seu maior IRC. A Figura 24 mostra alguns exemplos de *retrofit*.

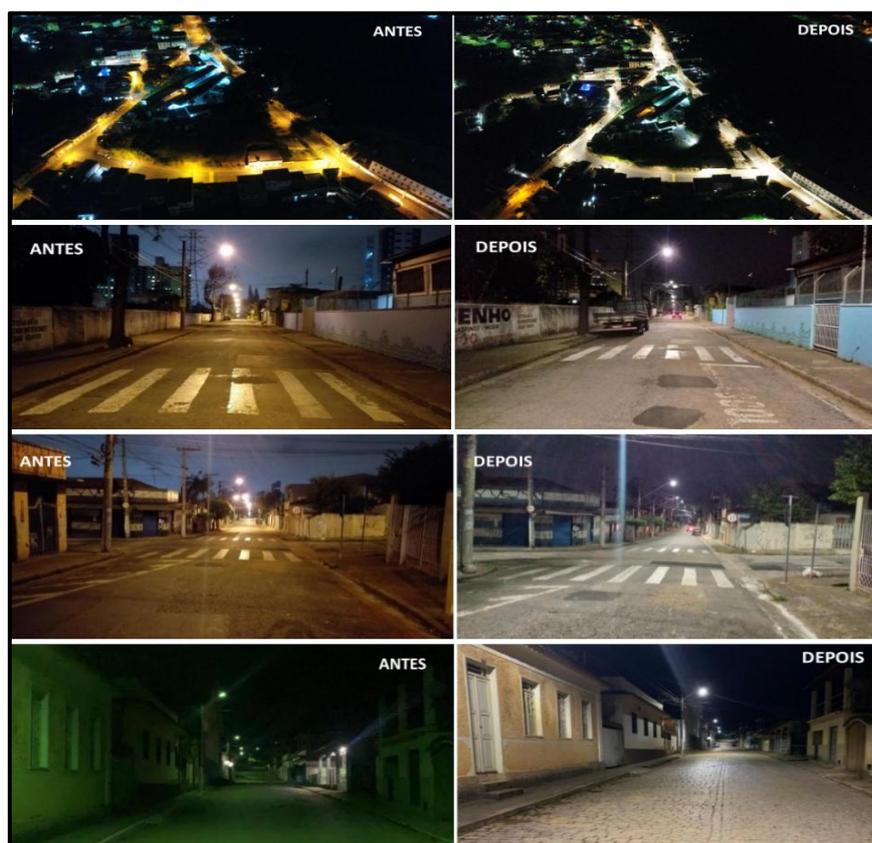


Figura 24 - Exemplos de *retrofit*.

Fonte: Adaptado a partir de [21].

Segundo Bernades [30], dos custos envolvidos com a IP com tecnologia de descarga ao longo de 25 anos, 85% estão relacionados à manutenção e operação e 15% ao custo de capital. Já as luminárias LED proporcionam um custo menor de manutenção e operação

devido a sua maior eficiência e tempo de vida útil, representando uma economia de 40% a 50%. Nesse sentido, a Tabela 7 mostra um comparativo do gasto mensal das tecnologias empregadas na IP, evidenciando novamente as vantagens da tecnologia LED. Os valores são aproximados, pois foi considerado o tempo de 11h (a média nacional é de 11h27min [13]) diárias de utilização dos equipamentos. Foi considerada a tarifa média de 2022 do anuário estatístico da EPE [25], sendo 409 R\$/MWh. Para tornar os gastos mais evidentes, foram consideradas 1000 unidades de cada tecnologia. Segundo Bernades et al. [30], as potências apresentadas são equivalentes para o mesmo fluxo luminoso.

As despesas relacionadas à substituição dos ativos de IP é um fator que também deve ser considerado. No âmbito do programa RELUZ, a Tabela 8 mostra as principais substituições de potência realizadas na 1ª Chamada Pública do programa, em que as lâmpadas de descarga de 250 W foram substituídas em maior quantidade por outras de tecnologia LED com menor potência, totalizando 7.830 ou 53,8% do total de substituições [21]. Em estudo técnico realizado por [34] para a prefeitura da cidade do Rio de Janeiro (RJ), foram considerados a taxa de falha e o custo médio dos ativos de IP. Na Tabela 9 são apresentados os custos com as substituições dos ativos de IP, onde apesar da tecnologia LED ainda ser consideravelmente mais cara, para a mesma é estimada uma taxa de falha bem menor.

Tabela 7 - Comparativo dos gastos mensais das tecnologias de IP (Luminárias equivalentes em relação ao fluxo luminoso).

Tecnologia	Potência (W)	Horas	Dias	kWh/mês	Gasto Mensal (R\$)
Lâmpada Vapor de Mercúrio	400	11	30	54,00	54.000,00
Lâmpada Vapor de Sódio	250	11	30	33,74	33.740,00
Lâmpada Vapor Metálico	250	11	30	33,74	33.740,00
Luminária LED	150	11	30	20,25	20.250,00

Fonte: Adaptado a partir de [30].

Tabela 8 - Principais substituições de potência para lâmpadas de descarga de 250 W.

Luminária	Quantidade	Total (%)
LED 150 W	2.222	28,4
LED 120W	1.345	17,2
LED 100W	1.417	18,1
LED 80 W	1.074	13,7

Fonte: Elaboração própria com dados de [21].

Tabela 9 - Taxa de falha e custo unitário médio de substituição dos ativos de IP.

Tecnologia	Taxa de Falha/mês (%)	Custo Médio/Unidade (R\$)
Lâmpada Vapor de Sódio	2,0	35
Luminária LED	0,1	738

Fonte: Adaptado a partir de [34].

2.4 Resoluções Normativas dos Equipamentos Utilizados na IP

Os sistemas de iluminação são formados por diversos componentes além das lâmpadas. No caso das lâmpadas de descarga, são utilizados reatores para seu funcionamento. Esses sistemas também incluem circuitos de comando, como os relés fotoelétricos, cuja função é acionar ou desativar as lâmpadas de acordo com o período do dia. As luminárias fazem parte do conjunto, sendo responsáveis por abrigar e fixar as lâmpadas, além de direcionar a luz emitida. Por fim, os braços de apoio sustentam as luminárias e podem ainda servir como eletrodutos para os cabos de alimentação [30]. No âmbito deste trabalho, neste subcapítulo serão abordadas apenas as Resoluções Normativas das lâmpadas e luminárias utilizadas na IP em relação aos requisitos de desempenho de QEE.

2.4.1 Regulamentação Vigente para Lâmpadas Vapor de Sódio

Com o objetivo de estabelecer os requisitos mínimos de qualidade e desempenho que devem ser atendidos por qualquer LVS para que a mesma possa ser vendida em território brasileiro, em 2010 o INMETRO publicou a Portaria nº 483, de 07 de dezembro de 2010 [35]. Em 2022 essa portaria foi revogada, sendo substituída pela Portaria nº 18, de 14 de janeiro de 2022, consolidando em um único documento o conteúdo de outras portarias relacionadas a essa matéria [36]. Deve-se salientar a Portaria 18/2022 [36] rege apenas sobre o elemento lâmpada, não considerando, dessa forma, a contribuição do reator nos critérios adotados. Os reatores possuem regulamentação própria e devem estar de acordo com a Portaria nº 454, de 01 de dezembro de 2010.

O primeiro ponto a ser considerado, item 2.3.3.2 da Portaria nº 18/2022 [36], se refere ao consumo da lâmpada durante o seu funcionamento, que não pode exceder em mais de 10% da potência nominal declarada.

A eficiência energética também recebe critérios de avaliação mínimos. A avaliação é realizada de acordo com o tipo de lâmpada (bulbo) e a potência declarada, como pode ser observado na Tabela 10, sendo permitido ainda uma variação de 10% para menos do valor médio medido em relação ao valor declarado, segundo item 2.3.4.3 da portaria [36]. No entanto, quando acoplada a uma luminária para uso na IP, os critérios adotados passam a ser os da Portaria nº 62/2022, devendo o conjunto atender aos critérios definidos nos itens 3.2.1 e 3.2.2, onde a eficiência mínima da luminária é de 70 lm/W e a medida não pode ser inferior a 90% do valor declarado e aos valores mínimos definidos na Tabela 11 [10].

Tabela 10 - Eficiência mínima por potência declarada em lm/W para lâmpadas vapor de sódio.

Tipo de Lâmpada	70 W	100 W	150 W	250 W	400 W
Ovoide	80	90	100	100	110
Tubular	85	95	102	105	115

Fonte: Adaptado a partir de [36].

Tabela 11 - Eficiência energética para luminárias com lâmpadas vapor de sódio.

Classe	Nível de Eficiência Energética (lm/W)	Valor Mínimo Aceitável Medido (lm/W)
A	≥ 90	88
B	≥ 80 e < 90	78
C	≥ 70 e < 80	68
D	< 70	-

Fonte: Adaptado a partir de [10].

O fluxo luminoso é outro parâmetro a ser avaliado, sendo determinado no item 2.3.2.2 da portaria que, durante o ensaio, a lâmpada não pode apresentar um valor inferior a 90% do fluxo luminoso nominal declarado [36].

Por fim, a vida útil do equipamento também está no escopo de avaliação. De acordo com o item 4 da portaria [36], a vida útil deve ser comprovada pelo fornecedor mediante envio de informações sobre o método utilizado para a avaliação e simulação por meio de laudos técnicos, não sendo permitido vida inferior a 24.000 horas para todas as potências.

2.4.2 Regulamentação Vigente para Luminárias LED

No âmbito da IP, as luminárias LED passaram a ser regulamentadas em 2017, quando o INMETRO publicou a Portaria nº 20, de 15 de fevereiro de 2017 [9]. Em 2022 essa portaria foi revogada, sendo substituída pela Portaria nº 62, de 17 de fevereiro de 2022, consolidando em um único documento o conteúdo de outras portarias relacionadas a essa matéria [10].

O consumo da luminária é um requisito avaliado. De acordo com o item 4.2.1 e 4.2.4 da Portaria 62/2022 [10], a potência total e a corrente de alimentação da luminária não podem exceder em mais de 10% do nominal declarado quando alimentado na tensão nominal [10].

Em relação à eficiência energética o item 4.2.5 estipula um mínimo de 68 lm/W, não sendo aceito, também, um valor inferior a 90% do declarado [37]. Além disso, o nível de eficiência é classificado em classes, como demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Eficiência energética para luminárias com tecnologia LED.

Classe	Nível de Eficiência Energética (lm/W)	Valor Mínimo Aceitável Medido (lm/W)
A	≥ 90	98
B	≥ 80 e < 90	88
C	≥ 70 e < 80	78
D	< 70	68

Fonte: Adaptado a partir de [10].

A portaria não estipula um critério em relação ao fluxo luminoso mínimo a ser declarado pelo fabricante. No entanto, no âmbito da vida útil do equipamento, o item 4.2.8 estabelece que a expectativa de vida mínima para a manutenção do fluxo luminoso de 70% é de 50.000 horas, ou seja, após esse tempo, a luminária deve apresentar pelo menos 70% do fluxo luminoso nominal declarado [10].

O IRC sendo um parâmetro em relação à qualidade de iluminação também é abordado pela norma vigente. No item 4.2.7.1 o índice de reprodução de cor geral (Ra), que caracteriza o IRC, é calculado de através da média dos índices cromáticos de R1 a R8. O valor medido de Ra não deve ser inferior a 70 [10].

O último aspecto a ser observado em relação à QEE se refere ao fator de potência e as correntes harmônicas, que são avaliados pela norma. O item 4.2.2 determina que o fator de potência mínimo deve ser maior ou igual a 0,92, e que o valor medido não pode ser inferior ao declarado por mais de 0,05 quando a luminária é alimentada com tensão de

frequência nominais. Em relação a distorção harmônica de corrente, os critérios e valores apresentados pela norma são referenciados à IEC 61000-3-2 - Limites para emissões de correntes harmônicas (equipamentos com corrente de alimentação menor ou igual a 16A por fase) [38], onde são definidos limites fixos para cada ordem harmônica até a 39ª ordem. O valor da 3ª ordem, no entanto, se baseia no fator de potência do dispositivo analisado. Os limites são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Limite das correntes harmônicas.

Ordem Harmônica (n)	Corrente Harmônica Máxima Permitida (%)
2	2
3	$30 \times fp$
5	10
7	7
9	5
11 < n < 39 (somente harmônicas ímpares)	3

Fonte: Adaptado a partir de [38].

Capítulo 3 - Cidades Inteligentes e os Sistemas de Iluminação Pública

Em 2018, havia cerca de 22 bilhões de dispositivos conectados a IoT em todo mundo. Até 2030, estima-se que esse número aumentará para cerca de 50 bilhões [39]. Um sistema IoT permite a interconexão dos diversos dispositivos, transformando-os em inteligentes ao explorar tecnologias subjacentes como: dispositivos embarcados, tecnologias de comunicação, redes de sensores, linguagens de programação e protocolos de internet [40].

Nesse capítulo serão abordados os principais conceitos de cidades inteligentes e IoT voltados para os sistemas de IP, alguns dos microcontroladores que são utilizados e os tipos de comunicação sem fio.

3.1 IoT e as Cidades Inteligentes

O uso de tecnologia IoT foi proposta pela primeira vez por Ashton, em 1999, para o estudo de identificação por radiofrequência (RFID). Essa inovação permitiu que os diversos dispositivos que nos cercam se comunicassem entre si, abrindo uma enorme gama para aplicações e prestação de serviços [41].

De acordo com Talwana e Hua [42], a IoT pode ser definida como um sistema de dispositivos físicos, máquinas e objetos interconectados, dotados de sensores, *software* e conectividade de rede. Esses dispositivos podem coletar e trocar dados sem a necessidade de interação humana direta, facilitando a automação, monitoramento e comunicação entre sistemas e objetos do mundo físico e digital. Em essência, a IoT cria uma rede inteligente que integra o mundo físico ao mundo digital, permitindo uma variedade de aplicações em diversos setores.

A Figura 25 mostra uma das arquiteturas consideradas para a IoT, que, de acordo com Al-Fuqaha et al. [40], consiste em cinco camadas: Objetos, Abstração do Objeto, Gerenciamento de Serviços, Aplicação e Negócios.

- **Objetos:** Nessa primeira camada, os objetos ou dispositivos representam os sensores que irão coletar e processar os dados coletados, transferindo-os posteriormente para a camada de Abstração do Objeto;

- **Abstração do Objeto:** Transfere os dados produzidos pela camada Objetos para a camada Gerenciamento de Serviços através de tecnologias como RFID, Bluetooth, Wi-Fi, 3G, ZigBee, dentre outros. Outras funcionalidades como a computação em nuvem e os processos de gerenciamento de dados são realizadas nessa camada;
- **Gerenciamento de Serviços:** Essa camada é responsável por emparelhar um serviço com seu solicitante com base em endereços e nomes, além disso, processa os dados recebidos, toma decisões e fornece os serviços necessários através dos protocolos de rede. Essa camada permite que os programadores de aplicações IoT trabalhem com objetos heterogêneos sem considerar uma plataforma de *hardware* específica;
- **Aplicação:** Essa camada fornece os serviços solicitados por clientes, como as medições de tensão e corrente, por exemplo, sendo, assim, a interface onde os usuários finais podem interagir com um dispositivo e consultar os dados. Além disso, fornece uma interface para a camada de Negócios, onde podem ser produzidas análises mais complexas e relatórios. Com a capacidade de fornecer serviços inteligentes e de alta qualidade, ela abrange vários mercados verticais, como casa inteligente, transporte, automação industrial e assistência médica inteligente;
- **Negócios:** Responsável por gerenciar as atividades e os serviços do sistema IoT como um todo, a finalidade dessa camada é de construir modelos de negócio, gráficos, *dashboards*, dentre outros. Além disso, é suposto que se projete, analise, implemente, avalie, monitore e/ou desenvolva outros elementos relacionados ao sistema. Dessa forma, essa camada possibilita os processos de tomada de decisão a partir da análise de bancos de dados;

O desenvolvimento de cidades inteligentes (*smart cities*) tornou-se possível com a aplicação da IoT. De acordo com Al-Fuqaha et al. [40], as cidades inteligentes podem ser interpretadas como a aplicação de serviços que têm como objetivo melhorar a qualidade de vida em uma cidade, tornando mais fácil e conveniente para seus residentes encontrar serviços e informações de interesse. Dessa forma, é possível que haja diversos benefícios em relação ao gerenciamento e otimização dos serviços públicos, sendo a IP uma delas. Além disso, a disponibilidade dos dados coletados aumenta a transparência e estimula a

participação ativa dos cidadãos na gestão da administração pública e a criação de novos serviços [3].

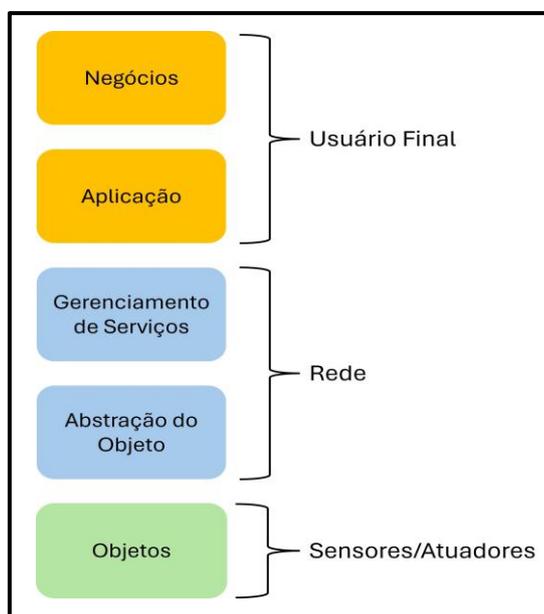


Figura 25 - Arquitetura da IoT.

Fonte: Adaptado a partir de [40].

As cidades inteligentes também objetivam melhorar a eficiência energética. Nesse contexto, a iluminação pública inteligente (*smart public lighting* ou *smart street lighting*), baseado na tecnologia LED, pode ser utilizado para melhorar o monitoramento, reduzir o consumo, aumentar a segurança das vias públicas, reduzir os custos de manutenção e otimizar a eficiência energética [3]. Nesse sentido, de acordo com Omar et al. [43], a iluminação pública inteligente é um sistema baseado em rede que, equipado com sensores e atuadores, proporciona um amplo conjunto de capacidades e interfaces de conectividade que proporcionam o monitoramento ou controle dos parâmetros elétricos e fotométricos do sistema de IP de forma automatizada.

No âmbito da iluminação pública inteligente, diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de otimizar o uso da tecnologia LED através do controle dos parâmetros elétricos da luminária. A dimerização, que, de acordo com Abdullah et al. [44], pode gerar uma economia entre 40% e 45%, é uma das principais técnicas utilizadas. Nesse sentido, diferentes estratégias podem ser adotadas. Enquanto [44] e [45] realizam a dimerização utilizando sensores de movimento como estratégia, [46] e [47] propõem uma dimerização em vários estágios através de um cronograma que abrange o período noturno e que depende do padrão de uso da via pública.

Em uma revisão da literatura elaborada por Omar et al. [43], é realizado um resumo dos parâmetros abordados por diversos autores em relação aos projetos IoT no campo da iluminação pública inteligente. A maior parte dos autores focou no controle da luminária e não no monitoramento, visto que a maioria dos projetos não era capaz de detectar a ocorrência de uma falha no equipamento. Além disso, a maioria dos trabalhos visavam o controle e/ou monitoramento de uma única luminária, o que pode se tornar um impeditivo econômico para uma adoção massificada devido aos maiores custos.

Na literatura, é possível encontrar diversos projetos que visam a automação dos sistemas IP. Adriansyah et al. [48], por exemplo, propõe um sistema capaz de acionar a luminária remotamente, além de monitorar a sua condição, podendo indicar se está ligada ou desligada. No entanto, o projeto desenvolvido não faz a aquisição dos parâmetros elétricos, dessa forma, impossibilitando análises mais amplas sobre a condição de funcionamento do dispositivo.

Para o monitoramento dos pontos de IP, Adriansyah et al. [49] desenvolveu um sistema que utiliza a comunicação WiFi para a transmissão de dados e que possui uma interface, criada no software ThingSpeak, para disponibilizá-lo ao usuário. Dessa forma, permitindo o monitoramento dos parâmetros elétricos das luminárias por meio do sensor de energia PZEM-004T. Já Hao Deng et al. [50], no entanto, utiliza a comunicação Bluetooth para a transmissão de dados e possui uma interface, criada no software LabVIEW, para disponibilizá-lo ao usuário. Além disso, utiliza amplificadores operacionais para obter os parâmetros elétricos e controlar da intensidade luminosa via modulação de pulso. Entretanto, em ambos os estudos, é necessário um dispositivo para cada luminária. No mesmo sentido, não possuem funções para salvar os dados adquiridos e gerar relatórios ou alertas.

Já Tung et al. [51] desenvolveu um sistema para monitorar e controlar grupos de luminárias remotamente através da comunicação LoRa. Além disso, o software desenvolvido permite disponibilizar os dados em uma interface para o operador, a criação de um calendário para o controle de dimerização das luminárias e o armazenamento dos dados para a geração de relatórios. O estudo não explicita, entretanto, os sensores utilizados para a obtenção dos parâmetros elétricos. Ressalta-se também, a necessidade de que haja um dispositivo instalado em cada uma das luminárias, aumentando, assim, os custos para grandes projetos de IP.

Nem todos os estudos focam exclusivamente no monitoramento ou controle dos parâmetros de uma luminária. Preocupado com a qualidade de energia, Pinto et al. [52]

propôs um sistema capaz de detectar eventos relacionados a tensão de alimentação do equipamento, tais como: ocorrências de afundamentos, picos e distorção harmônica. Através de uma interface na rede e da utilização do ZigBee para comunicação, é possível monitorar os parâmetros elétricos por meio dos sensores de tensão e corrente e controlar a potência via dimerização. Além disso, este projeto utiliza sensores para a detecção de pedestres, e condições ambientais, como irradiação solar, temperatura e umidade.

Os postes são ativos essenciais para a IP, sendo utilizados essencialmente como suporte para a instalação das luminárias. Nesse sentido, Quattrocchi et al. [53] desenvolveu um sistema capaz de monitorar as condições estruturais dos postes utilizados na IP e as condições ambientais em seu entorno. Através da comunicação via WiFi, os dados adquiridos são salvos em servidor na rede e disponibilizados via interface gráfica. Além disso, o sistema é capaz de gerar alertas e disponibilizá-los ao usuário via Telegram.

Por fim, Sanchez-Sutil e Cano-Ortega [54] focaram no desenvolvimento de um analisador PQ para monitorar os sistemas IP utilizando a comunicação LoRa. O dispositivo, que utiliza sensores não intrusivos (PZEM-004), foi projetado para monitorar sistemas monofásicos e/ou trifásicos de iluminação. Diferente de outros projetos abordados, o dispositivo é instalado no início do ramal, dessa forma, permitindo o monitoramento de várias luminárias ao mesmo tempo. No entanto, o estudo não aborda uma forma específica de salvar e disponibilizar graficamente os dados adquiridos pelo dispositivo.

Neste trabalho, o sistema proposto se diferencia por ter como premissa a capacidade de monitorar diversas luminárias ao mesmo tempo ao ser instalado no início do ramal de energia. Além disso, propõe-se a disponibilização dos parâmetros elétricos graficamente por meio de um *dashboard*, a geração de alertas, apontando possíveis defeitos do equipamento, e salvamento dos dados adquiridos em um arquivo de texto do modo a facilitar sua extração para outras ferramentas de análise.

3.2 Plataformas de *Hardware*

Para o controle dos sistemas, é necessário um *hardware* capaz de realizar a coleta, processamento, tratamento e envio dos dados. Alguns exemplos de plataformas são:

- Arduino
- ESP8266
- ESP32
- Raspberry Pi

3.2.1 Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica composta por um microcontrolador que tem sua própria linguagem de programação e o seu próprio IDE (*Integrated Development Environment*) [55]. Dentre os vários tipos disponíveis, em comum, a placa é composta por um microcontrolador Atmel AVR, um cristal ou oscilador e um regulador de tensão. Como o *hardware* e o *software* são *open source*, ou seja, os códigos, os esquemas e os projetos são abertos a qualquer pessoa, a tecnologia é muito versátil e acessível a novos usuários, podendo ser utilizados em diversas aplicações [56], [57].

As placas de Arduino são capazes de ler entradas (*inputs*), tais como sensores (tensão, corrente, pressão, temperatura, umidade, etc), botões e até mesmo mensagens de uma rede social caso tenha Wi-Fi integrado, e processá-los e enviá-los em forma de saída, tais como o acionamento de um motor, acender uma lâmpada ou enviar uma mensagem na rede [57]. Além disso, o *software* deste sistema possui inúmeras bibliotecas desenvolvidas pelos fabricantes e usuários desta tecnologia, abrangendo uma ampla gama de aplicações. A gama de *hardwares* que se aplicam a esse sistema também são muito vastos, desde sensores, cartões de memória, RFID, Wi-Fi, Bluetooth, dentre outros [58].

Ao longo dos anos já foram lançados centenas produtos atrelados ao Arduino, placas, *shields*, dentre outros acessórios, havendo, também famílias de placas, como Nano, MKR, Mega e a Classic [59]. Dentre as placas disponíveis, o Arduino UNO, talvez, seja o mais simples e mais popular devido a sua versatilidade [56]. Desta forma, no restante deste trabalho, a não ser que expressamente citado, ao se referir a placa Arduino entende-se especificamente o Arduino UNO.

Na Figura 26, é possível observar a composição da placa Arduino, que é composta por: 6 pinos analógicos ADC (*Analogic to Digital Converter*) e 14 digitais GPIO (*General Purpose Input Output*), pinos para a alimentação de circuitos auxiliares ou periféricos, entrada de alimentação e USB (Universal Serial Bus), LEDs RX e TX que indicam quando o Arduino está recebendo ou enviando informações, e o botão de *Reset*.

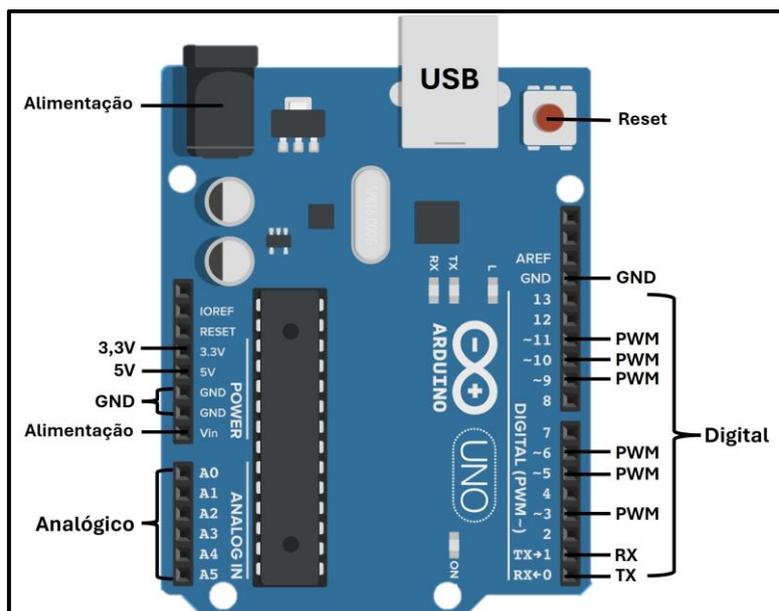


Figura 26 - Composição da placa Arduino.

Fonte: Elaboração própria.

3.2.2 ESP8266 e ESP32

O ESP8266 é um microcontrolador produzido pela fabricante chinesa Espressif, que pode ser utilizado em diferentes aplicações IoT, sendo de baixo custo e com alto poder de processamento [60]. Em relação à programação, o ESP8266 possui três ambientes de desenvolvimento disponíveis: um ambiente baseado na linguagem Lua, interpretado e de fácil integração; um ambiente baseado no sistema operacional de tempo real RTOS, que é capaz de explorar todo o potencial do microcontrolador e suas interfaces, possibilitando a criação de aplicações profissionais; e o ambiente do Arduino, incluindo todas suas bibliotecas e interfaces, herdando e se beneficiando, assim, de toda base de conhecimento e aplicações já desenvolvidas e consolidadas para o Arduino [61].

Os módulos popularizados e propostos para o Arduino também são compatíveis com o ESP8266, havendo, assim, uma ampla disponibilidade sensores, atuadores e ferramentas de comunicação, dessa forma, agilizando e barateando o desenvolvimento de aplicações IoT. No mercado, há vários módulos que utilizam o microcontrolador ESP8266 que variam na quantidade de pinos e recursos disponíveis, sendo que todos possuem Wi-Fi, estando disponíveis nas versões ESP-01 até o ESP-12. O módulo mais popular é o NodeMCU, que é *open source* e se resume a um ESP-12 com um conversor USB-serial para facilitar a gravação do *software*, e um regulador de tensão de 5V para 3,3V, possibilitando a

alimentação do módulo diretamente em interfaces USB e fontes de 5V, que são mais comuns [61].

Na Figura 27, é possível observar a composição do módulo NodeMCU, que é composta por: 17 pinos GPIO, 1 pino ADC, interfaces seriais nos protocolos SPI, I2C e UART, pinos para a alimentação de circuitos auxiliares ou periféricos, entrada para alimentação e comunicação Micro USB, botão *Reset* e botão *Flash* para gravação do *firmware*.

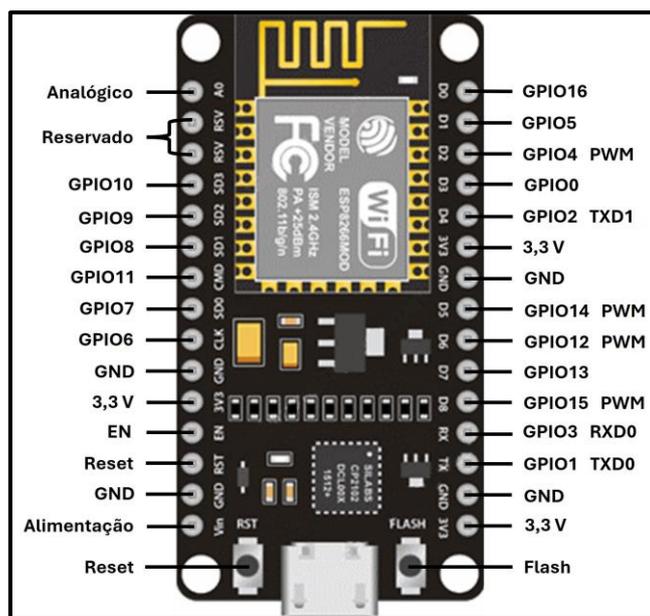


Figura 27 - Composição do módulo NodeMCU.

Fonte: Elaboração própria.

O ESP32 também é um microcontrolador produzido pela Espressif, sendo considerado o sucessor do ESP8266, dado que possui um número maior de GPIO, entradas analógicas, Bluetooth integrado, processador *dual-core*, mais memória e maior velocidade de processamento [62]. O ponto fraco deste microcontrolador, entretanto, reside em seu ADC, cuja não linearidade das leituras vem sendo apontada em diversos estudos que o utilizam em seus projetos IoT, como em [63] e [64], por exemplo. Em um teste de exatidão realizado por [65], a não linearidade fica graficamente evidente para as três faixas de tensão no ADC do microcontrolador.

A Figura 28 mostra a composição do ESP-WROOM-32, um dos módulos *open source* fabricados com o ESP32, que é composto por: 32 pinos GPIO, todos com a função PWM, 20 pinos analógicos, sendo 18 ADC e 2 DAC (*Digital to Analog Converter*), interfaces seriais SPI, I2C e UART, pinos para a alimentação de circuitos auxiliares ou

periféricos, entrada para alimentação e comunicação Micro USB, botão EN e botão *Boot* para gravação do *firmware*.

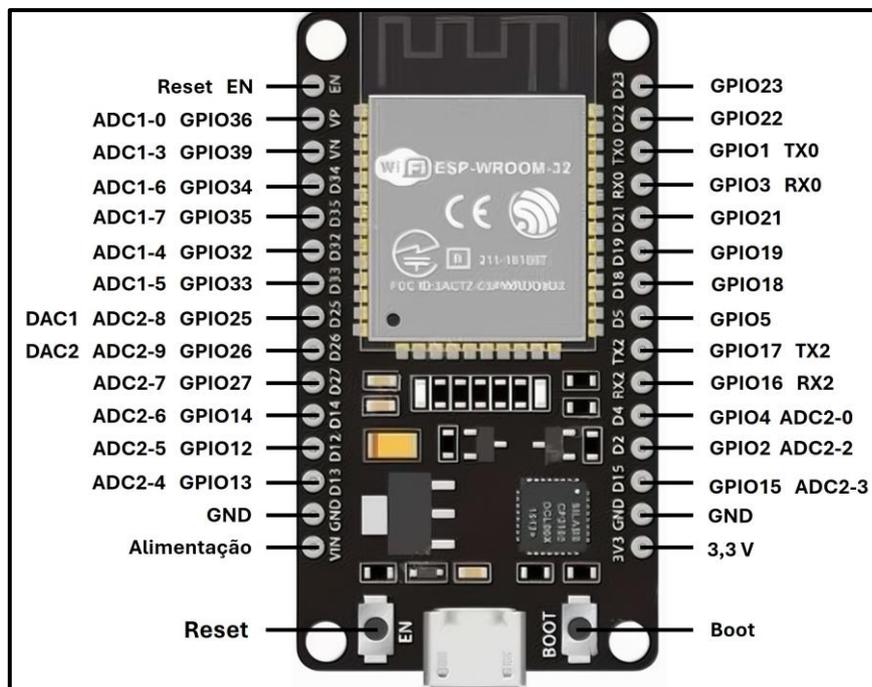


Figura 28 - Composição do módulo ESP-WROOM-32.

Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Raspberry Pi

O Raspberry Pi é um computador de placa única, ou um minicomputador, de baixo custo desenvolvido pela Raspberry Foundation, que se diferencia pela sua capacidade de processamento, podendo realizar diversas tarefas em simultâneo, e memória interna. Além disso, a maioria dos modelos possuem conexão Ethernet e sem fio, Wi-Fi e Bluetooth, tornando-o uma ótima opção para aplicações industriais e de *software*. Além de poder ser programado para funcionar de forma autônoma como os microcontroladores, é possível operá-lo utilizando mouse, teclado e um monitor através de um sistema operacional próprio, o Raspbian, ou outros sistemas, como o Chrome OS, Windows 10 IoT, Android, Linux, por exemplo [66], [67].

A Figura 29 mostra a composição de um dos tipos de Raspberry Pi, sendo este o modelo B, que é composto por uma porta Ethernet, uma porta HDMI, entrada para cartão SD, entrada de áudio, 40 portas GPIO, entradas USB para conexão de periféricos e entrada micro USB para alimentação.

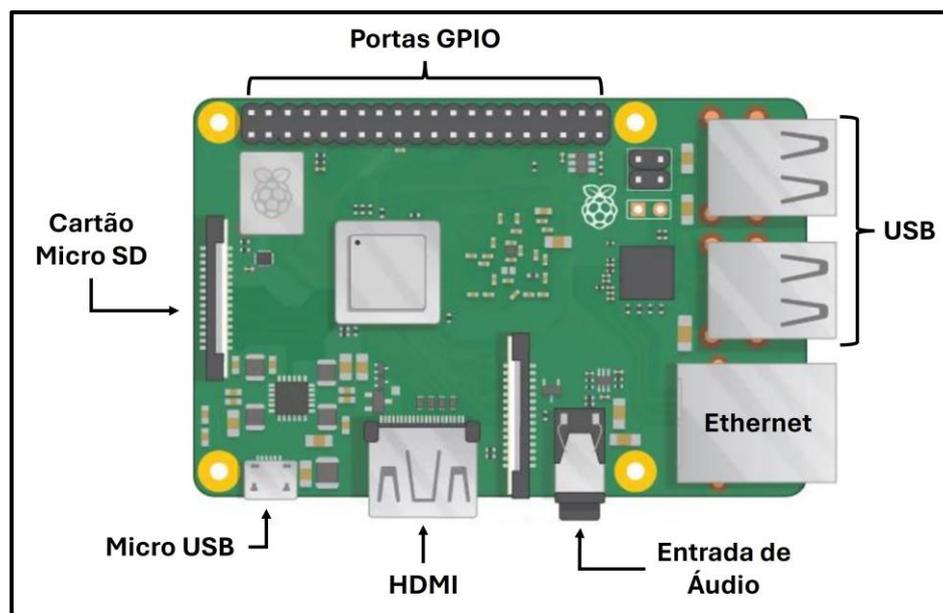


Figura 29 - Composição do Raspberry Pi modelo B.
Fonte: Elaboração própria.

3.2.4 Comparação das Tecnologias

A Tabela 14 mostra uma comparação de algumas das especificações das tecnologias que foram abordadas.

Tabela 14 – Comparação das plataformas de *hardware*.

	Arduino	NodeMCU	ESP-WROOM-32	Raspberry Pi modelo B
Preço Base (US\$)	<30	<6	<10	<50
Consumo	<250 mW	270 mW	270 mW	3000 mW
Entradas Digitais	14	17	32	8
Entradas Analógicas	6	1	18	0
Principal Aplicação	<i>Hardware</i>	<i>Hardware</i>	<i>Hardware</i>	<i>Software</i>
Internet	Não	Sim	Sim	Sim
Bluetooth	Não	Não	Sim	Sim
Tamanho	68,6 x 53,4 mm	49,0 x 25,5 mm	51,0 x 27,5 mm	85,6 x 56,6 mm

Fonte: Elaboração própria com dados de [58], [65], [66].

De acordo com as especificações descritas e com os fatores apresentados nos subcapítulos anteriores, considerando o preço e a conectividade a rede, o NodeMCU apresenta-se com a opção mais vantajosa economicamente. No entanto, devido a uma necessidade de projeto, o fato desse dispositivo possuir apenas um conversor analógico se torna um impeditivo, dado que é utilizado um sensor de tensão e um sensor de corrente (mais detalhes no Capítulo 4). A próxima opção seria o ESP-WROOM-32 que possui 18 entradas analógicas, no entanto, a não linearidade do seu ADC poderia interferir na qualidade das leituras realizadas, afetando a exatidão e precisão das medidas de interesse. Desta forma, neste trabalho, optou-se pela utilização do Arduino. Para a conexão do Arduino com a rede optou-se pela utilização do módulo ESP-01, que custa aproximadamente de US\$1.

3.3 Comunicação Sem Fio

As tecnologias de comunicação IoT devem ser capazes de conectar a mais diversa gama de objetos, possibilitando a oferta de serviços inteligentes específicos. Alguns exemplos de comunicação sem fio são:

- Bluetooth
- Wi-Fi
- ZigBee
- LoRa

3.3.1 Bluetooth

O Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fio utilizado para a troca de dados entre dispositivos a curtas distâncias. Definido no padrão IEEE 802.15.1, foi o primeiro protocolo WPAN (*Wireless Personal Area Network* – redes sem fio que alcançam poucos metros de distância) a se difundir, sendo inicialmente aplicado em celulares, possibilitando a troca de arquivos diretamente entre os dispositivos [40], [61].

Em 2010, a Bluetooth *Special Interest Group*, responsável pela tecnologia, desenvolveu o Bluetooth 4.x, tendo como característica principal o consumo reduzido e o maior alcance (de até 10 m para até 100 m) em relação às versões anteriores. Além disso, a maior velocidade de comunicação proporcionou maior confiabilidade e escalabilidade para

projetos IoTs [40], [68], [69]. Em 2016, foi lançado o Bluetooth 5.x, sendo caracterizado por uma velocidade de comunicação ainda maior, menor consumo, maior alcance (até 200 m) e outros recursos para suporte a dispositivos IoT [68], [69].

3.3.2 Wi-Fi

O Wi-Fi, acrônimo para *Wireless Fidelity*, que é baseado no protocolo IEEE 802.11, é uma tecnologia de comunicação sem fio bastante versátil e de fácil utilização, podendo ser usada tanto em curtas quanto em longas distâncias, podendo chegar a 100 m [68]. Além de permitir a conexão com a internet, o Wi-Fi, por meio da tecnologia Wi-Fi Direct que foi desenvolvido pela Wi-Fi Alliance, permite a comunicação direta entre os dispositivos, ou seja, sem que haja a necessidade de roteadores ou de configuração prévia, bastando que esse modo esteja habilitado para que os dispositivos, uma vez conectados, compartilhem arquivos e demais fluxos de comunicação [70].

O Wi-Fi Direct é similar ao protocolo Bluetooth, executando praticamente a mesma função, mas a velocidades bem maiores, possibilitando, no cenário IoT, descobrir dispositivos e serviços e acessá-los de dispositivos como celulares e *Smart TVs* de forma mais ágil [61].

3.3.3 ZigBee

O ZigBee é uma tecnologia de comunicação sem fio, baseado no padrão IEEE 802.15.4, que foi desenvolvido pela ZigBee Alliance, sendo um protocolo de comunicação de com baixo custo, baixo consumo e com menor taxa de transferência de dados entre dispositivos que pode ser empregada na criação de redes IoT [71]. Essa tecnologia é focada principalmente para o controle de *smart homes* e *smart buildings*, sendo comumente utilizado em luminárias, sensores e interruptores para comunicação sem fio. Outro uso típico desse tipo de comunicação se refere a aplicações de RFID e a criação de uma rede que pode ser usada para controle industrial, coleta de dados, alertas e automação predial e residencial [58], [72].

Outra especificidade se refere à capacidade do ZigBee ser um repetidor de sinal de outro módulo, sendo possível a aquisição de dados mesmo que um módulo não esteja no

alcance de outro [58], [72]. Este tipo de comunicação, entretanto, não é suportado por dispositivos móveis e, por ter uma taxa baixa, não permite a transferência de muita informação de uma só vez, podendo inviabilizar o seu uso em algumas aplicações IoT [58].

3.3.4 LoRa

O LoRa (acrônimo para *long range*, longo alcance) é uma tecnologia de comunicação sem fio que utiliza a técnica de modulação de espalhamento espectral para aumentar de forma significativa o alcance de transferência de dados e informações a uma taxa menor, usando, para isso, a banda ISM (*industrial, scientific, and medical*), uma banda no espectro de rádio não licenciado. De baixo consumo, tem como objetivo a eliminação de repetidores, o aumento da capacidade da rede, a redução do custo com dispositivos, o aumento da vida útil da bateria e o suporte a um número maior de dispositivos conectados [71], [73], [74].

Desenvolvido pela LoRa Alliance, o LoRaWAN é um sistema de arquitetura e um protocolo LP-WAN (*Low Power Wide Area Network*) que é baseado na modulação LoRa, desenvolvido pela Semtech, com o objetivo de conectar remotamente dispositivos operados por bateria à Internet em redes locais, regionais ou mundiais e lidar com os desafios impostos pela IoT em relação ao alcance da comunicação [71], [73]. Nesse sentido, em comparação às outras tecnologias, o LoRa pode ser um candidato ideal para aplicações IoT que requerem grande cobertura e que não necessitam de alta taxa de transferência de dados. Em um levantamento realizado por [74], foram mostradas e comparadas diversas aplicações IoT em que este protocolo foi utilizado.

3.3.5 Comparação das Tecnologias

A Tabela 15 mostra uma comparação de algumas das especificações das tecnologias de comunicação sem fio que foram abordadas.

Dando foco à conexão do dispositivo à internet para o envio de dados, foi escolhido o Wi-Fi pela sua vasta disponibilidade, fácil implementação e maior velocidade de transmissão de dados em relação às outras tecnologias, apesar do maior consumo de energia. Além disso, o ZigBee e o LoRa necessitariam de *gateways* para a conexão com a internet, levando a uma implementação mais complexa e dispendiosa.

Tabela 15 – Comparação das tecnologias de comunicação sem fio.

	Bluetooth	Wi-Fi	ZigBee	LoRa
Alcance	10-200 m	100 m	10-100 m	10 km
Frequência de Banda	2,4 GHz	2,4 GHz 5 GHz	868 MHz 915 MHz 2,4 GHz	433 MHz 868 MHz 915 MHz
Taxa de Transmissão	2 Mb/s	11 Mb/s 54 Mb/s	250-500 kb/s	50 kb/s
Consumo	Baixo	Alto	Baixo	Baixo
Número Máximo de Dispositivos	8	2007	64000	1000
Suportado por Dispositivo Móvel	Sim	Sim	Não	Não

Fonte: Elaboração própria com dados de [58], [68], [69], [71].

Capítulo 4 - Metodologia

Neste capítulo a metodologia de desenvolvimento, teste e validação dos resultados é explicada com detalhes. O sistema desenvolvido para o monitoramento dos sistemas de IP é composto por um módulo de aquisição da tensão e corrente de fase utilizando sensores analógicos. Essas informações são amostradas, digitalizadas e processadas pelo Arduino que, conectado a um módulo Wi-Fi ESP-01 da família do ESP8266, envia, uma vez por minuto, os dados coletados em tempo real para a nuvem, por meio do protocolo de comunicação MQTT. Esses dados são aquisitados pelo Node-RED, devidamente instalado em um computador, e disponibilizados para visualização em um *dashboard*, hospedado em uma página *web* dentro de uma rede local. A Figura 30 ilustra esquematicamente o funcionamento proposto.

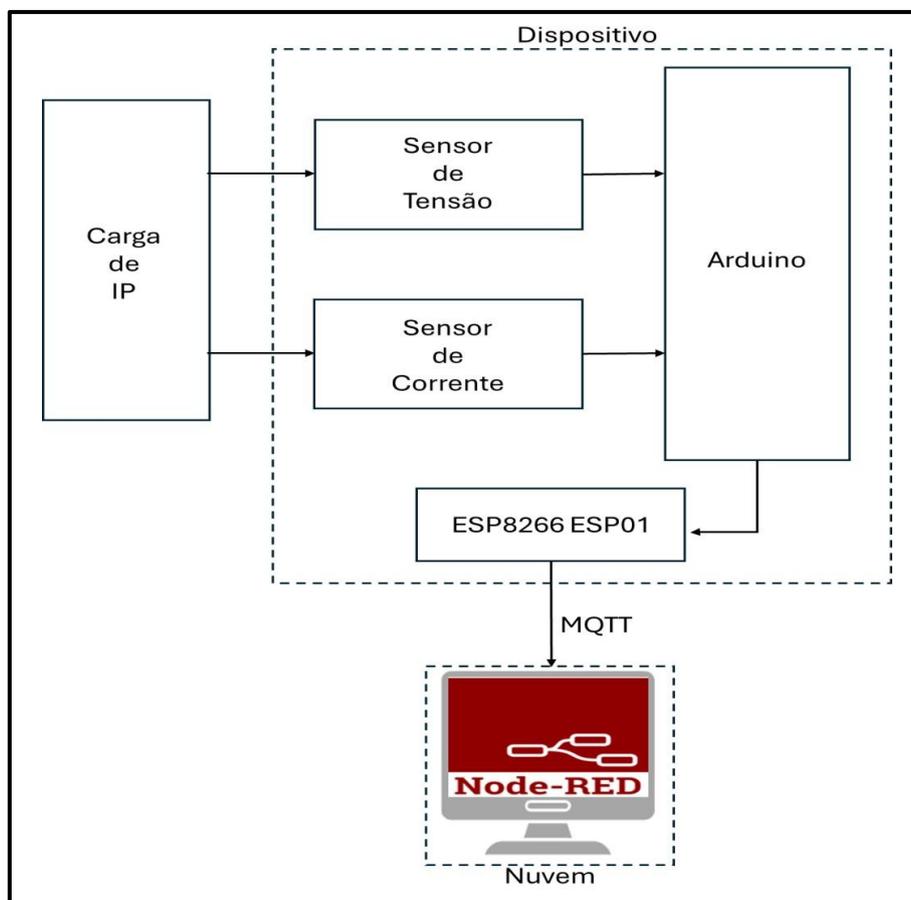


Figura 30 - Esquemático do sistema proposto para o monitoramento da IP.

Fonte: Elaboração própria.

A construção do sistema como um todo pode ser dividida em 6 etapas: a conectividade do sistema com a nuvem, os módulos para aquisição de dados, o processamento dos dados coletados, a calibração do sistema, a interface disponibilizada ao usuário e o teste de funcionamento. Tais etapas serão descritas a seguir.

4.1 Conectividade do Sistema com a Nuvem

A conectividade do sistema é feita pelo microcontrolador ESP-01, por meio de sua antena Wi-Fi. Sendo já bem difundido e de baixo custo [75], permite que os dados processados pelo ARDUINO sejam enviados a rede. A comunicação entre o ARDUINO e o ESP-01 é feita através das portas seriais, no entanto, não de forma direta, uma vez que esse dispositivo opera com 3,3 V. Dessa forma é necessário usar um módulo conversor de nível lógico bidirecional ou um divisor de tensão. Optou-se para este projeto pela utilização de um divisor de tensão para a comunicação entre os dispositivos. A Figura 31 mostra um exemplo das conexões necessárias para a utilização de um divisor de tensão.

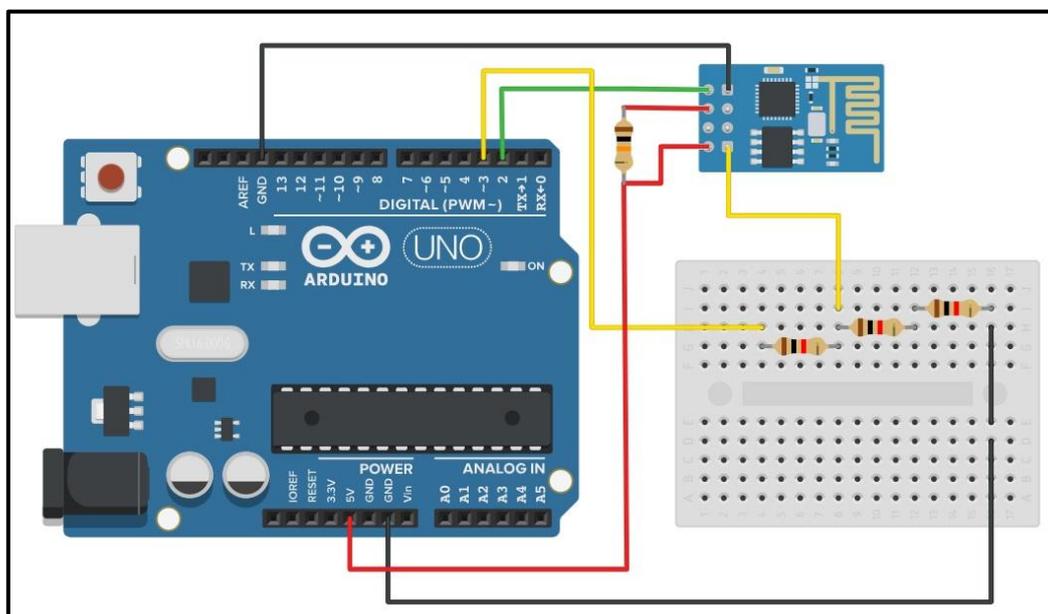


Figura 31 - Esquema de ligação entre o Arduino e o ESP-01 utilizando um divisor de tensão.

Fonte: Elaboração própria.

4.1.1 Algoritmo para Conexão Wi-Fi

Antes de programar o Arduino, é necessário verificar se é preciso atualizar o *firmware* do ESP-01, dado que, dependendo da versão adquirida, é possível que não esteja configurado para funcionar com comandos AT.

Descendentes diretos do chamado “Padrão Hayes”, de 1981, os comandos AT eram utilizados para permitir que os computadores pessoais interagissem com as conexões telefônicas, controlando diretamente um modem. As definições básicas do Hayes (incluindo o prefixo AT, que significava "atenção") estão presentes nas linguagens de comando de diversos aparelhos modernos, incluindo periféricos de computadores. Em relação ao ESP8266 e suas variações como o ESP-01, os comandos AT são a forma básica para sua configuração e acionamento quando ele está sob controle de um equipamento externo, como o Arduino, por exemplo [76].

A forma de se verificar e atualizar o *firmware* do ESP-01 está descrita no Apêndice C. Com o *firmware* do ESP-01 devidamente atualizado para funcionar com comandos AT, a programação do Arduino foi desenvolvida por *software* na IDE Arduino, que tem por objetivo facilitar o desenvolvimento do código, para que a conectividade com a internet seja implementada. É necessário incluir no código algumas funções importantes para a conectividade com o Wi-Fi, sendo utilizada a biblioteca WiFiEsp para este fim.

Em seguida, é necessário conectar o Arduino a um ponto de conexão de internet via Wi-Fi. Dessa forma, devem ser inseridos no código as credenciais de acesso de uma rede sem fio pré-determinada, sendo o nome SSID da rede e a senha, conforme ilustrado no Quadro 1. Ao pôr o Arduino em operação com esse código gravado na memória, ele se conectará automaticamente à rede Wi-Fi informada. O código principal utilizado está disponível no Apêndice D.

```
char ssid[] = "Nome da Rede";  
char pass[] = "Senha";
```

Quadro 1 – Exemplo de credenciais de acesso a uma rede pré-determinada.

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2 Protocolo de Comunicação MQTT

Para a troca de informações entre o ESP-01 e o computador através do Wi-Fi é necessário um protocolo de transporte de dados, sendo utilizado o MQTT para esse fim. O MQTT é um protocolo de comunicação de transporte de mensagens do tipo Cliente Servidor *publish/subscribe*. Uma de suas características é a sua simplicidade, sendo projetado para dispositivos com baixo consumo de largura de banda da rede, possuindo, também, uma alta taxa de garantia de entrega de mensagens, o que o torna uma boa opção para o uso em dispositivos IoT [40], [75].

Desenvolvido por Andy Stanford-Clark da IBM e Arlen Nipper da Arcom em 1999 para o monitoramento de oleodutos, o protocolo MQTT é atualmente utilizado de forma extensiva em aplicações IoT, IIoT (*Industrial IoT*) e M2M (*Machine to Machine*). O modelo de mensagem é baseado em tópicos e subscrições, onde os tópicos são *strings* nas quais as mensagens são publicadas e subscritas, possuem uma hierarquia e podem conter diversos níveis, que são separados por barras (/). O Quadro 2 mostra um exemplo de tópico. Já as subscrições são utilizadas para especificar de qual ou quais tópicos se deseja receber mensagens [40], [77].

`casa/quarto/smartlamp`

Quadro 2 – Exemplo de tópico.

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.1 MQTT QoS

O QoS (*Quality of Service*) é definido como um acordo entre o remetente e o destinatário da mensagem que define o nível de garantia de entrega para uma mensagem específica. Nesse sentido, o MQTT suporta três níveis de QoS, sendo o QoS 0, QoS 1 e QoS 2 [77].

De acordo com [77], o QoS 0 promove no máximo uma vez (*at most once*) a entrega, onde as mensagens são enviadas sem qualquer confirmação, podendo ser perdidas no caso de uma falha de conexão. Esse nível de QoS é tipicamente utilizado em situações em que as perdas de mensagens são aceitáveis, não impactando os resultados de forma significativa. O QoS 1 promove pelo menos uma vez (*at least once*) a entrega, onde as mensagens são

confirmadas e, se necessário, reenviadas. Nesse nível de QoS o *Publisher* envia a mensagem para o *Broker* e aguarda por um tempo definido uma confirmação antes de proceder. Caso o *Broker* não responda, o *Publisher* irá reenviar a mensagem. Essa configuração é tipicamente utilizada em situações em que a perda de mensagens não é tolerada, mas cuja duplicação é aceitável. Já o QoS 2 promove a entrega exatamente uma vez (*exactly once*), onde as mensagens são confirmadas e reenviadas até que elas sejam recebidas exatamente uma vez pelo *Subscriber*, sendo tipicamente utilizada em situações em que a perda ou a duplicação das mensagens não são toleradas.

Deve-se destacar que níveis maiores QoS consomem mais recursos, podendo aumentar a latência de resposta da rede. Dessa forma, a escolha do nível de QoS deve ser baseada nas necessidades específicas do projeto [77].

4.1.2.2 Persistência de Mensagens

A persistência de mensagens (*message persistence*) é outro recurso disponível que garante que as mensagens não serão perdidas caso ocorra uma falha na rede ou no servidor ao armazená-las até que sejam enviadas para o *Subscriber*. Nesse sentido, o MQTT possui três opções de persistência de mensagens, sendo a não persistente, persistente em fila e persistente com reconhecimento [77].

De acordo com [77], no modo não persistente as mensagens não são armazenadas no servidor e são perdidas em caso de falha, sendo mais adequado em situações em que seu conteúdo não é crítico para a aplicação. No modo persistente em fila, as mensagens são armazenadas no servidor até que elas sejam entregues ao *Subscriber*. Em caso de não disponibilidade, as mensagens são armazenadas até a sua reconexão, sendo útil quando o *Subscriber* não está sempre conectado à rede ou caso necessite que receba todas as mensagens. Já no modo persistente com reconhecimento, as mensagens são armazenadas no servidor até que o *Subscriber* reconheça o seu recebimento. Este modo é útil quando é vital garantir que as mensagens sejam recebidas e processadas.

4.1.2.3 Arquitetura *Publish/Subscribe*

Diferente dos modelos cliente-servidor, na qual o cliente se comunica diretamente com o servidor e o provedor das mensagens, criando um gargalo que diminui a performance, o modelo *Publish/Subscribe* desacopla o publicador das mensagens do cliente que as requisita. Nesse modelo o *Publisher* e o *Subscriber* sequer conhecem a existência um do outro, sendo o *Broker* responsável por administrar a conexão entre eles, aumentando, assim, a velocidade e eficiência do processo de comunicação [78].

Essa arquitetura promove o desacoplamento em três dimensões, espacial, temporal e de sincronização. No desacoplamento espacial o *Publisher* e o *Subscriber* não precisam ter conhecimento um do outro, necessitando apenas do endereço de protocolo de rede (IP) e da porta a qual o *Broker* está associado. O desacoplamento temporal implica que *Publisher* e o *Subscriber* não precisam estar funcionando ao mesmo tempo, uma vez que, com a persistência de mensagens e o nível QoS devidamente configurados, o *Broker* pode armazenar as mensagens enquanto o cliente não estiver conectado. Já o desacoplamento de sincronização implica que as operações em ambos os componentes não precisam ser interrompidas durante a publicação ou recebimento das mensagens [78].

Outro recurso dessa arquitetura se refere à capacidade de filtrar as mensagens, garantindo que o *Subscriber* receba apenas as mensagens nas quais ele esteja interessado. Dentre as diversas opções, a filtragem baseada em assunto é a mais comum. Neste modo de filtragem, o *Broker* filtra as mensagens baseadas no assunto ou tópico a qual está relacionada. Para o cliente receber as mensagens, ele deve subscrever a esse tópico para que o *Broker* envie a mensagem de acordo com o nível de hierarquia especificado [78]. Neste sentido, a Figura 32 apresenta o processo utilizado pela arquitetura *Publish/Subscribe* e a Figura 33 mostra um exemplo de hierarquia baseada em tópicos.

Esse modo de filtragem tem como vantagem a simplicidade e facilidade de implementação, a flexibilidade proporcionada por uma estrutura hierárquica estruturada em tópicos e a eficiência, dado que apenas as mensagens nas quais os clientes estão subscritos são enviadas. Como desvantagem, os *Publishers* e o *Subscribers* devem concordar de antemão com a hierarquia dos tópicos, limitando as mensagens que podem ser recebidas, dado que são filtradas unicamente pela hierarquia dos tópicos [78].

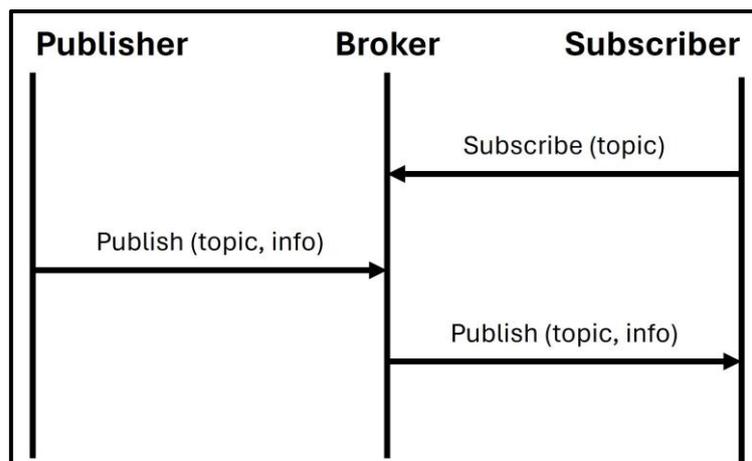


Figura 32 – Arquitetura Publish/Subscribe.

Fonte: Elaboração própria.

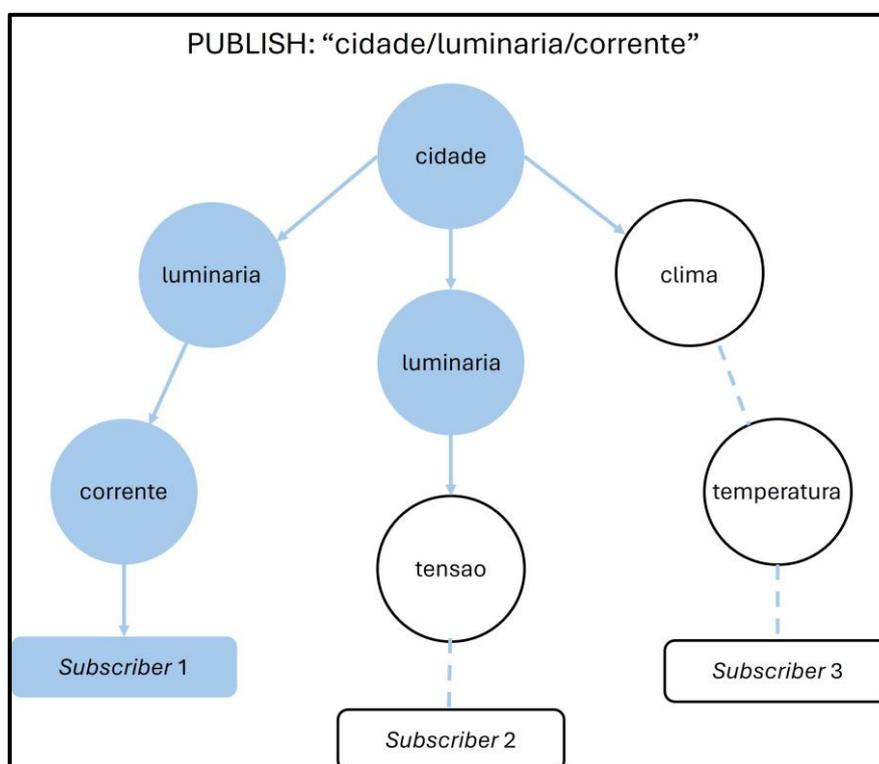


Figura 33 - Exemplo de hierarquia baseada em tópicos.

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.4 Cliente e Broker

O protocolo MQTT possui dois componentes principais, sendo o cliente e o *Broker*. Um cliente MQTT pode ser qualquer dispositivo que usa a biblioteca MQTT para se conectar a um *Broker* na rede. Geralmente, clientes MQTT são *Publishers* e *Subscribers*, onde o *Publisher* é um cliente que envia as mensagens enquanto o *Subscriber* é um cliente que

recebe as mensagens. Um cliente MQTT pode, no entanto, exercer ambas as funções, enviando e recebendo mensagens [79].

Responsável pelo gerenciamento do fluxo de comunicação entre clientes MQTT, o *Broker* desempenha um papel crítico para a garantia de entrega confiável de mensagens, sendo responsável por receber, filtrar e distribuir todas as mensagens, além de autenticar e autorizar os clientes [79].

4.1.2.5 Implementação

Para transmitir os dados corretamente, é necessário incluir no código algumas funções essenciais para o funcionamento adequado desse protocolo. Nesse sentido, foi utilizada a biblioteca PubSubClient, que possui todas as funções necessárias para implementar esse protocolo. Em seguida, é necessário se conectar a um *Broker*, criar um tópico e vincular o dado a ser enviado a esse tópico. Nesse sentido, o Quadro 3 mostra, de forma exemplificada, o procedimento de implementação. A implementação completa pode ser verificada no Apêndice D.

```
const char *mqtt_broker = "Nome do Broker";  
const int mqtt_port = xxx; // broker port number  
const char *topico = "Nome do Tópico";  
client.publish(topico, String(dado_a_ser_enviado).c_str());
```

Quadro 3 – Trecho de código para implementação do protocolo MQTT.

Fonte: Elaboração própria.

4.2 Módulos para Aquisição de Dados

A tensão e a corrente são grandezas fundamentais do sistema elétrico, a partir das quais todas as outras grandezas elétricas podem ser determinadas. Dessa forma, medições exatas e precisas são de vital importância para o monitoramento de cargas, fazendo com que a calibração dos sensores sejam um dos aspectos mais importantes para garantir a confiabilidade das medições [80]. Nesse sentido, o dispositivo desenvolvido possui dois módulos de sensores que estão conectados e enviam informações ao Arduino, que irá processar as medidas feitas e enviá-las para a nuvem uma vez por minuto.

Para o sensoriamento de tensão, optou-se pelo módulo ZMPT101B, ilustrado na Figura 34, que é feito a partir do transformador de tensão ZMPT101B. Capaz de funcionar com tensões de até 250 V RMS, possui alta exatidão e consistência nas medições [80]. A calibração da saída deve ser feita pelo usuário. Para obter o melhor ajuste da saída, é necessário ajustar o ganho a partir do *trimpot* (potenciômetro ajustável). Com o auxílio de um osciloscópio, enquanto sob tensão de 250V RMS nos terminais de medição, o ganho deve ser ajustado até que se alcance a maior amplitude de aquisição sem deformação da onda de saída.

Já para o sensoriamento de corrente, optou-se pelo módulo ACS758-50B, ilustrado na Figura 34, que é feito a partir do sensor de corrente ACS758-50B Efeito Hall, suportando até 50 A RMS de corrente alternada. De solução econômica e precisa, pode ser utilizado em diversas aplicações para o sensoriamento de projetos IoT [81].



Figura 34 – Do lado esquerdo da figura o módulo ZMPT101B utilizado para medição de tensão, do lado direito o módulo ACS758-50B utilizado para medição da corrente.

Fonte: Elaboração própria.

Com o propósito de compactar o sistema, agrupando os sensores apresentados para as aquisições de tensão e corrente, o ESP-01 para a conexão à internet e os circuitos auxiliares, foi desenvolvido um *Shield* para ser conectado no Arduino UNO. Esse *Shield* foi elaborado no Proteus, um *software* que pode ser utilizado para a criação e simulação de projetos eletrônicos. A Figura 35 mostra o esquemático do *Shield* desenvolvido, já a Figura 36 mostra o resultado final, com todos os componentes conectados.

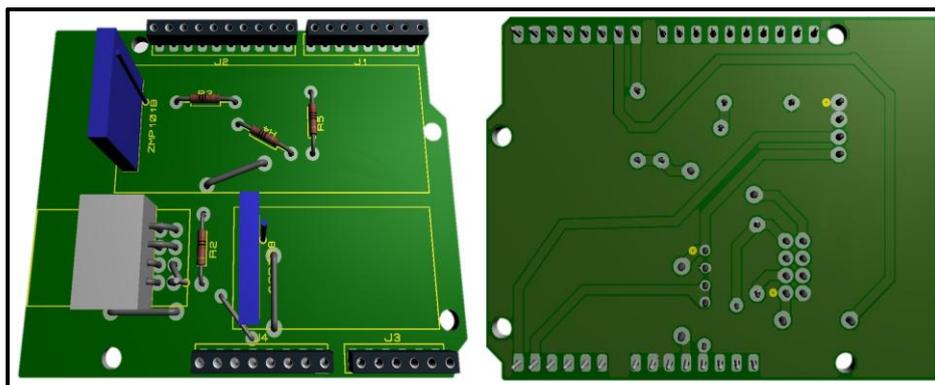


Figura 35 - Esquemático do Shield desenvolvido.

Fonte: Elaboração própria.

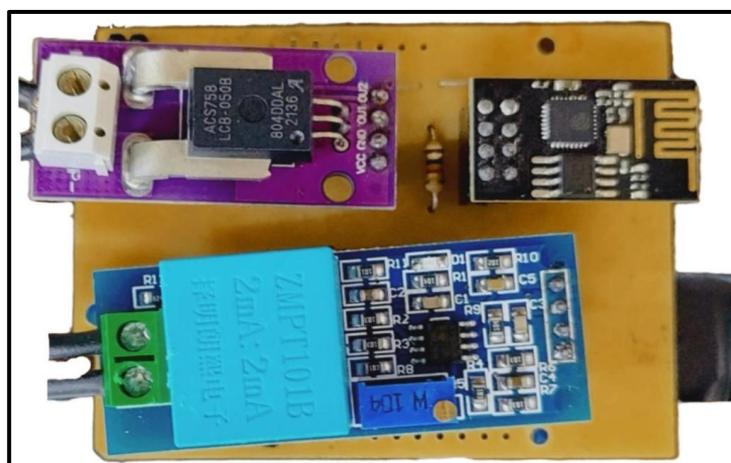


Figura 36 - Módulo de aquisição desenvolvido, contendo o Shield desenvolvido, o módulo ZMPT101B (azul), o módulo ACS758-50B (roxo) e o ESP-01 (preto).

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Processamento dos Dados Coletados

Antes de implementar os procedimentos necessários para se obter os dados elétricos de interesse, é preciso entender algumas expressões básicas para sistemas de corrente alternada (CA). Nesse sentido, quando analisado no tempo contínuo, a potência real (P) pode ser determinada pela equação (2).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (2)$$

onde:

- T é o período da onda analisada;

- t é o tempo;
- $v(t)$ é a tensão instantânea no tempo t ; e
- $i(t)$ é a corrente instantânea no tempo t ;

Um valor RMS é definido como a raiz quadrada do valor médio dos quadrados dos valores instantâneos de uma quantidade que varia periodicamente, com média em um ciclo completo. Nesse sentido, os valores RMS de tensão (V_{RMS}) e corrente (I_{RMS}) podem ser determinadas pelas equações (3) e (4) respectivamente. De posse desses valores, a equação (5) pode ser utilizada para determinar a potência aparente (S). Por fim, o fator de potência (FP) pode ser determinado pela equação (6).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (3)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad (4)$$

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (5)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

Em aplicações reais, no entanto, dado a limitação dos sistemas para a aquisição e processamento de dados, o tempo discreto é utilizado para fazer uma representação de um sinal em tempo contínuo. Sendo assim, as equações (2), (3) e (4) podem ser representadas pelas equações (7), (8) e (9) respectivamente.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v(n) \cdot i(n) \quad (7)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} v^2(n)}{N}} \quad (8)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} i^2(n)}{N}} \quad (9)$$

onde:

- N é o número total de amostras em um período da onda analisada;
- n é o número da amostra;
- $v(n)$ é uma instância amostrada de $v(t)$; e
- $i(n)$ é uma instância amostrada de $i(t)$;

Em termos de linguagem de programação, é necessário utilizar algoritmos para aplicar essas equações. Nesse sentido, os Quadro 4 a 6 mostram os procedimentos a serem adotados para se obter, respectivamente, a potência ativa, a tensão RMS e a corrente RMS a partir das leituras do ADC do Arduino.

Para os cálculos de tensão RMS, corrente RMS, potência ativa, potência aparente e fator de potência, foi utilizada a biblioteca EmonLib, que possui todas as funções necessárias para a aquisição dessas grandezas. A operação da biblioteca envolve a implementação de um detector de cruzamento por zero em *software* para a leitura das amostras de tensão e corrente no ADC, a aplicação de um filtro digital para remover a polarização de tensão e, por fim, o cálculo dos valores eficazes dessas grandezas.

```
for (n = 0; n < numero_de_amostras; n++)
{
    // tensão e corrente instantânea adquirida pela leitura do ADC
    inst_power = ins_voltage * inst_current;
    sum_inst_power += inst_power;
}
real_power = sum_inst_power / numero_de_amostras;
```

Quadro 4 – Exemplo de algoritmo para o cálculo da potência ativa.

Fonte: Elaboração própria.

```
for (n = 0; n < numero_de_amostras; n++)
{
    // tensão instantânea adquirida pela leitura do ADC
    squared_voltage = ins_voltage * inst_voltage;
    sum_squared_voltage += squared_voltage;
}
mean_square_voltage = sum_squared_voltage / numero_de_amostras;
root_mean_square_voltage = sqrt(mean_square_voltage);
```

Quadro 5 – Exemplo de algoritmo para o cálculo da tensão RMS.

Fonte: Elaboração própria.

```
for (n = 0; n < numero_de_amostras; n++)
{
    // corrente instantânea adquirida pela leitura do ADC
    squared_current = ins_current * inst_current;
    sum_squared_current += squared_current;
}
mean_square_current = sum_squared_current / numero_de_amostras;
root_mean_square_current = sqrt(mean_square_current);
```

Quadro 6 – Exemplo de algoritmo para o cálculo da corrente RMS.

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Calibração do Sistema

A calibração do sistema é um passo importante para que os valores medidos sejam o mais próximos possível do valor real. Desconsiderando erros de projeto, existem erros que são inerentes aos sensores utilizados. Nesse sentido, [82] aponta os principais pontos que contribuem para a incerteza de medição, como a tensão de referência disponibilizada pelo microcontrolador e a incerteza dos componentes utilizados no sensor. De acordo com as especificações do fabricante, os erros de medição dos sensores de tensão e corrente utilizados são, respectivamente, $\pm 1\%$ e $\pm 2\%$ [83], [84].

A calibração foi realizada no laboratório LabLux – UFF, cujo ambiente possui temperatura ($25 \pm 1^\circ\text{C}$) e umidade ($< 65\%$) controladas e cujos equipamentos possuem índices de incerteza rastreáveis. Visando fornecer uma tensão estabilizada e controlada, foi utilizada uma fonte de potência Pacific 110-ADX, Figura 37. Para a medição de controle, foi utilizado um wattímetro Yokogawa WT-210, Figura 37. De acordo com [82], a tensão e corrente devem estar próximos aos máximos permitidos pelos sensores, caso contrário, poderão fornecer valores incorretos. No entanto, devido à limitação de 1000 W da fonte utilizada, o sistema foi calibrado a 250 V e 3,53 A com uma carga puramente resistiva, totalizando em 882 W.

O procedimento de calibração consiste em ajustar os coeficientes de calibração da biblioteca EmonLib em código na IDE Arduino até que os valores medidos pelos sensores do sistema convirjam com os apresentados pelo wattímetro. Para calibrar o ângulo de fase, o coeficiente de fase deve ser ajustado até que o fator de potência medido pelo sistema seja 1, dado a característica puramente resistiva da carga escolhida. A Figura 38 mostra o esquemático das ligações necessárias para a fazer o procedimento.



Figura 37 - Equipamentos utilizados para a calibração.

Fonte: Elaboração própria.

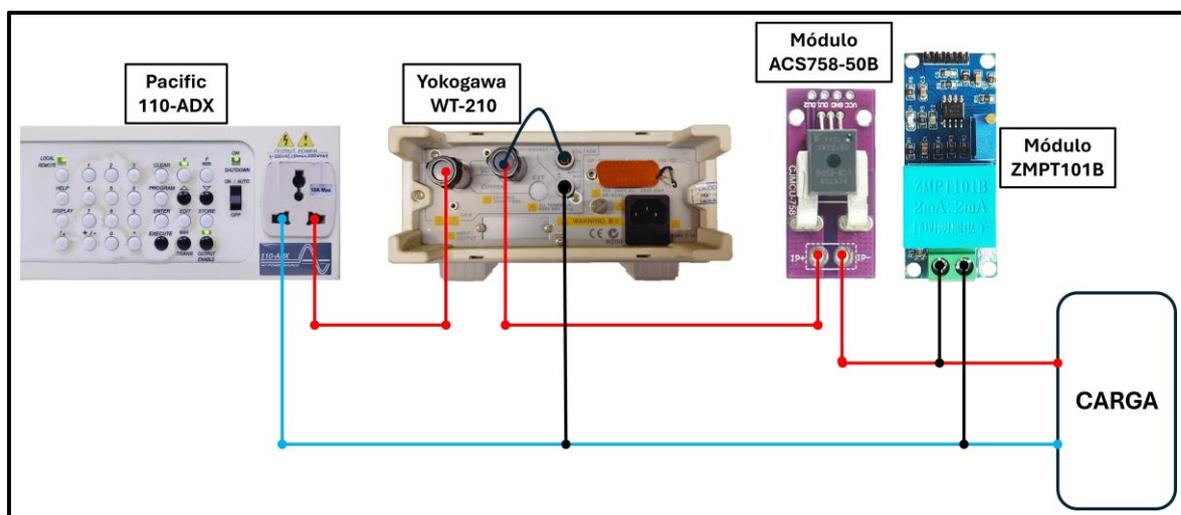


Figura 38 - Conexões realizadas para o procedimento de calibração.

Fonte: Elaboração própria.

4.4.1 Problemas Encontrados

Foi verificado em osciloscópio, entretanto, que o sinal de corrente (CH2 em azul) estava atrasado em cerca de 1,36 ms ($\pm 29^\circ$ elétricos) em relação a tensão (CH1 em amarelo), como demonstrado na Figura 39, o que inviabilizava o ajuste pelo coeficiente da biblioteca emonLib, que funciona bem com desvios de até 7° elétricos. Dessa forma, optou-se por mudar a forma como os dados medidos eram processados pela biblioteca. Anteriormente, cada dado adquirido era processado logo em seguida, ou seja, não era salvo. A solução adotada foi salvar cada dado adquirido em um vetor para ser processado posteriormente, como mostra o Quadro 7. O código final da biblioteca pode ser verificado no Apêndice D.

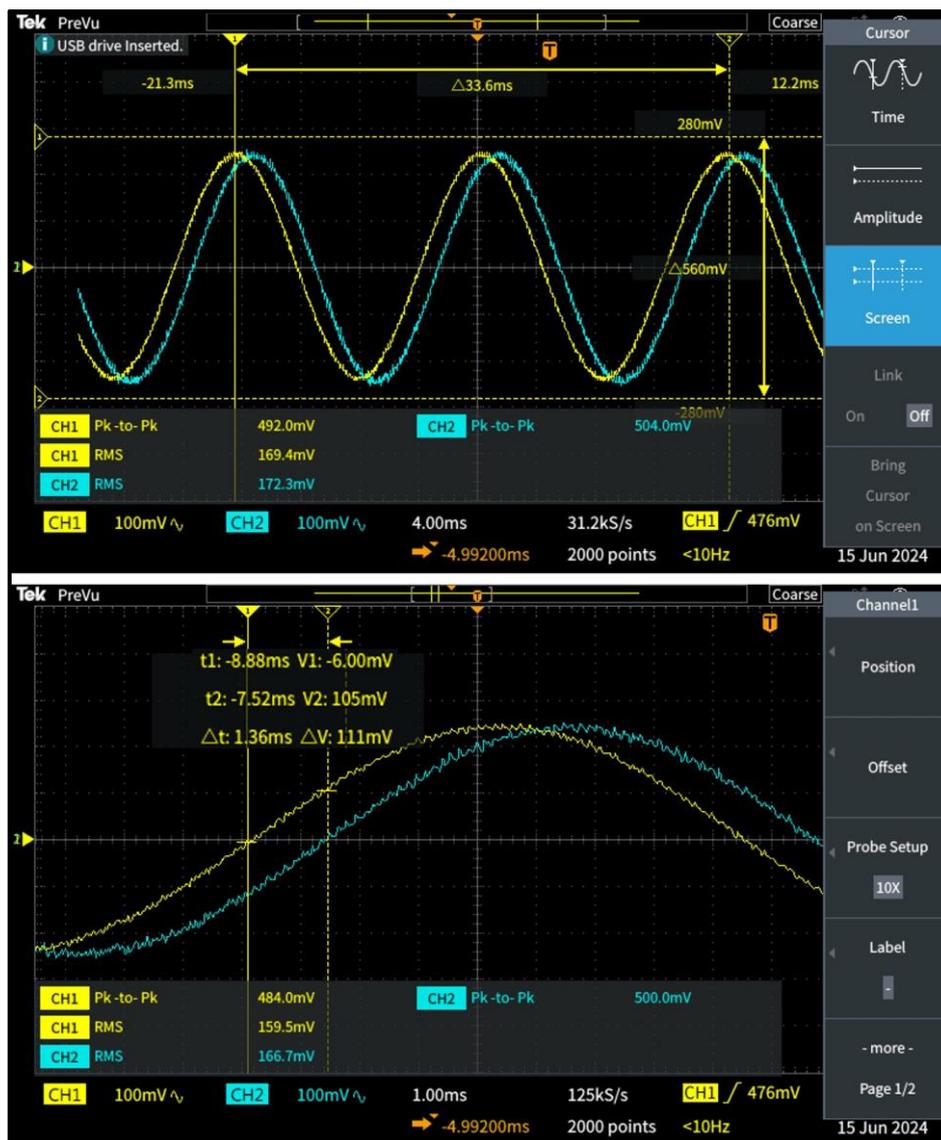


Figura 39 - Defasagem entre os sinais dos módulos de tensão e corrente.
 Fonte: Elaboração própria.

```
sampleV[numberOfSamples-1] = analogRead(inPinV);
sampleI[numberOfSamples-1] = analogRead(inPinI);
```

Quadro 7 – Método utilizado para a aquisição de dados.

Fonte: Elaboração própria.

Sabendo que o Arduino leva cerca de 100 microssegundos para ler um valor analógico, resultando em uma taxa de amostragem máxima de 10.000 leituras por segundo [85], e devido a limitação de 2 kB de memória, o código foi ajustado para adquirir o maior número de dados possível referentes a uma onda completa em 60 Hz (com o método explicitado pelo Quadro 7 eram adquiridos, em média, 74 dados por ciclo), com algumas aquisições a mais para que seja possível o descarte. A partir disso, a calibração do ângulo de

fase foi realizada deslocando os dados do vetor de corrente até que fosse obtido um fator de potência próximo a 1, respeitando o número mínimo de aquisições para manter a análise dentro do mesmo ciclo. Neste caso, 79 dados foram obtidos, sendo que 5 medições foram descartadas. Após, um ajuste mais fino foi realizado ajustando o coeficiente de fase da biblioteca.

4.5 Interface Disponibilizada ao Usuário

O *dashboard* desenvolvido para a visualização das grandezas medidas utiliza as ferramentas disponibilizadas no Node-RED. Esse *software* é uma ferramenta gratuita de programação baseada em JavaScript que permite conectar dispositivos de *hardware*, interfaces de programação e serviços de rede a partir da criação de fluxos voltados a eventos em navegador de rede fazendo o uso do Node.js [86].

A programação em fluxo no Node-RED consiste em conectar blocos que possuem funções e códigos pré-definidos para a execução de determinadas tarefas, adequando-a para o desenvolvimento de aplicações IoT ao facilitar a implementação de uma interface para a visualização e processamento de dados [87].

Essa ferramenta já vem sendo utilizada, aliado ao protocolo MQTT, para a apresentação de dados. Em [73], esse conjunto é utilizado para monitorar uma rede baseada em LoRa. Já em [60], esse conjunto é utilizado para monitorar a temperatura e a umidade e para o controle de uma lâmpada LED. Além disso, por não precisar de pagamento de licença para uso, essa ferramenta já está sendo cogitada em trabalhos visando atender áreas do sistema público, como pode ser observado em [87], mostrando a possibilidade de personalização da ferramenta para a realidade e necessidade do sistema público.

4.5.1 Desenvolvimento do Fluxo

Para criar a interface a ser disponibilizada para o usuário, é necessário criar um fluxo. A Figura 40 mostra parcialmente o fluxo montado para a criação do *dashboard* no ambiente do Node-RED. Ao todo, o fluxo apresentado pode ser dividido em três partes, sendo: disponibilização dos dados em *dashboard* (vermelho), criação de notificações (verde) e disponibilização dos dados em arquivo .txt (preto). Essa ferramenta permite, também,

exportar o fluxo criado em arquivo com código em JavaScript para que possa ser compartilhado com outros usuários. Nesse sentido, o fluxo final desenvolvido pode ser verificado no Apêndice D.

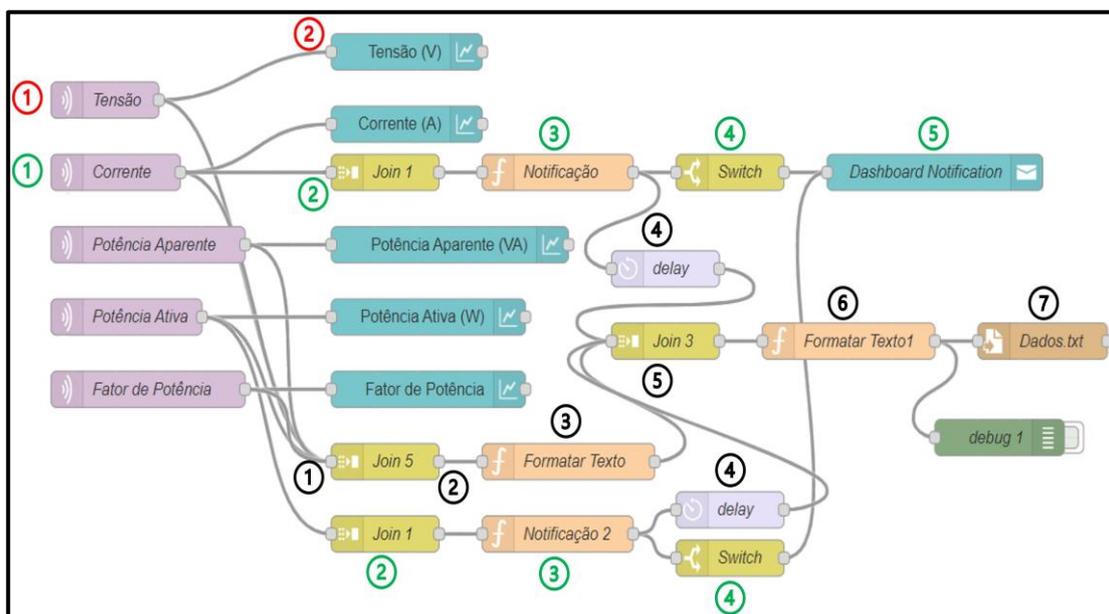


Figura 40 - Fluxograma parcial desenvolvido no Node-RED.

Fonte: Elaboração própria.

4.5.1.1 Disponibilização dos dados em *dashboard*

O primeiro passo é subscrever aos tópicos que foram criados. No primeiro bloco são inseridos os dados necessários para subscrever um determinado tópico, sendo definidos, obrigatoriamente, o servidor (*Broker*), o tópico e o nível de QoS. Como o projeto não prevê a persistência de mensagens, o nível de QoS deverá ser 0. Para a configuração do servidor, devem ser fornecidos, obrigatoriamente, o IP e o número da Porta a qual o *Broker* está associado. Devidamente configurado, esse bloco irá receber os dados do tópico informado e os enviará para o bloco seguinte no formato “tópico/mensagem”.

O segundo bloco se refere à implementação do *dashboard*. Esse bloco recebe os dados enviados pelo primeiro bloco e os processa de forma a disponibilizar apenas a mensagem recebida. Nele, é possível criar e escolher a aba em que o gráfico estará disponível, definir o tipo de gráfico, o número máximo de pontos apresentados, dentre outras configurações. A interface fica hospedada em página *web* dentro de uma rede local. A Figura 41 mostra o *layout* da interface desenvolvida com todas as grandezas elétricas a serem monitoradas.

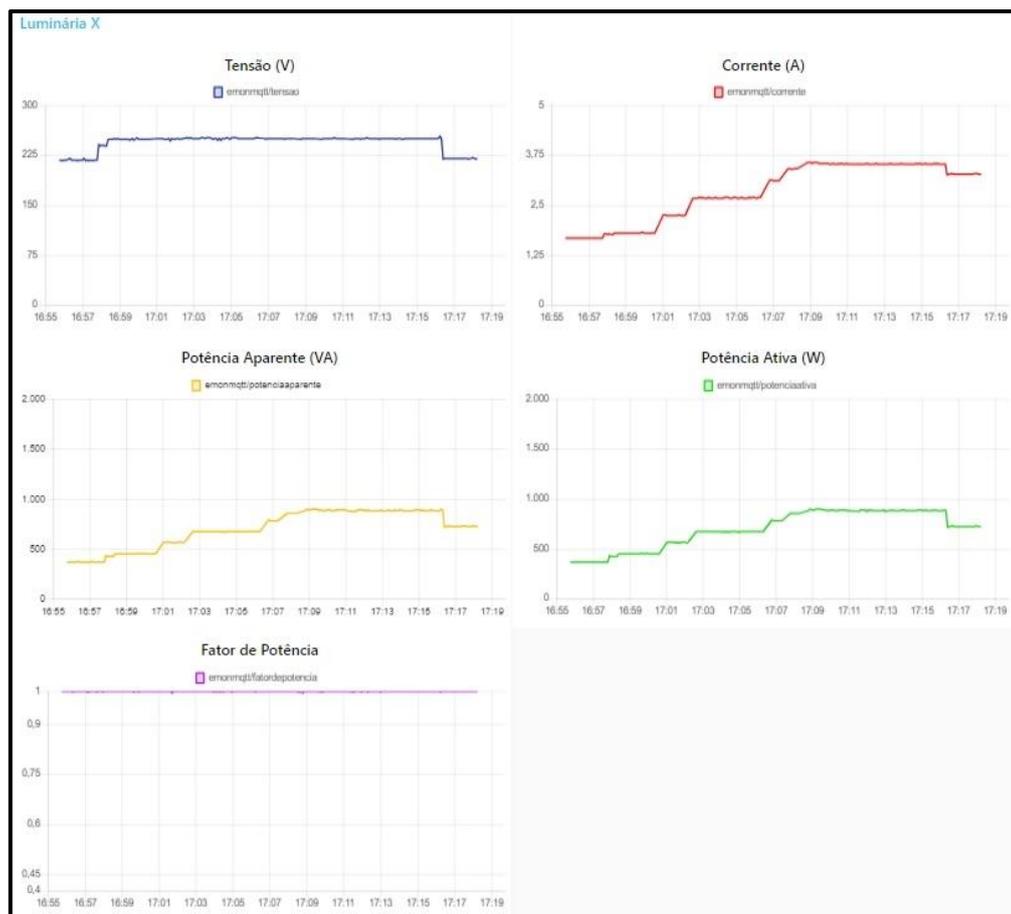


Figura 41 - Layout da interface gerada pelo Node-RED.

Fonte: Elaboração própria.

4.5.1.2 Criação de Notificações

Outro recurso presente no Node-RED se refere à possibilidade da criação de alertas que aparecem dentro do ambiente do *dashboard* em forma de *pop-up*. Dessa forma, criou-se dois alertas para notificar o usuário. O primeiro para quando alguma luminária está acesa fora do horário definido pela Resolução 2.590/2019. Para isso, a detecção de corrente foi o método utilizado, sendo definido um valor mínimo para que o alerta fosse gerado. O segundo alerta notifica quando uma ou mais luminárias podem estar com defeito. Nesse sentido, a análise da potência ativa foi o método utilizado, tendo como premissa o conhecimento prévio da carga total utilizada.

O Bloco 2, em verde (Figura 40), apesar de não estar sendo utilizado para juntar as mensagens de mais de um bloco, irá criar um objeto chave/valor a partir da mensagem enviada pelo primeiro bloco, facilitando a manipulação de dados.

O Bloco 3 do segmento do bloco de “Corrente” é responsável, por meio da programação em JavaScript, por comparar o valor de corrente recebido com o valor mínimo definido. Além disso, foi criada uma variável de controle que muda de estado a depender do resultado da comparação. Caso a corrente seja maior que o valor mínimo definido dentro do horário pré-estabelecido o estado da variável de controle muda para “verdadeiro” e envia a mensagem “LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA” para o bloco seguinte. Caso contrário, o estado da variável de controle é “falso” e envia a mensagem “NaN” para o bloco seguinte.

Já o Bloco 3 do segmento de “Potência Ativa” possui funcionamento similar ao exemplificado acima. Nesse caso, entretanto, compara-se o valor de potência ativa recebido com o valor arbitrado que depende da carga total instalada. Caso a potência ativa seja menor que o valor definido dentro do horário pré-estabelecido, será enviada a mensagem “UMA OU MAIS LUMINÁRIAS COM DEFEITO”. Caso contrário, a mensagem “NaN” será enviada para o bloco seguinte.

O Bloco 4 irá apenas verificar o estado da variável de controle. Caso verdadeiro, ele irá enviar a mensagem para o sexto bloco. Caso falso, nada irá acontecer. O Bloco 5 é responsável por disponibilizar o alerta dentro do ambiente do *dashboard*, podendo ser configurada a posição e o tempo de duração. A Figura 42 mostra o alerta gerado quando há carga fora do horário definido pela Resolução 2590/2019. Já a Figura 43 mostra o alerta gerado quando são identificadas uma ou mais luminárias com defeito.

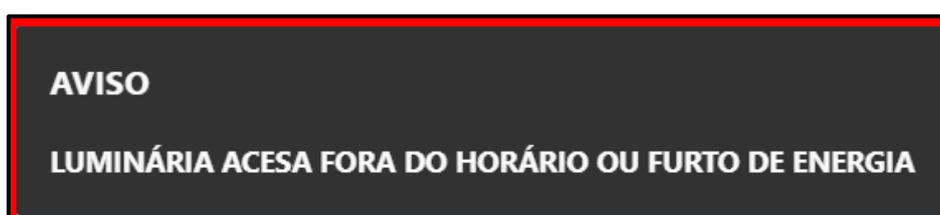


Figura 42 - Notificação gerada no dashboard do Node-RED caso a corrente seja maior que o valor mínimo definido dentro do horário pré-estabelecido.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 43 - Notificação gerada no dashboard do Node-RED caso a potência ativa seja menor que o valor definido dentro do horário pré-estabelecido.

Fonte: Elaboração própria.

4.5.1.3 Disponibilização dos Dados em Arquivo .txt

O Node-RED também possui funções que permitem armazenar dados em arquivos de texto. Neste sentido, o projeto prevê que os dados adquiridos serão salvos em um arquivo .txt de forma que possam ser importados por outras ferramentas de análise de dados como o Excel e o Power BI.

O segundo bloco, de cor preta (Figura 40), é responsável por receber e juntar as mensagens do Bloco 1, representado por todos os blocos MQTT, criando um objeto chave/valor que irá facilitar a manipulação desses dados.

O terceiro bloco, por meio da programação em JavaScript, recebe a mensagem enviada pelo segundo, acrescenta a data (dia/mês/ano) e a hora (hora/minuto), de forma que esta seja a primeira da fila, e a envia para o quinto bloco. O Bloco 4 foi adicionado com o objetivo de garantir que os alertas gerados sejam o último da fila, uma vez que o quinto bloco irá juntar as três mensagens e disponibilizá-las de acordo com a ordem de chegada.

O sexto bloco, por meio da programação em JavaScript, é responsável por manipular as mensagens geradas de forma a não haver duplicação, caso ambas sejam “NaN”. Além disso, garante que haja apenas uma coluna destinada para as mensagens, uma vez que, caso sejam diferentes e apenas uma delas seja “NaN”, somente a outra será enviada. Devido ao caráter mutuamente exclusivo das mensagens geradas, não é possível que a variável de controle de ambas seja verdadeira. Após esse processo, são enviados apenas os valores acrescidos de “\n” (caractere especial para formatação de texto que indica o fim de uma linha e o início de outra) para o sétimo bloco, que cria um arquivo de texto, ou abre um existente, e salva os dados na formatação desenvolvida. A Figura 44 mostra como os dados foram salvos.

```

TESTE.txt
Arquivo  Editar  Exibir
05/04/2024 12:31,1.06,0.0455,0.05,-0.01,-0.1165,NaN
05/04/2024 12:31,1.17,0.046,0.05,-0.01,-0.2159,NaN
05/04/2024 12:31,1.37,0.046,0.06,0,-0.0287,NaN
05/04/2024 12:31,1.14,0.0734,0.08,0.01,0.0892,NaN
05/04/2024 12:31,1.16,0.0489,0.06,0.01,0.1318,NaN
05/04/2024 12:31,1.22,0.0758,0.09,0.02,0.1688,NaN
05/04/2024 12:32,1.32,0.0442,0.06,0.01,0.1194,NaN
05/04/2024 12:32,1.18,0.0556,0.07,0,0.009,NaN
05/04/2024 12:32,1.32,0.0484,0.06,0.01,0.1221,NaN
05/04/2024 12:32,1.15,0.0466,0.05,0,-0.0264,NaN
05/04/2024 12:32,1.26,0.0541,0.07,0,-0.0606,NaN
05/04/2024 12:32,1.12,0.0699,0.08,0.01,0.1838,NaN
05/04/2024 12:32,1.37,0.0646,0.09,0.02,0.2394,NaN
05/04/2024 12:32,1.33,0.0939,0.12,-0.04,-0.3574,NaN
05/04/2024 12:32,220.82,0.4946,109.23,53.66,0.4913,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:32,220.89,0.4745,104.82,51.07,0.4872,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:32,222.68,0.4736,105.46,52.02,0.4932,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,221.08,0.4692,103.74,51.57,0.4971,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,220.86,0.4745,104.79,53.69,0.5123,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,220.91,0.4762,105.2,51.9,0.4933,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,221.36,0.4802,106.29,51.25,0.4822,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,221.64,0.4782,105.99,52.37,0.4941,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,221.66,0.4831,107.09,50.58,0.4724,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,221.59,0.4755,105.37,50.07,0.4752,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,221.99,0.485,107.67,51.24,0.4758,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,221.03,0.4677,103.39,44.48,0.4303,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
05/04/2024 12:33,220.86,0.4696,103.71,50.77,0.4895,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
Ln 102, Col 10 49.139 caracteres 100% Unix (LF) UTF-8

```

Figura 44 - Dados salvos em arquivo .txt a partir de formatação no Node-RED.

Fonte: Elaboração própria.

4.6 Teste de Funcionamento

No intuito de averiguar o desempenho do sistema desenvolvido, foram realizados ensaios com quatro cargas, em que foi priorizada a obtenção de fatores de potência distintos. As medições foram realizadas no laboratório LabLux – UFF, com os mesmos equipamentos utilizados na calibração do sistema. As conexões realizadas para esse procedimento são as mesmas que as apresentadas na Figura 38.

Antes de realizar as medições, as cargas foram estabilizadas por 30 minutos. Ao fim da estabilização, em cada carga foram auferidas dez medições, havendo 1 minuto de intervalo entre cada medida. Em sequência, realizou-se a média dos dados coletados e, ao final, o resultado foi comparado com os dados fornecidos pelo wattímetro para calcular o erro relativo entre eles. Como os equipamentos costumam ser do tipo bivolt, os ensaios foram realizados em 127 V e 220 V. No intuito de estabelecer um critério de avaliação, o desempenho do sistema foi avaliado de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 - Critério de avaliação de desempenho.

Avaliação	Critério
Bom	$< 1\%$
Satisfatório	$1\% \leq \text{erro} < 3\%$
Regular	$3\% \leq \text{erro} < 4\%$
Insatisfatório	$\geq 4\%$

Fonte: Elaboração própria.

Com o objetivo de demonstrar a escalabilidade do projeto para o monitoramento de sistemas de iluminação pública, um segundo sistema, idêntico ao primeiro, foi desenvolvido. O teste consistiu em medir simultaneamente duas cargas de luminárias LED, devendo os sistemas estarem conectados em redes de Wi-Fi distintas. No Sistema 1, foram utilizadas cinco luminárias LED de 150 W. No Sistema 2, foram utilizadas cinco luminárias LED de 100 W. Para garantir que ambos os sistemas funcionassem sem interferências, foi necessário mudar o nome dos tópicos e do *client id* em código para o segundo sistema.

Diferentemente do teste de desempenho executado, os ensaios foram realizados diretamente na rede de 220 V, ou seja, a carga estava sujeita a possíveis flutuações e distorções da tensão de alimentação, simulando a forma a qual estariam instaladas no sistema de iluminação pública. Além disso, o wattímetro não foi utilizado. Após 30 min de estabilização, as cargas foram ensaiadas por 1 h, resultando em 60 medições no total. A média dos resultados será disponibilizada em forma de tabela. A Figura 45 mostra o esquemático das ligações necessárias para a fazer o procedimento.

No intuito de se ter parâmetros de comparação para os resultados obtidos, ambas as cargas totais foram previamente medidas com o wattímetro Yokogawa WT-210 após 30 min de estabilização em duas situações: diretamente conectada à fonte de potência e diretamente conectada à rede. O Node-RED deverá apresentar os resultados em abas distintas dentro da página de *dashboard*, além de salvar os dados em arquivos de texto diferentes. Para um dos fluxos, dado o horário de realização dos ensaios (11h-12h), foi induzido via programação que as luminárias estariam acesas dentro do horário permitido, inibindo, dessa forma, a geração de alertas. Esse procedimento foi realizado alterando o horário pré-estabelecido no terceiro bloco (verde) da Figura 40, como explicado no Capítulo 4.5.1.2. O fluxo final desenvolvido pode ser verificado no Apêndice D.

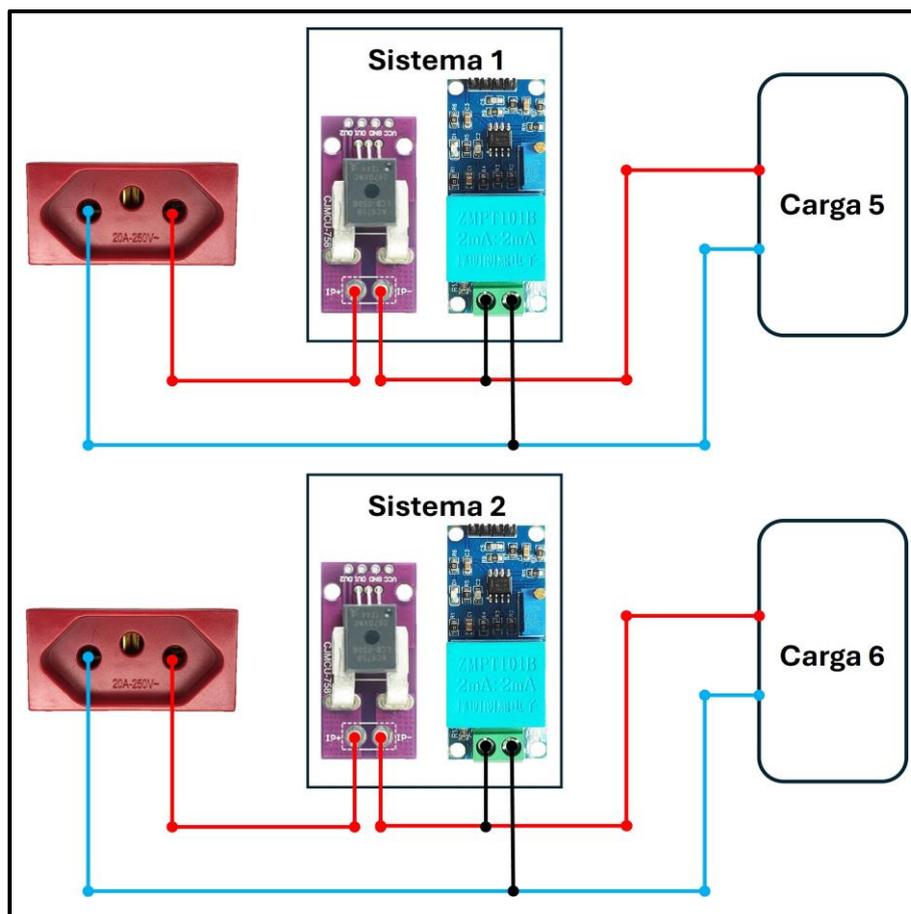


Figura 45 - Conexões realizadas para o teste de escalabilidade.

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, com o intuito de demonstrar o funcionamento do alerta que identifica quando uma ou mais luminárias podem estar com defeito a partir da análise da potência da carga, o Sistema 2 foi utilizado novamente com a carga de cinco luminárias LED de 150W. O teste consistiu em medir a carga em funcionamento sob condições normais por um certo período e, após, desligar uma das luminárias, dessa forma, simulando uma condição de falha nesse conjunto.

Assim como no teste de escalabilidade, os ensaios foram realizados diretamente na rede de 220 V, simulando a forma a qual estariam instaladas no sistema de iluminação pública. Novamente, o wattímetro não foi utilizado. Após 30 min de estabilização, a carga foi ensaiada por 30 min, resultando em 30 medições no total. Durante o ensaio, nos primeiros cinco minutos, a carga funcionou sob condições normais. Após esse período, uma das luminárias foi desligada, permanecendo assim por mais cinco minutos até ser ligada novamente. Esse processo se repetiu até que o tempo de ensaio definido fosse atingido. A Figura 46 mostra o esquemático das ligações necessárias para a fazer o procedimento.

Para o estabelecimento de um critério que realize o disparo da mensagem, deve-se definir o quão menor a potência ativa medida deve ser em relação ao da carga total. É necessário ressaltar que a potência ativa da carga deve ser conhecida, dessa forma, o critério deve ser determinado caso a caso. Além disso, devido ao fato da Portaria n.º 62 [10] não estabelecer um limite mínimo de potência ativa em relação à declarada, simplesmente fixar um valor relativamente menor pode resultar no funcionamento inadequado do disparo do alerta. Nesse sentido, no intuito de definir um critério mais sólido do que meramente subtrair a potência ativa declarada da luminária da carga total, optou-se por consolidá-lo apenas após o teste de escalabilidade, uma vez que os valores nominais da carga conectada à rede seriam adquiridos.

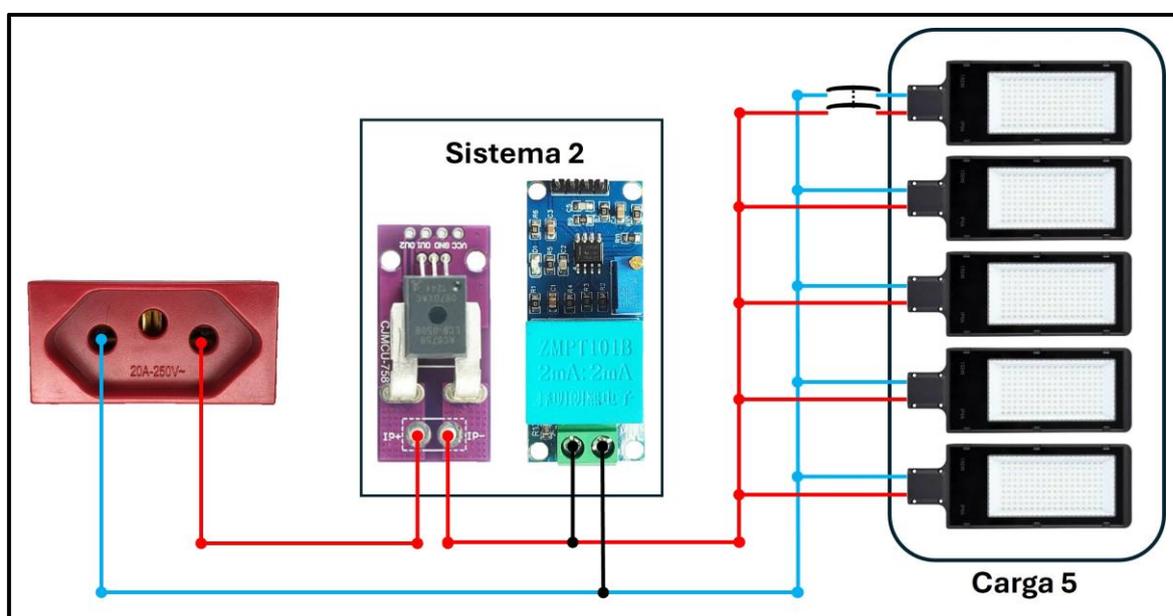


Figura 46 - Conexões realizadas para o teste de escalabilidade.
Fonte: Elaboração própria.

Capítulo 5 - Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com os testes descritos no Capítulo 4. No primeiro teste, o de desempenho, serão abordados os resultados comparativos entre o que foi medido pelo wattímetro Yokogawa WT-210 e pelo sistema desenvolvido. No segundo teste, o de escalabilidade do projeto, será apresentada a capacidade do sistema desenvolvido de fornecer dados relevantes em diferentes situações.

5.1 Teste de Desempenho

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foram utilizadas quatro cargas no total, sendo três delas compostas por lâmpadas LED com diferentes perfis de potência e fator de potência, e uma composta por lâmpadas halógenas. Nesse sentido, a Tabela 17 mostra as cargas que foram utilizadas para os ensaios.

Tabela 17 - Cargas utilizadas.

Carga	Descrição
1	7 lâmpadas halógenas de 100 W (220 V) FP = 1
2	10 lâmpadas LED de 40 W FP $\geq 0,92$
3	9 lâmpadas LED de 20 W FP $\geq 0,7$
4	10 lâmpadas LED de 4,9W FP $\geq 0,4$

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 18, são apresentados os valores obtidos em relação à tensão medida. Comparando os resultados entre o sistema desenvolvido e o wattímetro, observa-se que em 220 V foi obtido um bom desempenho, com um erro relativo menor que 1% para todas as cargas analisadas. Em 127 V, entretanto, os resultados foram diversos, obtendo um bom desempenho para as Cargas 1 e 4, e um desempenho satisfatório para as Cargas 2 e 3. Para o perfil das cargas 1, 2 e 3, o sistema tendeu a ser mais exato quando alimentado em 220 V.

Tabela 18 - Erro relativo da tensão medida.

Carga	220 V			127 V		
	Sistema (V)	WT-210 (V)	Erro (%)	Sistema (V)	WT-210 (V)	Erro (%)
1	220,23	219,96	0,12	126,35	127,04	0,54
2	219,03	220,08	0,48	123,98	127,02	2,40
3	219,91	219,96	0,02	125,21	127,12	1,50
4	221,46	220,01	0,66	127,25	127,06	0,15

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Na Tabela 19, são apresentados os resultados obtidos em relação à corrente medida. Em ambas as tensões de alimentação, observa-se que o erro relativo é menor que 1% para todas as cargas ensaiadas, dessa forma, sendo obtido um bom desempenho. Além disso, a partir das cargas analisadas, é possível observar que o sistema desenvolvido apresenta uma tendência em relação à exatidão da corrente medida, onde, para cada uma das cargas, o erro relativo foi menor na tensão de alimentação em que se obtém a maior corrente. Na Carga 1, composta por lâmpadas halógenas, caracterizando assim uma carga puramente resistiva, o melhor desempenho foi obtido em 220 V. Nas demais cargas, compostas por lâmpadas LED que possuem um driver eletrônico para garantir uma potência constante numa determinada faixa de tensão, o melhor desempenho foi obtido em 127 V.

Tabela 19 - Erro relativo da corrente medida.

Carga	220 V			127 V		
	Sistema (A)	WT-210 (A)	Erro (%)	Sistema (A)	WT-210 (A)	Erro (%)
1	3,2874	3,2871	0,01	2,4269	2,4337	0,28
2	1,3406	1,3531	0,93	2,3069	2,3209	0,60
3	0,6850	0,6788	0,91	1,0510	1,0518	0,08
4	0,4917	0,4889	0,57	0,6664	0,6653	0,17

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Na Tabela 20, são apresentados os resultados obtidos em relação à potência ativa medida. Observa-se que os resultados foram diversos. Em ambas as tensões, um bom desempenho foi obtido apenas na Carga 1, com a maior exatidão ocorrendo em 220 V. Para a Carga 2 o sistema obteve um desempenho satisfatório, com a maior exatidão ocorrendo também em 220 V. Para a Carga 3 o desempenho foi bom quando alimentado em 220 V e

satisfatório quando alimentado em 127 V, dessa forma, seguindo a tendência de apresentar maior exatidão quando submetido a tensões maiores. Já para a Carga 4, entretanto, o sistema obteve um desempenho melhor em 127 V, considerado satisfatório nesse nível de tensão. Já em 220 V, o desempenho foi regular, sendo este último o pior resultado obtido nesta análise.

Tabela 20 - Erro relativo da potência ativa medida.

Carga	220 V			127 V		
	Sistema (W)	WT-210 (W)	Erro (%)	Sistema (W)	WT-210 (W)	Erro (%)
1	723,42	723,10	0,04	306,40	309,20	0,90
2	281,79	285,30	1,23	283,47	291,30	2,69
3	119,73	118,80	0,78	124,59	126,30	1,35
4	51,10	49,40	3,44	49,19	48,40	1,63

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Na Tabela 21, são apresentados os valores obtidos em relação a potência aparente medida. Observa-se que, para as cargas 1, 2 e 3, o desempenho do sistema para a medição desta grandeza foi similar ao da potência ativa, inclusive em relação à ordem de grandeza dos erros obtidos. Já para a Carga 4, entretanto, foram observadas melhorias em relação à exatidão, tendo em vista que em 127 V o desempenho foi bom, enquanto em 220 V foi satisfatório.

Tabela 21 - Erro relativo da potência aparente medida.

Carga	220 V			127 V		
	Sistema (VA)	WT-210 (VA)	Erro (%)	Sistema (VA)	WT-210 (VA)	Erro (%)
1	723,97	723,10	0,12	306,64	309,20	0,83
2	293,63	297,80	1,40	286,00	293,80	2,65
3	150,83	149,30	0,89	131,60	133,70	1,57
4	108,87	107,60	1,18	84,81	84,50	0,36

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Na Tabela 22, são apresentados os resultados obtidos em relação ao fator de potência medido. Comparando os resultados entre o sistema desenvolvido e o wattímetro para as cargas 1, 2 e 3, observa-se que um bom desempenho foi obtido em ambas as tensões de alimentação, com os valores medidos pelo sistema estando bem próximos aos do wattímetro.

Já para a Carga 4, entretanto, o desempenho foi satisfatório, com a maior exatidão ocorrendo quando a carga foi alimentada em 127 V. Deve-se destacar que, em ambas as tensões, a diferença entre os resultados não é maior que 0,7° elétricos.

Tabela 22 - Erro relativo do fator de potência medido.

Carga	220 V			127 V		
	Sistema	WT-210	Erro (%)	Sistema	WT-210	Erro (%)
1	0,9992	1,0000	0,08	0,9992	1,0000	0,08
2	0,9597	0,9593	0,04	0,9912	0,9916	0,04
3	0,7948	0,7962	0,18	0,9468	0,9457	0,11
4	0,4691	0,4590	2,19	0,5800	0,5729	1,23

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a Carga 4, de menor potência e fator de potência, foi a que apresentou o maior erro relativo em 220 V, sendo de 3,44% para a potência ativa e 2,19% para o fator de potência. As demais cargas apresentaram desvios menores, com destaque para o fator de potência, cujo erro relativo foi menor que 0,2% para ambas as tensões ensaiadas. Desta forma, depreende-se que a exatidão das outras grandezas está diretamente relacionada a exatidão dos módulos utilizados, cuja incerteza é carregada para os valores medidos de potência ativa e aparente.

Dado que o intuito do sistema desenvolvido é o de medir cargas maiores e que o perfil de carga a ser medido se assemelha mais ao da Carga 2, já que as luminárias devem possuir fator de potência maior ou igual a 0,92, como apresentado no Capítulo 2.4.2, a Carga 4 representa o pior caso, uma vez que os ruídos no ADC do Arduino podem ter uma influência maior para com o sinal coletado pelo módulo de corrente. O mesmo se aplica ao módulo de tensão, em que a exatidão foi menor em 127 V. Além disso, a incidência de correntes harmônicas pode afetar as leituras, visto que distorcem o formato da onda, deixando, assim, de ser puramente senoidal. As cargas 2, 3 e 4, provenientes de fontes chaveadas, introduzem correntes harmônicas na rede. O Apêndice E mostra o perfil de corrente das cargas utilizadas e da tensão da fonte de alimentação.

5.2 Teste de Escalabilidade

Com o propósito de avaliar a escalabilidade do sistema desenvolvido, foram utilizadas duas cargas, sendo estas compostas por luminárias LED de mesma potência e fator de potência. Nesse sentido, a Tabela 23 mostra as cargas que foram utilizadas para os ensaios e a Tabela 24 mostra as grandezas nominais das cargas quando conectadas na fonte de potência e na rede. Observa-se que, apesar das flutuações de tensão, os valores obtidos são similares, com o fator de potência sendo levemente menor quando conectado à rede devido a maior presença de harmônicos na tensão. O Apêndice E mostra o perfil de tensão as quais as cargas poderiam estar submetidas na rede e seu perfil de corrente quando alimentado pela fonte de potência e pela rede. Durante esse procedimento a tensão RMS média da rede foi de 217,6 V.

Tabela 23 - Cargas utilizadas.

Carga	Descrição
5	5 luminárias LED de 150 W FP $\geq 0,97$
6	5 luminárias LED de 100 W FP $\geq 0,97$

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 24 - Valores nominais das cargas ensaiadas em 220 V.

Carga	Pacific 110-ADX				Rede			
	Corrente (A)	Potência Ativa (W)	Potência Aparente (VA)	FP	Corrente (A)	Potência Ativa (W)	Potência Aparente (VA)	FP
5	3,3352	719,3	733,9	0,9802	3,3490	720,0	735,3	0,9793
6	2,2841	485,9	502,5	0,9670	2,2943	484,5	503,3	0,9640

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

A Figura 47 mostra a forma como o Node-RED disponibilizou as abas criadas, mostrando que é possível acompanhar mais de um sistema em uma única página, podendo ser expandido conforme adiciona-se novos dispositivos, e a facilidade de escolher qual dos módulos disponíveis deseja-se visualizar para acompanhar os resultados.

Na Figura 48 e na Figura 49 são apresentados os resultados finais disponibilizados em *dashboard* após 1h de funcionamento de ambos os sistemas, mostrando que operam de forma estável, podendo fornecer uma visão geral do funcionamento da carga monitorada. Já na Figura 50 e na Figura 51 são apresentados, parcialmente, os resultados que foram salvos

em arquivo de texto, mostrando que os sistemas operam de forma independente, com esses dados, disponibilizados de forma a serem facilmente exportados para *softwares* de análise de dados, podendo ser utilizados futuramente para análises mais aprofundadas. A média dos resultados obtidos são disponibilizados na Tabela 25, sendo bem coerentes com os valores adquiridos inicialmente (Tabela 24) dada as possíveis variações da rede.



Figura 47 – Abas para a seleção do sistema a ser monitorado.

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

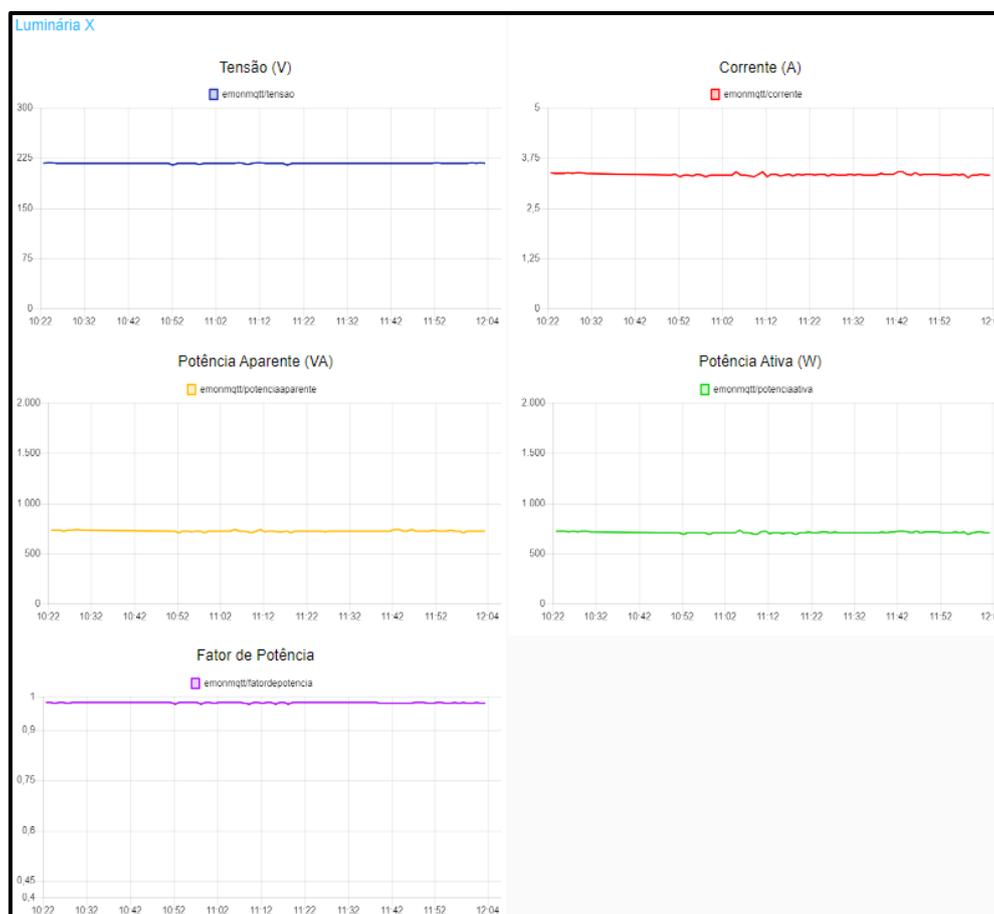


Figura 48 - Dashboard referente a Carga 1.

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

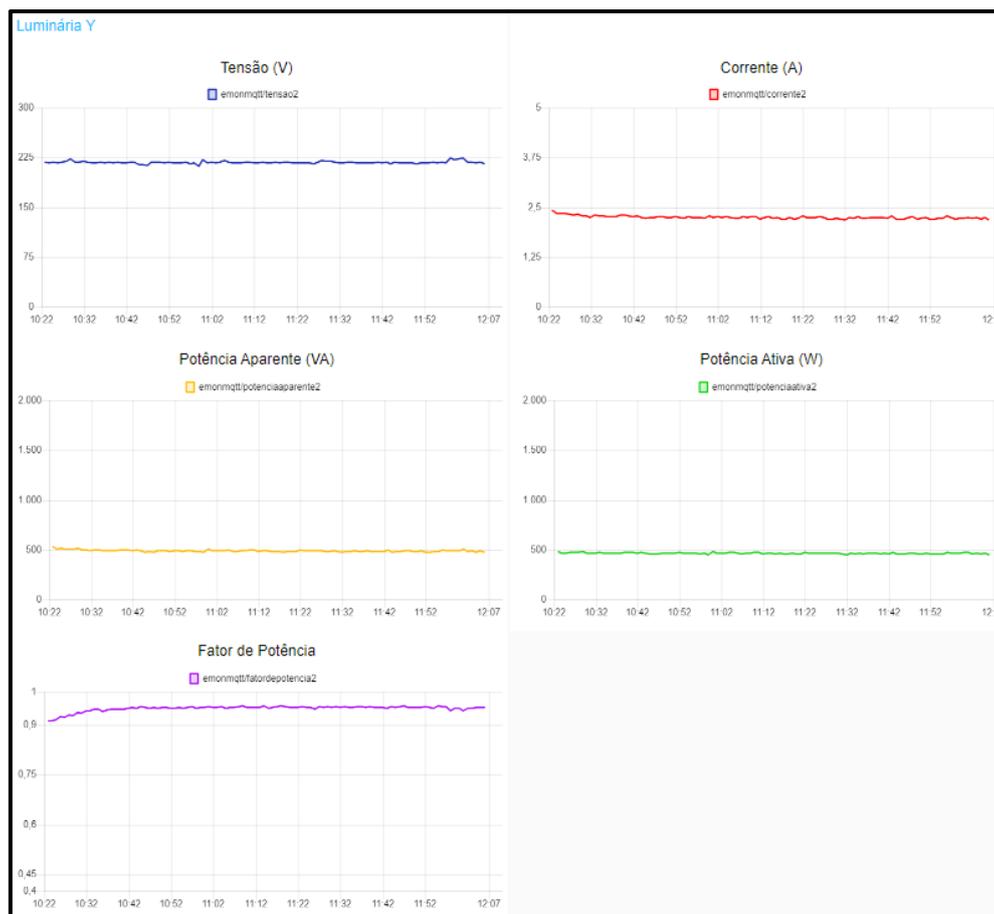


Figura 49 - Dashboard referente a Carga 2.

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Tabela 25 - Média dos resultados obtidos em 220 V.

Carga	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa (W)	Potência Aparente (VA)	FP
5	216,73	3,3319	708,91	722,14	0,9817
6	217,59	2,2312	462,78	485,49	0,9532

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

TESTE.txt

Arquivo Editar Exibir

```

11/07/2024 11:00,216.69,3.3234,720.14,707.39,0.9823,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:01,217.16,3.3206,721.09,707.61,0.9813,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:02,216.95,3.3246,721.26,708.34,0.9821,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:03,216.75,3.329,721.57,709.32,0.983,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:04,216.96,3.3196,720.21,707.75,0.9827,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:05,217.19,3.4111,740.86,727.7,0.9822,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:06,216.8,3.3282,721.54,709.14,0.9828,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:07,217.23,3.3227,721.8,709.08,0.9824,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:09,215.21,3.2694,703.63,688.54,0.9786,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:10,216.52,3.3406,723.31,710.68,0.9825,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:11,217.42,3.3966,738.51,725.91,0.9829,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:12,217.22,3.2832,713.18,698.72,0.9797,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:13,216.12,3.3424,722.38,709.52,0.9822,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:14,216.52,3.3306,721.16,708.11,0.9819,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:15,216.7,3.2988,714.86,699.36,0.9783,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:16,216.66,3.3119,717.54,705.05,0.9826,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:17,216.85,3.3303,722.19,709.11,0.9819,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:18,214.43,3.2984,707.27,691.29,0.9774,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:19,216.96,3.3306,722.6,709.35,0.9817,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:20,216.66,3.3255,720.51,707.4,0.9818,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:21,216.7,3.3451,724.89,711.89,0.9821,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:22,216.82,3.3302,722.05,709.08,0.982,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:23,216.55,3.3274,720.55,707.72,0.9822,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:24,217.01,3.3421,725.27,712.6,0.9825,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:25,216.6,3.3452,724.57,711.48,0.9819,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:26,216.28,3.3034,714.47,701.37,0.9817,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:27,216.33,3.3484,724.35,711.68,0.9825,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA
11/07/2024 11:28,217.01,3.3345,721.46,708.46,0.982,LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA

```

Ln 10, Col 55 7.144 caracteres 100% Unix (LF) UTF-8

Figura 50 - Dados salvos em arquivo de texto referentes a Carga 1.

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

TESTE2.txt

Arquivo Editar Exibir

```

11/07/2024 11:00,216.98,2.2412,486.29,464.34,0.9549,NaN
11/07/2024 11:01,217.77,2.2582,491.77,468.76,0.9532,NaN
11/07/2024 11:02,216.64,2.2501,487.45,463.98,0.9518,NaN
11/07/2024 11:03,217.6,2.2569,491.11,468.88,0.9547,NaN
11/07/2024 11:04,219.74,2.2487,494.13,469.26,0.9497,NaN
11/07/2024 11:05,217.51,2.2281,484.63,461.5,0.9523,NaN
11/07/2024 11:06,216.6,2.214,479.55,457.05,0.9531,NaN
11/07/2024 11:07,216.93,2.2584,489.91,468.56,0.9564,NaN
11/07/2024 11:08,216.57,2.2476,486.76,465.75,0.9568,NaN
11/07/2024 11:09,218.45,2.2657,494.94,471.93,0.9535,NaN
11/07/2024 11:10,217.9,2.2671,494,470.42,0.9523,NaN
11/07/2024 11:11,216.72,2.2087,478.67,455.62,0.9518,NaN
11/07/2024 11:12,217.09,2.2411,486.53,462.91,0.9515,NaN
11/07/2024 11:13,217.33,2.2531,489.65,468.37,0.9565,NaN
11/07/2024 11:14,216.62,2.2172,480.3,456.96,0.9514,NaN
11/07/2024 11:15,217.05,2.2321,484.48,461.61,0.9528,NaN
11/07/2024 11:16,217.85,2.2047,480.3,459.04,0.9557,NaN
11/07/2024 11:17,216.58,2.2007,476.64,456.8,0.9584,NaN
11/07/2024 11:18,217.34,2.2315,484.99,462.79,0.9542,NaN
11/07/2024 11:19,217.39,2.2075,479.87,457.76,0.9539,NaN
11/07/2024 11:20,217.04,2.2232,482.53,459.65,0.9526,NaN
11/07/2024 11:21,217.03,2.2833,495.56,472.66,0.9538,NaN
11/07/2024 11:22,216.43,2.2473,486.38,464.79,0.9556,NaN
11/07/2024 11:23,217.19,2.2462,487.84,464.68,0.9525,NaN
11/07/2024 11:24,217.06,2.238,485.79,462.44,0.9519,NaN
11/07/2024 11:25,215.88,2.2568,487.22,461.83,0.9479,NaN
11/07/2024 11:26,217.93,2.2388,487.89,465.89,0.9549,NaN
11/07/2024 11:27,220.35,2.2027,485.36,462.56,0.953,NaN
11/07/2024 11:28,216.44,2.2060,482.50,461.0,0.9551,NaN

```

Ln 1, Col 1 3.879 caracteres 100% Unix (LF) UTF-8

Figura 51 - Dados salvos em arquivo de texto referentes a Carga 2.

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.



Figura 53 – Dashboard referente a ensaio.

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Tabela 26 - Média dos resultados obtidos.

Luminárias Ligadas	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa (W)	Potência Aparente (VA)	FP
4	218,86	2,6641	565,24	583,05	0,9694
5	218,06	3,3509	710,26	730,72	0,9720

Fonte: Elaboração própria a partir de resultados experimentais.

Capítulo 6 - Conclusão

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver um sistema capaz de monitorar os sistemas de iluminação pública no Brasil para auxiliar as prefeituras e concessionárias na manutenção desses ativos. O sistema proposto utiliza dispositivos pequenos, de baixo custo e de fácil instalação. Os dados medidos são disponibilizados de forma intuitiva por meio de um *dashboard* no Node-RED, que também salva os dados recebidos em um arquivo .txt. A comunicação entre os dispositivos é feita através do protocolo MQTT e o sistema foi testado em relação ao desempenho e a escalabilidade.

No teste de desempenho, cinco grandezas elétricas de quatro cargas distintas medidas pelo sistema foram comparadas com o wattímetro Yokogawa WT-210, sendo obtido, no pior caso, um erro relativo menor que 3,5%. Ficou evidente também que, para o sistema desenvolvido, a exatidão das leituras está diretamente correlacionada a exatidão dos sensores utilizados e do perfil de carga a ser monitorado. No teste de escalabilidade, sendo utilizados dois sistemas idênticos conectados a redes de Wi-Fi distintas, foi demonstrada a capacidade de operarem de forma independente e estável, fornecendo resultados coerentes com aqueles obtidos em situações em que o perfil de tensão fornecido era controlado. Já no teste para identificação de luminárias defeituosas, a partir da análise da potência ativa medida, foi evidenciada a capacidade que o sistema tem para este fim.

Dessa forma, a partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios, é possível afirmar que seu desempenho é satisfatório, mostrando potencialidade de implementação para o monitoramento da iluminação pública. Além disso, a calibração dos sensores em laboratório, com equipamentos que possuem índices de incerteza rastreáveis, agrega segurança e credibilidade nos dados compartilhados na interface criada.

A biblioteca EmonLib é uma ferramenta versátil, sendo utilizada em diversos projetos de medição de energia. Entretanto, por causa do problema encontrado em relação à defasagem entre os sinais proporcionados pelos sensores utilizados, mesmo quando a carga alimentada era puramente resistiva, a função disponível para correção de fase se mostrou insuficiente. Desta forma, foi necessário entender seu funcionamento interno e realizar as devidas modificações, sendo alterada, nesse caso, a forma como os dados medidos eram processados.

O Node-RED se mostrou uma ótima ferramenta para a criação da interface disponibilizada para o usuário e para a análise dos dados, que podem ser salvos em um arquivo .txt para posterior análise. A capacidade para a expansão conforme se adiciona novos dispositivos e a facilidade de escolher o módulo o qual se deseja monitorar, são pontos que se destacam, garantindo adaptabilidade e escalabilidade. A criação de notificações que identificam o funcionamento defeituoso de uma ou mais luminárias é uma das inúmeras possibilidades de personalização que podem ser proporcionadas pela ferramenta, se mostrando versátil para a realidade e necessidade do sistema público.

6.1 Trabalhos Futuros

Nesta seção, são apresentadas algumas indicações de trabalhos a serem desenvolvidos no futuro, que permitirão aperfeiçoar o sistema desenvolvido e um estudo mais completo sobre os sistemas de IP.

Primeiramente, deve-se salientar que, no atual estado da arte, o sistema é capaz de monitorar apenas sistemas monofásicos e bifásicos. Dessa forma, desenvolver um sistema para monitorar os sistemas trifásicos de iluminação seria uma abordagem natural a ser adotada.

O sistema de notificações possui diversos pontos que podem ser explorados. Conhecendo-se a potência total da carga a qual se pretende monitorar, uma notificação poderia ser criada para indicar um possível furto de energia no período noturno, por exemplo.

O atraso de fase proporcionado pelos módulos utilizados fez com que fosse adotada uma abordagem que consome mais memória das plataformas de *hardware*, o que pode limitar possíveis aprimoramentos. Dessa forma, seria interessante testar outros sensores disponíveis no mercado. Além disso, com o objetivo de diminuir o número de conexões e facilitar a instalação, um sensor de corrente não intrusivo poderia ser utilizado.

Um estudo em relação ao consumo de energia dos dispositivos também poderia ser realizado. O Arduino e o ESP-01 possuem modos de economia de energia (*sleep mode*), no entanto não foram utilizados neste trabalho. Como a aquisição e envio de dados ocorrem apenas uma vez por minuto, esses dispositivos poderiam estar no modo de economia durante esse intervalo para diminuir o consumo de energia.

Por fim, em parceria com as entidades responsáveis pela manutenção dos ativos de IP, seria importante verificar o funcionamento desse sistema em condições reais.

Bibliografia

- [1] A. da C. B. P. Souza, M. Z. Fortes, M. T. Santos, and V. P. Medina, “Potencial de eficiência dos sistemas de iluminação pública,” *Rev. Tecnol. Apl.*, no. April, pp. 18–32, Apr. 2022, doi: 10.48005/2237-3713rta2021v10n3p1832.
- [2] J. Araujo, L. Silva, L. Oliveira, M. Fortes, B. Borba, and A. Colombini, “Assessment of the Technological update of Public Lighting in Brazil,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 06, pp. 985–991, Jun. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9099674.
- [3] Z. Perko, D. Topic, and J. Perko, “Standardized system for monitoring and control of public lighting networks,” in *2017 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, IEEE, Oct. 2017, pp. 45–50. doi: 10.1109/SST.2017.8188668.
- [4] R. Santos and E. Farias, “Mapeamento do Desperdício de Energia Elétrica no Sistema de Iluminação Pública de uma Cidade da Fronteira Oeste Gaúcha,” *Rev. Acadêmica São Marcos*, vol. 4, pp. 47–70, 2014.
- [5] ANEEL, *Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010*. Brasil, 2010, p. 292.
- [6] ANEEL, *Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021*. Brasil, 2021, p. 307.
- [7] Senado Federal, “Municípios podem ter incentivo para modernizar iluminação pública com lâmpadas de LED,” 2023. [https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2023/09/26/municipios-podem-ter-incentivo-para-modernizar-iluminacao-publica-com-lampadas-de-led#:~:text=De acordo com o Banco,milhões de pontos de luz. \(accessed Feb. 13, 2024\).](https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2023/09/26/municipios-podem-ter-incentivo-para-modernizar-iluminacao-publica-com-lampadas-de-led#:~:text=De acordo com o Banco,milhões de pontos de luz. (accessed Feb. 13, 2024).)
- [8] C. A. B. de Pinho, “Os desafios da experiência brasileira com projetos de Parceria Público-Privada (PPP) de iluminação pública e cidades inteligentes (smart cities),” pp. 9–31, 2019.
- [9] INMETRO, *Portaria n.º 20, de 15 de fevereiro de 2017*. Brasil, 2017, p. 54.
- [10] INMETRO, *Portaria n.º 62, de 17 de fevereiro de 2022*. Brasil, 2022, p. 39.
- [11] E. S. Simões, “Circuito de Proteção Térmico de Reatores Eletromagnéticos do Conjunto de Iluminação Pública,” Instituto Tecnológico de Caratinga da DOCTUM Caratinga, 2017.
- [12] C. G. Casagrande, *Iluminação Pública - Panorama, Tecnologias Atuais e Novos Paradigmas*. Viseu, 2021.
- [13] ANEEL, *Resolução Homologatória nº 2.590, de 13 de agosto de 2019*. Brasil, 2019, p. 242.
- [14] C. Echevarría, J. F. Pessanha, M. Weiss, and M. Hallack, “Avaliação do potencial de eficiência energética na iluminação pública nos municípios paulistas,” *BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento*, 2023. <https://publications.iadb.org/publications/portuguese/viewer/Avaliac%CC3A3o-do-potencial-de-efici%CC3A4ncia-energetica-na-iluminac%CC3A3o-publica-nos-munic%CC3A3pios-paulistas.pdf> (accessed Jan. 15, 2024).
- [15] L. L. F. de F. Júnior, M. D. da Silva, and M. R. F. de Moura, “A Utilização do Geoprocessamento como Ferramenta de Gestão no Processo de Modernização da Iluminação Pública na Cidade do Recife-PE,” *Revista Científica ANAP Brasil*, vol. 14, no. 32, pp. 1–13, Apr. 2021. doi:

- <https://doi.org/10.17271/19843240143220202812>.
- [16] A. F. Areias *et al.*, “Procedimentos de Gerenciamento e Logística da Manutenção de Iluminação Pública,” *Instituto CGTI - Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação*, 2016.
<https://www.cgti.org.br/publicacoes/?s=Procedimentos+de+Gerenciamento+e+Logística+da+Manutenção+de+Iluminação+Pública> (accessed Jan. 15, 2024).
- [17] L. L. Fróes da Silva, “Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais,” Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2006.
- [18] MEMÓRIA, *Caminhos da Modernização: cronologia da energia elétrica no Brasil (1879-2007)*. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2007.
- [19] MEMÓRIA, *Reflexos da cidade: a iluminação pública no Rio de Janeiro*, 2nd ed. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2004.
- [20] Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, “Programa Luz Maravilha Vai Modernizar Toda a Iluminação Pública da Cidade com 450 Mil Pontos de LED,” 2022.
<https://infraestrutura.prefeitura.rio/noticias/programa-luz-maravilha-vai-modernizar-toda-a-iluminacao-publica-da-cidade-com-450-mil-pontos-de-led/> (accessed Feb. 03, 2024).
- [21] Eletrobras, “Workshop - 3ª Chamada Pública do Procel Reluz,” 2021.
<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Chamada-Publica-Procel-Reluz.aspx> (accessed Feb. 03, 2024).
- [22] Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, “Cidade do Rio terá mais 80 mil pontos de luz de LED, além das 457 mil novas luminárias já instaladas,” 2023.
<https://prefeitura.rio/infraestrutura/cidade-do-rio-tera-mais-80-mil-pontos-de-luz-de-led-alem-das-457-mil-novas-luminarias-ja-instaladas/#:~:text=À medida que o trabalho,presidente da Rioluz%2C Eduardo Feital.> (accessed Feb. 04, 2023).
- [23] Brasil, “Constituição da República Federativa do Brasil, promulgada em 5 de Outubro de 1988,” *Constituição Federal*, 1988.
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaoconsolidado.htm (accessed Feb. 05, 2024).
- [24] ANEEL, *Resolução n.º 456, de 29 de novembro de 2000*. Brasil, 2000, p. 59.
- [25] EPE, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica,” 2023.
<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica> (accessed Feb. 18, 2024).
- [26] A. T. Queiroz *et al.*, “Efficiency Evaluation in Public Lighting by Using LED and HPS Technologies,” *Int. J. Energy Sci. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 12–21, 2019.
- [27] A. M. E. Pereira, V. A. Teixeira, M. Z. Fortes, A. P. Fragoso, and G. M. Tavares, “Some considerations about LED technology in public lighting,” in *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, IEEE, Oct. 2015, pp. 561–565. doi: 10.1109/Chilecon.2015.7400433.
- [28] P. Ame, P. Acs, F. Ap, F. Mz, and T. Gm, “Considerations about LED Technology in Street Lighting Systems – Power Quality Analysis,” *J. Electr. Eng. Electron. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 5–8, 2016, doi: 10.4172/2325-9833.1000133.
- [29] S. Dutta Gupta, *Light Emitting Diodes for Agriculture*, no. October 2017. Singapore: Springer Singapore, 2017. doi: 10.1007/978-981-10-5807-3.
- [30] D. M. Bernades, W. C. Celeste, and G. de L. Diniz Chaves, “Eficiência energética na iluminação pública urbana: revisão bibliográfica dos equipamentos e tecnologias,” *Res. Soc. Dev.*, vol. 9, no. 7, pp. 1–21, May 2020, doi: 10.33448/rsd-v9i7.3957.
- [31] B. G. Serdeira, “Correntes Harmônicas em Dispositivos LED - Análise de Perdas e de Características Fotométricas,” Universidade Federal Fluminense, 2021.

- [32] M. H. Rashid, *Power Eletronics Handbook*. San Diego, California: Academic Press, 2011.
- [33] A. T. Queiroz *et al.*, “Efficiency Evaluation in Public Lighting by Using LED and HPS Technologies,” *Int. J. Energy Sci. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 12–21, 2019.
- [34] Accenture, “Iluminação Pública RIO Relatório - Estudo Técnico, Engenharia e Operação,” Rio de Janeiro, 2019.
- [35] INMETRO, *Portaria n.º 483, de 07 de dezembro de 2010*. Brasil, 2010, p. 34.
- [36] INMETRO, *Portaria n.º 18, de 14 de janeiro de 2022*. Brasil, 2022, p. 17.
- [37] INMETRO, *Portaria n.º 69, de 16 de fevereiro de 2022*. Brasil, 2022, p. 33.
- [38] International Standard IEC 61000-3-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2 Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*. 2001, p. 73.
- [39] O. Ayan and B. Turkay, “IoT-Based Energy Efficiency in Smart Homes by Smart Lighting Solutions,” in *2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA)*, IEEE, Jun. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/SIELA49118.2020.9167065.
- [40] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [41] S. Wang, Y. Hou, F. Gao, and X. Ji, “A novel IoT access architecture for vehicle monitoring system,” *2016 IEEE 3rd World Forum Internet Things, WF-IoT 2016*, pp. 639–642, 2016, doi: 10.1109/WF-IoT.2016.7845396.
- [42] J. C. Talwana and H. J. Hua, “Smart World of Internet of Things (IoT) and Its Security Concerns,” *Proc. - 2016 IEEE Int. Conf. Internet Things; IEEE Green Comput. Commun. IEEE Cyber, Phys. Soc. Comput. IEEE Smart Data, iThings-GreenCom-CPSCom-Smart Data 2016*, pp. 240–245, 2017, doi: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.64.
- [43] A. Omar *et al.*, “Smart City: Recent Advances in Intelligent Street Lighting Systems Based on IoT,” *J. Sensors*, vol. 2022, pp. 1–10, Nov. 2022, doi: 10.1155/2022/5249187.
- [44] A. Abdullah, S. H. Yusoff, S. A. Zaini, N. S. Midi, and S. Y. Mohamad, “Energy efficient smart street light for smart city using sensors and controller,” *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 558–568, Jun. 2019, doi: 10.11591/eei.v8i2.1527.
- [45] G. Gagliardi *et al.*, “Advanced Adaptive Street Lighting Systems for Smart Cities,” *Smart Cities*, vol. 3, no. 4, pp. 1495–1512, Dec. 2020, doi: 10.3390/smartcities3040071.
- [46] C. B. Soha, J. J. Tan, K. J. Tseng, W. L. Woo, and J. W. R. Teo, “Intelligent Street Lighting for Smart Cities,” in *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, IEEE, May 2018, pp. 1027–1031. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2018.8467767.
- [47] Z. Chen, M. Li, P. Liu, and S. Fan, “An Intelligent Lighting Control System for Urban Street Lamps Using Internet of Things,” *Mob. Inf. Syst.*, vol. 2022, pp. 1–10, Aug. 2022, doi: 10.1155/2022/5678532.
- [48] A. Adriansyah, A. W. Dani, and G. I. Nugraha, “Automation control and monitoring of public street lighting system based on internet of things,” in *2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, IEEE, Aug. 2017, pp. 231–236. doi: 10.1109/ICECOS.2017.8167140.
- [49] A. Adriansyah, S. Budiyanto, J. Andika, A. Romadlan, and N. Nurdin, “Public street lighting control and monitoring system using the internet of things,” in *AIP*

- Conference Proceedings*, 2020, p. 030103. doi: 10.1063/5.0000594.
- [50] Hao Deng, Xiaogao Xie, Weizhong Ma, and Yang Han, “A LED street lamp monitoring system based on Bluetooth wireless network and LabVIEW,” in *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, IEEE, Oct. 2016, pp. 2286–2291. doi: 10.1109/CompComm.2016.7925107.
- [51] N. T. Tung, L. M. Phuong, N. M. Huy, N. Hoai Phong, T. Le Dinh Huy, and N. Dinh Tuyen, “Development and Implementation of Smart Street Lighting System based on Lora Technology,” in *2019 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, IEEE, Oct. 2019, pp. 328–333. doi: 10.1109/ISEE2.2019.8921028.
- [52] M. F. Pinto, T. R. F. Mendonca, C. A. Duque, and H. A. C. Braga, “Street lighting system for power quality monitoring and energy-efficient illumination control,” in *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, IEEE, Jun. 2016, pp. 34–39. doi: 10.1109/ISIE.2016.7744861.
- [53] A. Quattrocchi, F. Martella, V. Lukaj, R. De Leo, M. Villari, and R. Montanini, “Designing a Low-Cost System to Monitor the Structural Behavior of Street Lighting Poles in Smart Cities,” *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6993, Aug. 2023, doi: 10.3390/s23156993.
- [54] F. Sanchez-Sutil and A. Cano-Ortega, “Development and implementation of a PQ analyser to monitoring public lighting installations with a LoRa wireless system,” *Internet of Things*, vol. 22, no. January, p. 100711, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.iot.2023.100711.
- [55] E. Ramos, “Arduino Basics,” in *Arduino and Kinect Projects*, Berkeley, CA: Apress, 2012, pp. 1–22. doi: 10.1007/978-1-4302-4168-3_1.
- [56] M. McRoberts, *Arduino Básico*, 2ª Edição. Novatec Editora, 2018.
- [57] ARDUINO, “What is Arduino?,” *ARDUINO*, 2018. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> (accessed Apr. 22, 2024).
- [58] T. M. B. dos Santos, “Gestão energética de iluminação pública centrada no utilizador,” Universidade Nova de Lisboa, 2021.
- [59] ARDUINO, “Arduino Hardware,” *ARDUINO*, 2022. <https://www.arduino.cc/en/hardware#shields-1> (accessed Apr. 22, 2024).
- [60] P. Macheso, T. D. Manda, S. Chisale, N. Dzupire, J. Mlatho, and D. Mukanyiligira, “Design of ESP8266 Smart Home Using MQTT and Node-RED,” *Int. Conf. Artif. Intell. Smart Syst.*, pp. 502–505, 2021, doi: 10.1109/ICAIS50930.2021.9396027.
- [61] S. de Oliveira, *Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI*, 1ª Edição. Novatec Editora, 2017.
- [62] M. Babiuch, P. Foltýnek, and P. Smutný, “Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing,” *2019 20th Int. Carpathian Control Conf.*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765944.
- [63] M. Chilcott and N. Kjærsgaard, “Low-cost wireless condition monitoring system for an ultracold atom machine,” *Internet of Things*, vol. 13, p. 100345, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.iot.2020.100345.
- [64] S. C.-H. Lee and P. J. Burke, “NanoStat: An open source, fully wireless potentiostat,” *Electrochim. Acta*, vol. 422, p. 140481, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.electacta.2022.140481.
- [65] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, “Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things,” in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, IEEE, Sep. 2017, pp. 143–148. doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.
- [66] J. W. Jolles, “Broad-scale applications of the Raspberry Pi: A review and guide for

- biologists,” *Methods Ecol. Evol.*, vol. 12, no. 9, pp. 1562–1579, 2021, doi: 10.1111/2041-210X.13652.
- [67] M. D. Mudaliar and N. Sivakumar, “IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi,” *Internet of Things*, vol. 12, p. 100292, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.iot.2020.100292.
- [68] Mukhtar Ahmad Sofi, “Bluetooth Protocol in Internet of Things (IoT), Security Challenges and a Comparison with Wi-Fi Protocol: A Review,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V5, no. 11, Nov. 2016, doi: 10.17577/IJERTV5IS110266.
- [69] M. A. Al-Shareeda, M. A. Saare, S. Manickam, and S. Karuppayah, “Bluetooth low energy for internet of things: review, challenges, and open issues,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 31, no. 2, p. 1182, Aug. 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v31.i2.pp1182-1189.
- [70] Wi-Fi Alliance, “Discover Wi-Fi | Wi-Fi Direct,” *Wi-Fi Alliance*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct> (accessed May 10, 2024).
- [71] A. I. Ali, S. Z. Partal, S. Kepke, and H. P. Partal, “ZigBee and LoRa based Wireless Sensors for Smart Environment and IoT Applications,” *2019 1st Glob. Power, Energy Commun. Conf.*, pp. 19–23, 2019, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778505.
- [72] S. G. Varghese, C. P. Kurian, V. I. George, A. John, V. Nayak, and A. Upadhyay, “Comparative study of zigBee topologies for IoT-based lighting automation,” *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 201–207, 2019, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-wss.2018.5065>.
- [73] A. Zourmand, A. L. Kun Hing, C. Wai Hung, and M. AbdulRehman, “Internet of Things (IoT) using LoRa technology,” in *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, IEEE, Jun. 2019, pp. 324–330. doi: 10.1109/I2CACIS.2019.8825008.
- [74] O. Khutsoane, B. Isong, and A. M. Abu-Mahfouz, “IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN,” in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Oct. 2017, pp. 6107–6112. doi: 10.1109/IECON.2017.8217061.
- [75] H. Tavares, B. Prado, K. Bispo, and D. Dantas, “A Non-intrusive Approach for Smart Power Meter,” in *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, Jul. 2018, pp. 605–610. doi: 10.1109/INDIN.2018.8471960.
- [76] A. Campos, “ESP8266: Comandos AT,” *BR-Arduino.org*, 2015. <https://br-arduino.org/2015/11/esp8266-comandos-at.html> (accessed May 28, 2024).
- [77] HiveMQ Team, “Introducing the MQTT Protocol – MQTT Essentials: Part 1,” *HiveMQ*, 2023. <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-1-introducing-mqtt/> (accessed Mar. 26, 2024).
- [78] HiveMQ Team, “MQTT Publish/Subscribe Architecture (Pub/Sub) – MQTT Essentials: Part 2,” *HiveMQ*, 2023. <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part2-publish-subscribe/> (accessed Mar. 26, 2024).
- [79] HiveMQ Team, “MQTT Client, MQTT Broker, and MQTT Server Connection Establishment Explained – MQTT Essentials: Part 3,” *HiveMQ*, 2023. <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-3-client-broker-connection-establishment/> (accessed Mar. 26, 2024).
- [80] I. Abubakar, S. A. Khalid, M. W. Mustafa, H. Shareef, and M. Mustapha, “Calibration of ZMPT101B Voltage Sensor Module Using Polynomial Regression for Accurate Load Monitoring,” *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 12, no. November, pp. 1076–1084, 2017.
- [81] A. Kurniawan, D. Suryadi, R. R. Yacoub, and F. Imansyah, “Implementation of a Battery Charge Monitoring System on Internet of Things (IoT) Based Transportable

- Devices,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 5, pp. 6–14, 2021, doi: 10.9790/1813-1005010614.
- [82] OpenEnergyMonitor, “Calibration Procedure,” 2023. <https://docs.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ctac/calibration.html> (accessed Apr. 01, 2024).
- [83] Zeming, “ZMPT101B Current-type Voltage Transformer,” *Qingxian Zeming Langxi Electronic*, 2019. <https://5lrorwxhmqqiik.leadongcdn.com/ZMPT101B+specification-aidijBqoKomRilSqqokpjkp.pdf> (accessed Mar. 26, 2024).
- [84] Allegro, “ACS758 Datasheet,” *Allegro Microsystems*, 2020. <https://www.allegromicro.com/en/search?q=acs758+datasheet> (accessed Mar. 26, 2024).
- [85] Arduino, “analogRead(),” 2024. <https://www.arduino.cc/reference/pt/language/functions/analog-io/analogread/> (accessed Apr. 01, 2024).
- [86] OpenJS Foundation, “Node-RED Low-code programming for event-driven applications,” *Node-RED*, 2023. <https://nodered.org/> (accessed Apr. 02, 2024).
- [87] E. G. M. da Silva, B. C. de Matos, I. de S. R. de Araújo, H. de M. Dantas, A. B. Silva, and C. M. de Farias, “Dandarah : sistema IoT em prol da segurança e da saúde mental da comunidade LGBTI+,” *Rev. Saúde Digit. e Tecnol. Educ.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi: 10.36517/resdite.v6.n1.2021.re2.
- [88] LabLux, “LabLux - Laboratório de Luminotécnica da UFF,” *Universidade Federal Fluminense*. <https://lablux.uff.br/> (accessed Apr. 29, 2024).
- [89] Google, “Sem título,” *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/place/Universidade+Federal+Fluminense+-+Campus+Praia+Vermelha/@-22.8605749,-43.0557093,20558m/am=t/data=!3m1!1e3!4m17!1m10!4m9!1m4!2m2!1d-43.0318898!2d-22.794351!4e1!1m3!2m2!1d-43.1106072!2d-22.8769565!3m5!1s0x99817dce2f93eb:0x> (accessed Feb. 25, 2024).
- [90] Espressif Systems IOT Team, “ESP8266 AT Instruction Set,” *Espressif*, 2016. https://www.espressif.com/sites/default/files/4a-esp8266_at_instruction_set_en_v1.5.4_0.pdf (accessed Feb. 13, 2024).

Apêndice A – Motivação Particular

Como uma motivação particular do autor, que quando criança, fascinado com a iluminação, passava o tempo contando quantas luminárias estavam queimadas ou acesas enquanto passeava de carro com a família. Que, ao ingressar na UFF, entrou para o Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense (LabLux-UFF) [88], onde atuou na realização de ensaios em produtos na área de Luminotécnica para certificação de eficiência energética. E que concluiu o curso de Engenharia Elétrica com o título do TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) sendo “Correntes Harmônicas em Dispositivos LED – Análise de Perdas e de Características Fotométricas”, onde foi mostrado, a partir dos ensaios realizados, a influência direta da distorção harmônica de corrente para o aumento das perdas por efeito joule, chegando a um valor maior que 5 vezes em relação aos casos em que não há incidência dessas distorções [31]. Mostra-se, assim, uma aptidão natural a esta linha de estudos e trabalhos.

Desde antes do tempo de graduação, a ocasião de encontrar luminárias públicas defeituosas sempre gerou incômodo por parte do autor. No deslocamento entre a residência e a universidade, em especial, em um trecho da BR-101 (Figura 54) é possível encontrar diversas luminárias com funcionamento defeituoso.

Em um levantamento de campo realizado no mês de fevereiro de 2024 no trecho destacado, foram averiguadas 564 luminárias no total, das quais: 84 se encontravam acesas no período diurno; no período noturno 5 estavam piscando e 168 estavam queimadas ou ligadas sem iluminar de forma efetiva a rodovia (que notoriamente forneciam um fluxo luminoso muito inferior em comparação as demais luminárias de mesmo modelo, deixando a rodovia praticamente escura); não foi possível averiguar se as luminárias que se encontravam acesas no período diurno iluminavam de forma efetiva no período noturno. Nesse contexto, é possível afirmar que nesse trecho, de apenas 13,3 km, entre 31% a 46% das luminárias estavam com defeito.

A Figura 55, 56 e 57 mostram exemplos de luminárias com funcionamento defeituoso em localidades diversas, estando acesas durante o dia ou apagadas durante a noite, agrupadas por tipo de tecnologia. As fotos foram feitas em março de 2024. Em cada foto, as coordenadas geográficas podem ser verificadas.

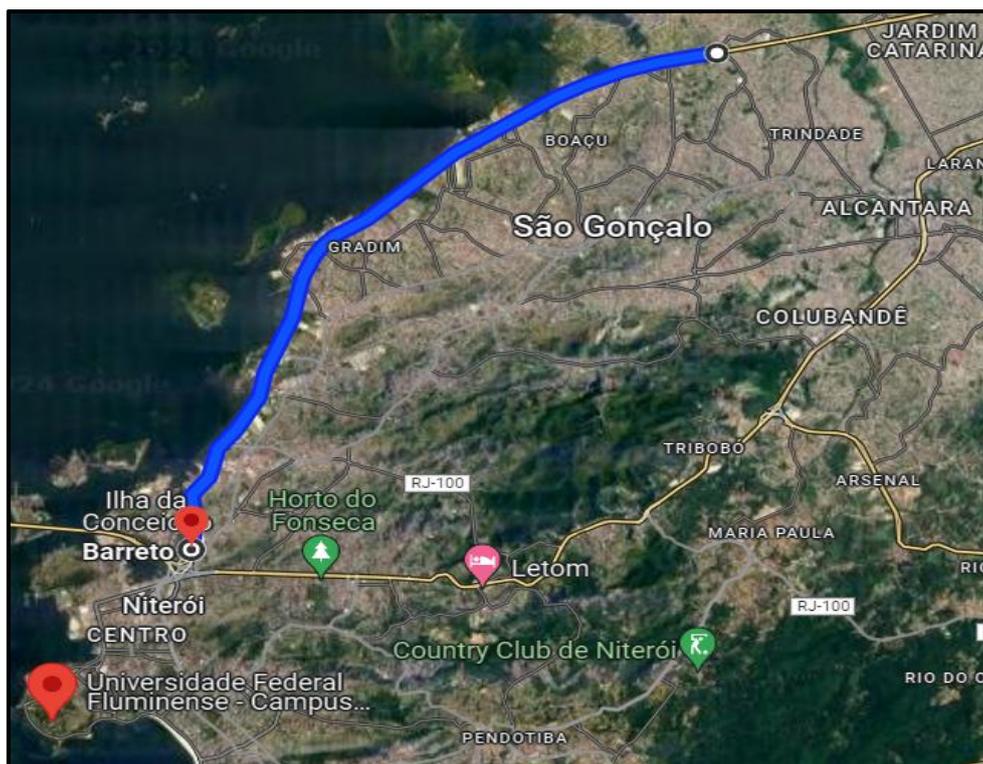


Figura 54 – Em destaque, trecho percorrido de 13,3 km da BR-101.
 Fonte: [89].



Figura 55 - Luminárias de tecnologia LVM com defeito.
 Fonte: Elaboração própria.

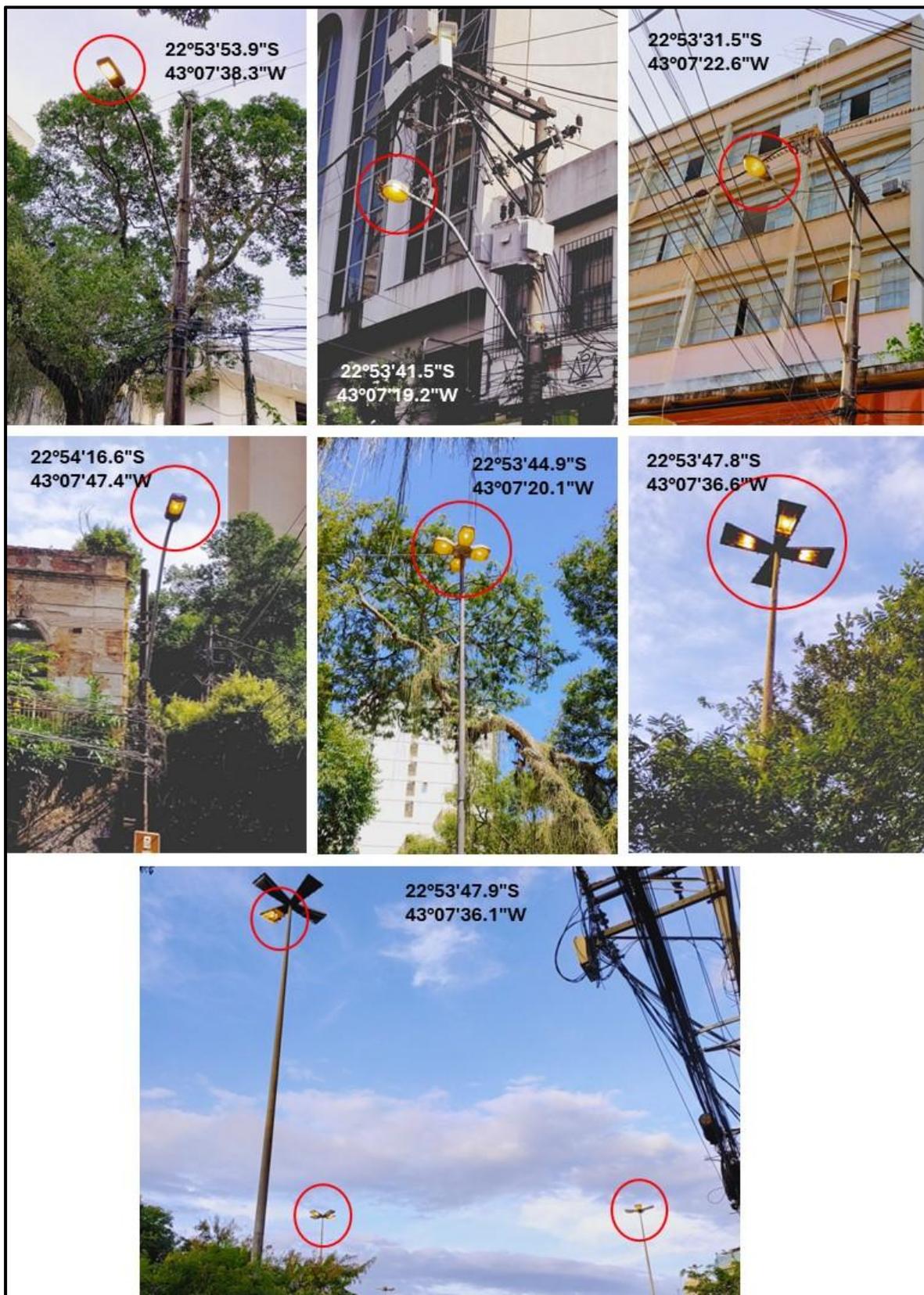


Figura 56 - Luminárias de tecnologia LVS com defeito.

Fonte: Elaboração própria



Figura 57 - Luminárias de tecnologia LED com defeito.

Fonte: Elaboração própria.

As fotos nas coordenadas 22°53'45.7"S, 43°12'14.1"W se localizam em um trecho da Avenida Rodrigues Alves, Rio de Janeiro - RJ, a qual, na data em que as fotos foram feitas, quase todas as luminárias estavam piscando, deixando a rodovia completamente escura e prejudicando a visão dos motoristas, aumentando, assim, os riscos de acidentes.

Apêndice B – Tabelas Adicionais

A Tabela 27 apresenta os dados utilizados para a confecção do gráfico de 2023 da Figura 6. Foi utilizada a metodologia apresentada em [2], e, como composição inicial do parque de IP, foram utilizados os dados apresentados em [1].

Tabela 27 - Projeção da composição do sistema de IP brasileiro.

Ano	LVS	LVM	VM	Outros	LED	C.LED	Total
2018	11.375.041	1.715.169	871.076	1.642.808	529.001	0	16.133.095
2019	10.237.537	1.543.652	783.968	1.478.527	2.089.410	183.868	16.316.963
2020	9.100.033	1.372.135	696.861	1.314.246	3.833.688	353.545	16.670.508
2021	7.962.529	1.200.618	609.753	1.149.966	5.747.642	536.904	17.207.413
2022	6.825.025	1.029.101	522.646	985.685	7.844.956	737.604	17.945.016
2023	5.687.521	857.585	435.538	821.404	10.142.969	957.490	18.902.507
2024	4.550.016	686.068	348.430	657.123	12.660.869	1.198.416	20.100.922
2025	3.412.512	514.551	261.323	492.842	15.419.694	1.462.394	21.563.316
2026	2.275.008	343.034	174.215	328.562	18.442.497	1.751.630	23.314.946
2027	1.137.504	171.517	87.108	164.281	21.754.537	2.068.543	25.383.489
2028	0	0	0	0	25.383.489	2.415.779	27.799.268

Fonte: Elaboração própria.

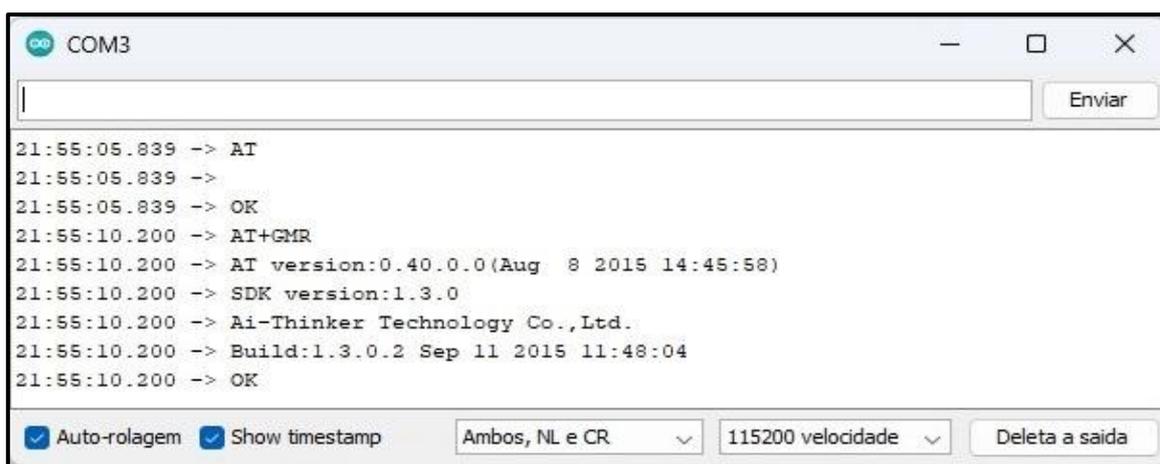
VM – Vapor de mercúrio;

C.LED – Crescimento do parque de LEDs desconsiderando substituições;

Apêndice C – Verificação de Funcionamento e Atualização do ESP-01

Devido aos diferentes lotes fabricados e comercializados do ESP-01, dependendo do ano de fabricação é possível que o *firmware* esteja desatualizado, possuindo comandos AT que entraram em desuso pelo fabricante. Por meio do manual de comandos AT disponibilizado pela Espressif [90], é possível verificar se o *firmware* gravado é o mais recente.

O primeiro passo é verificar a resposta do módulo. Com o ESP-01 conectado a uma entrada USB por meio de um módulo conversor USB par TTL CP2102 (é necessário instalar o seu drive no Windows) e com o Arduino IDE aberto, basta abrir o monitor serial digitar e enviar a instrução “AT”. Caso esteja funcionando corretamente a resposta será “OK” no monitor serial. O segundo passo é checar a versão dos comandos AT gravado no módulo. Para isso, basta digitar e enviar o comando “AT+GMR”, cuja resposta será a versão AT gravada, a versão SDK e o tempo de compilação. A Figura 58 mostra os procedimentos realizados.



```
COM3
21:55:05.839 -> AT
21:55:05.839 ->
21:55:05.839 -> OK
21:55:10.200 -> AT+GMR
21:55:10.200 -> AT version:0.40.0.0(Aug 8 2015 14:45:58)
21:55:10.200 -> SDK version:1.3.0
21:55:10.200 -> Ai-Thinker Technology Co.,Ltd.
21:55:10.200 -> Build:1.3.0.2 Sep 11 2015 11:48:04
21:55:10.200 -> OK
```

Auto-rolagem Show timestamp Ambos, NL e CR 115200 velocidade Deleta a saída

Figura 58 - Verificação do *firmware* gravado.

Fonte: Elaboração própria.

Caso a versão AT não seja a mais recente é aconselhável que se faça a atualização de *firmware* do módulo. O item 1.2 do manual de comandos AT da Espressif [90] apresenta uma ferramenta para esse fim.

Apêndice D – Códigos

Programa principal gravado no Arduino:

```

#include <avr/io.h>
#include "EmonLib.h"           // Biblioteca para V e I
#include "WiFiEsp.h"
#include "SoftwareSerial.h"
#include <PubSubClient.h>
//-----//

EnergyMonitor emon1;         // Cria uma instância da biblioteca EmonLib

SoftwareSerial ESP_Serial(6, 7); // RX, TX
char ssid[] = "*****";      // Nome da rede
char pass[] = "*****";      // Senha
int status = WL_IDLE_STATUS; // the Wifi radio's status

//-----BROKERS-----//

const char *mqtt_broker = "broker.emqx.io"; // broker EMQX público gratuito
const int mqtt_port = 1883;                // broker port number

//-----TÓPICOS-----//
const char *topico_tensao = "emonmqtt/tensao";
const char *topico_corrente = "emonmqtt/corrente";
const char *topico_potencia_aparente = "emonmqtt/potenciaaparente";
const char *topico_potencia_ativa = "emonmqtt/potenciaativa";
const char *topico_fator_de_potencia = "emonmqtt/fatordepotencia";
String client_id = "eMon_MQTT";

//-----//
WiFiEspClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

#define INTERVALO_MEDIDA 60000 //Intervalo de aquisição dos dados em ms
unsigned long agora;
unsigned long ultimo_tempo;

void setup()
{

```

```

Serial.begin(115200);
emon1.voltage(5, 280.0, 1.078);           // Voltage: input pin, calibration,
phase_shift
emon1.current(4, 24.18);                 // Current: input pin, calibration.

// initialize serial for ESP module
ESP_Serial.begin(9600);
// initialize ESP module
WiFi.init(&ESP_Serial);

// check for the presence of the shield
if (WiFi.status() == WL_NO_SHIELD) {
  Serial.println("No WiFi shield");
  // don't continue
  while (true);
}

// attempt to connect to WiFi network
while ( status != WL_CONNECTED) {
  Serial.print("Connecting WPA SSID: ");
  Serial.println(ssid);
  // Connect to WPA/WPA2 network
  status = WiFi.begin(ssid, pass);
}

Serial.println("Network connected");
printWifiStatus();

//connecting to a mqtt broker
client.setServer(mqtt_broker, mqtt_port);
ultimo_tempo = millis();
}

//-----//
void loop() {

  if (!client.connected()) {
    reconnect();
  }

  agora = millis ();
  if ((agora - ultimo_tempo) > INTERVALO_MEDIDA) {
    //Monitoramento de energia
    emon1.calcVI(79, 20);           //Calculate all. No.of half
wavelengths (crossings), time-out
    double supplyVoltage = emon1.Vrms; // Recebe o valor de tensão RMS
obtido
    double Irms = emon1.Irms;       //Corrente IRMS

```

```

double realPower = emon1.realPower;           //Potência Ativa
double apparentPower = emon1.apparentPower; //Potência Aparente
double powerFactor = emon1.powerFactor;      //Fator de Potência
emon1.serialprint();                          //Imprime os dados no serial

client.publish(topico_tensao, String(supplyVoltage).c_str());
client.publish(topico_corrente, String(Irms,4).c_str());
client.publish(topico_potencia_aparente, String(apparentPower).c_str());
client.publish(topico_potencia_ativa, String(realPower).c_str());
client.publish(topico_fator_de_potencia, String(powerFactor,4).c_str());

ultimo_tempo = agora;
}
client.loop();
}

//-----//
//FUNÇÃO RECONNECT
void reconnect() {
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Mqtt broker - ");
    Serial.println(client_id);

    if (client.connect(client_id.c_str())) {
      Serial.println("Broker connected.");
    } else {
      Serial.print("failed state ");
      Serial.println(client.state());
      delay(10000);
    }
  }
}

//-----//
//FUNÇÃO CALLBACK
/*void callback(char *topic, byte *payload, unsigned int length) {
  // if (!strcmp (topic, topico_botao)) {
  {
    Serial.print("Message arrived topic: ");
    Serial.println(topic);
    Serial.print("Message:");
    for (int i = 0; i < length; i++) {
      Serial.print((char) payload[i]);
    }
  }
  Serial.println();
  Serial.println("--");
}

```

```
*/  
  
//-----//  
void printWifiStatus()  
{  
  // print the SSID of the network you're attached to  
  Serial.print("SSID: ");  
  Serial.println(WiFi.SSID());  
  
  // print your WiFi shield's IP address  
  IPAddress ip = WiFi.localIP();  
  Serial.print("IP Address: ");  
  Serial.println(ip);  
}
```

Biblioteca EmonLib (modificado):

- Archivo EmonLib.h

```

/*
Emon.h - Library for openenergymonitor
Created by Trystan Lea, April 27 2010
GNU GPL
modified to use up to 12 bits ADC resolution (ex. Arduino Due)
by boredman@boredomprojects.net 26.12.2013
Low Pass filter for offset removal replaces HP filter 1/1/2015 - RW
*/

#ifndef EmonLib_h
#define EmonLib_h
#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
#include "Arduino.h"
#else
#include "WProgram.h"
#endif

// define theoretical vref calibration constant for use in readvcc()
// 1100mV*1024 ADC steps http://openenergymonitor.org/emon/node/1186
// override in your code with value for your specific AVR chip
// determined by procedure described under "Calibrating the internal
//reference voltage" at
// http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/calibration

#ifndef READVCC_CALIBRATION_CONST
#define READVCC_CALIBRATION_CONST 1126400L
#endif

// to enable 12-bit ADC resolution on Arduino Due,
// include the following line in main sketch inside setup() function:
// analogReadResolution(ADC_BITS);
// otherwise will default to 10 bits, as in regular Arduino-based boards.

#if defined(__arm__)
#define ADC_BITS 12
#else
#define ADC_BITS 10
#endif
#define ADC_COUNTS (1<<ADC_BITS)

class EnergyMonitor
{
public:
void voltage(unsigned int _inPinV, double _VCAL, double _PHASECAL);

```

```

void current(unsigned int _inPinI, double _ICAL);

void calcVI(unsigned int crossings, unsigned int timeout);
void serialprint();

long readVcc();
//Useful value variables
double realPower,
apparentPower,
powerFactor,
Vrms,
Irms;

private:
//Set Voltage and current input pins
unsigned int inPinV;
unsigned int inPinI;

//Calibration coefficients
//These need to be set in order to obtain accurate results
double VCAL;
double ICAL;
double PHASECAL;

//-----
// Variable declaration for emon_calc procedure
//-----
uint16_t sampleV[79] = {}; //sample_ holds the raw analog read value
uint16_t sampleI[79] = {};

double lastFilteredV,filteredV; //Filtered_ is the raw analog value minus //the
DC offset
double filteredI;
double offsetV; //Low-pass filter output
double offsetI; //Low-pass filter output

double phaseShiftedV; //Holds the calibrated phase shifted voltage.
double sqV,sumV,sqI,sumI,instP,sumP; //sq = squared, sum = Sum, inst =
//instantaneous

uint16_t startV; //Instantaneous voltage at start of sample window.
uint16_t i = 0;
uint16_t numberOfSamples = 0;

boolean lastVCross, checkVCross; //Used to measure number of times threshold
//is crossed.
};
#endif

```

- **Arquivo EmonLib.cpp**

```

/*
  Emon.cpp - Library for openenergymonitor
  Created by Trystan Lea, April 27 2010
  GNU GPL
  modified to use up to 12 bits ADC resolution (ex. Arduino Due)
  by boredman@boredomprojects.net 26.12.2013
  Low Pass filter for offset removal replaces HP filter 1/1/2015 - RW
*/

// Proboscide99 10/08/2016 - Added ADMUX settings for ATmega1284 e 1284P (644 /
644P also, but not tested) in readVcc function

// #include "WProgram.h" un-comment for use on older versions of Arduino IDE
#include "EmonLib.h"
#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
#include "Arduino.h"
#else
#include "WProgram.h"
#endif

//-----
// Sets the pins to be used for voltage and current sensors
//-----
void EnergyMonitor::voltage(unsigned int _inPinV, double _VCAL, double
_PHASECAL)
{
  inPinV = _inPinV;
  VCAL = _VCAL;
  PHASECAL = _PHASECAL;
  offsetV = ADC_COUNTS>>1;
}

void EnergyMonitor::current(unsigned int _inPinI, double _ICAL)
{
  inPinI = _inPinI;
  ICAL = _ICAL;
  offsetI = ADC_COUNTS>>1;
}

//-----
// emon_calc procedure
// Calculates realPower, apparentPower, powerFactor, Vrms, Irms
// From a sample window of the mains AC voltage and current.
// The Sample window length is defined by the number of half wavelengths or
crossings we choose to measure.

```

```

//-----
void EnergyMonitor::calcVI(unsigned int crossings, unsigned int timeout)
{
    int SupplyVoltage = readVcc();

    //uint16_t crossCount = 0;

    //-----
    // 1) Waits for the waveform to be close to 'zero' (mid-scale adc) part in
    sin curve.
    //-----
    boolean st=false;    //an indicator to exit the while loop

    unsigned long start = millis();    //millis()-start makes sure it doesnt get
    stuck in the loop if there is an error.

    while(st==false)    //the while loop...
    {
        startV = analogRead(inPinV);    //using the voltage waveform
        if ((startV < (ADC_COUNTS*0.55)) && (startV > (ADC_COUNTS*0.45)))
    st=true; //check its within range
        if ((millis()-start)>timeout) st = true;
    }

    //-----
    // 2) Main measurement loop
    //-----
    start = millis();

    while ((numberOfSamples < crossings) && ((millis()-start)<timeout))
    {
        numberOfSamples++;    //Count number of times looped.

        //-----
        // A) Read in raw voltage and current samples
        //-----
        sampleV[numberOfSamples-1] = analogRead(inPinV)+2;    //Read
in raw voltage signal
        sampleI[numberOfSamples-1] = analogRead(inPinI)+2;    //Read
in raw current signal
    }
    unsigned long end = millis();
    numberOfSamples = numberOfSamples - 5;

    for (i = 0; i < numberOfSamples; i++){ //descarte de 5 aquisiçoes de
corrente
        sampleI[i] = sampleI[i+5];
    }
}

```

```

for (i = 0; i < numberOfSamples; i++)
{
    lastFilteredV = filteredV;

    //-----
    // B) Apply digital low pass filters to extract the 2.5 V or 1.65 V dc
offset,
    //      then subtract this - signal is now centred on 0 counts.
    //-----
    offsetV = offsetV + (((sampleV[i]*1.0)-offsetV)/1024.0);
    filteredV = (sampleV[i]*1.0) - offsetV;
    offsetI = offsetI + (((sampleI[i]*1.0)-offsetI)/1024.0);
    filteredI = (sampleI[i]*1.0) - offsetI;

    //-----
    // C) Root-mean-square method voltage
    //-----
    sqV= filteredV * filteredV;           //1) square voltage values
    sumV += sqV;                          //2) sum

    //-----
    // D) Root-mean-square method current
    //-----
    sqI = filteredI * filteredI;         //1) square current values
    sumI += sqI;                          //2) sum

    //-----
    // E) Phase calibration
    //-----
    phaseShiftedV = lastFilteredV + PHASECAL * (filteredV - lastFilteredV);

    //-----
    // F) Instantaneous power calc
    //-----
    instP = phaseShiftedV * filteredI;   //Instantaneous Power
    sumP +=instP;                          //Sum
}

//-----
// 3) Post loop calculations
//-----
//Calculation of the root of the mean of the voltage and current squared
(rms)
//Calibration coefficients applied.

double V_RATIO = VCAL *((SupplyVoltage/1000.0) / ((ADC_COUNTS)*1.0));

```

```

Vrms = V_RATIO * sqrt(sumV / (numberOfSamples*1.0));

double I_RATIO = ICAL * ((SupplyVoltage/1000.0) / ((ADC_COUNTS)*1.0));
Irms = I_RATIO * sqrt(sumI / (numberOfSamples*1.0));

//Calculation power values
realPower = V_RATIO * I_RATIO * sumP / (numberOfSamples*1.0);
apparentPower = Vrms * Irms;
powerFactor = realPower / apparentPower;

Serial.print(numberOfSamples);
Serial.print(' ');
Serial.print(end - start);
Serial.print(' ');

//Reset accumulators
sumV = 0;
sumI = 0;
sumP = 0;
numberOfSamples = 0;
}

//-----
void EnergyMonitor::serialprint()
{
  Serial.print(realPower);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(apparentPower);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(Vrms);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(Irms,4);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(powerFactor,4);
  Serial.println(' ');
  delay(100);
}

//thanks to http://hacking.majenko.co.uk/making-accurate-adc-readings-on-arduino
//and Jérôme who alerted us to http://provideyourown.com/2012/secret-arduino-voltmeter-measure-battery-voltage/

long EnergyMonitor::readVcc() {
  long result;

```

//not used on emonTx V3 - as Vcc is always 3.3V - eliminates bandgap error and need for calibration <http://harizanov.com/2013/09/thoughts-on-avr-adc-accuracy/>

```

    #if defined(__AVR_ATmega168__) || defined(__AVR_ATmega328__) || defined
(__AVR_ATmega328P__)
    ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
    #elif defined(__AVR_ATmega644__) || defined(__AVR_ATmega644P__) ||
defined(__AVR_ATmega1284__) || defined(__AVR_ATmega1284P__)
    ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
    #elif defined(__AVR_ATmega32U4__) || defined(__AVR_ATmega1280__) ||
defined(__AVR_ATmega2560__) || defined(__AVR_AT90USB1286__)
    ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
    ADCSRB &= ~_BV(MUX5); // Without this the function always returns -1 on the
ATmega2560 http://openenergymonitor.org/emon/node/2253#comment-11432
    #elif defined (__AVR_ATtiny24__) || defined(__AVR_ATtiny44__) ||
defined(__AVR_ATtiny84__)
    ADMUX = _BV(MUX5) | _BV(MUX0);
    #elif defined (__AVR_ATtiny25__) || defined(__AVR_ATtiny45__) ||
defined(__AVR_ATtiny85__)
    ADMUX = _BV(MUX3) | _BV(MUX2);

    #endif

    #if defined(__AVR__)
    delay(2); // Wait for Vref to settle
    ADCSRA |= _BV(ADSC); // Convert
    while (bit_is_set(ADCSRA,ADSC));
    result = ADCL;
    result |= ADCH<<8;
    result = READVCC_CALIBRATION_CONST / result; //1100mV*1024 ADC steps
http://openenergymonitor.org/emon/node/1186
    return result;
    #elif defined(__arm__)
    return (3300); //Arduino Due
    #else
    return (3300); //Guess that other un-
supported architectures will be running a 3.3V!
    #endif
}

```

Arquivo JavaScript contendo o fluxograma desenvolvido no Node-RED

```
[
  {
    "id": "21f7c343c42fcfab",
    "type": "tab",
    "label": "Monitoramento de Luminária",
    "disabled": false,
    "info": "",
    "env": []
  },
  {
    "id": "b12b8adb7da76b44",
    "type": "mqtt in",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Tensão",
    "topic": "emonmqtt/tensao",
    "qos": "0",
    "datatype": "auto-detect",
    "broker": "51274130ac5d7982",
    "nl": false,
    "rap": true,
    "rh": 0,
    "inputs": 0,
    "x": 110,
    "y": 100,
    "wires": [
      [
        "6bde1de6973ff5ce",
        "a47f1bbc53742c81"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "6bde1de6973ff5ce",
    "type": "ui_chart",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "",
    "group": "594c39a64965883d",
    "order": 1,
    "width": "0",
    "height": "0",
    "label": "Tensão (V)",
    "chartType": "line",
    "legend": "true",
    "xformat": "HH:mm",
    "interpolate": "linear",
    "nodata": "",
    "dot": false,
    "ymin": "0.0",
    "ymax": "300.0",
    "removeOlder": 1,
    "removeOlderPoints": "",
    "removeOlderUnit": "86400",
    "cutout": 0,
    "useOneColor": false,
    "useUTC": false,
    "colors": [
      "#1e30b3",
      "#aec7e8",
      "#ff7f0e",
      "#2ca02c",
      "#98df8a",
      "#d62728",
      "#ff9896",
      "#9467bd",
      "#c5b0d5"
    ],
    "outputs": 1,
    "useDifferentColor": false,
    "className": "",
    "x": 390,
    "y": 60,
    "wires": [
      []
    ]
  },
  {
    "id": "4bd766c25f174244",
    "type": "file",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Dados.txt",
    "filename":
      "C:\\Users\\bgser\\OneDrive\\Desktop\\TESTE.txt",
    "filenameType": "str",
    "appendNewline": false,

```

```

"createDir": true,
"overwriteFile": "false",
"encoding": "none",
"x": 980,
"y": 300,
"wires": [
  []
]
},
{
  "id": "5a27dd93704f9820",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Corrente",
  "topic": "emonmqtt/corrente",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 120,
  "y": 160,
  "wires": [
    [
      "a30bca002ee50481",
      "a47f1bbc53742c81",
      "a0cfc743f5dbf6cd"
    ]
  ]
},
{
  "id": "db41afe5c01f05b0",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Potência Aparente",
  "topic": "emonmqtt/potenciaaparente",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,

```

```

"x": 150,
"y": 220,
"wires": [
  [
    "a80e7bf373c6c657",
    "a47f1bbc53742c81"
  ]
]
},
{
  "id": "4c2cca5723b19ebc",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Potência Ativa",
  "topic": "emonmqtt/potenciaativa",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 130,
  "y": 280,
  "wires": [
    [
      "04cd27b6e46631f5",
      "a47f1bbc53742c81",
      "b1553f8352a69e6b"
    ]
  ]
},
{
  "id": "8f54b432433e4ea1",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Fator de Potência",
  "topic": "emonmqtt/fatordepotencia",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,

```

```

"x": 150,
"y": 340,
"wires": [
  [
    "4c28e605452711b5",
    "a47f1bbc53742c81"
  ]
]
},
{
  "id": "a30bca002ee50481",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "b1cc0ae15a18a022",
  "order": 2,
  "width": "0",
  "height": "0",
  "label": "Corrente (A)",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.00",
  "ymax": "5.00",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#ff0000",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#2ca02c",
    "#98df8a",
    "#ff0000",
    "#ff9896",
    "#9467bd",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,

```

```

"useDifferentColor": false,
"className": "",
"x": 390,
"y": 120,
"wires": [
  []
]
},
{
  "id": "a80e7bf373c6c657",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "594c39a64965883d",
  "order": 3,
  "width": "0",
  "height": "0",
  "label": "Potência Aparente (VA)",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.0",
  "ymax": "2000.0",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#ffbb00",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#2ca02c",
    "#98df8a",
    "#d62728",
    "#ff9896",
    "#9467bd",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,
  "useDifferentColor": false,

```

```

"className": "",
"x": 430,
"y": 220,
"wires": [
  []
]
},
{
  "id": "04cd27b6e46631f5",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "b1cc0ae15a18a022",
  "order": 4,
  "width": "0",
  "height": "0",
  "label": "Potência Ativa (W)",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.0",
  "ymax": "2000.0",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#12d20f",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#28bd28",
    "#98df8a",
    "#d62728",
    "#ff9896",
    "#9467bd",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,
  "useDifferentColor": false,
  "className": "",

```

```

"x": 410,
"y": 280,
"wires": [
  []
]
},
{
  "id": "4c28e605452711b5",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "594c39a64965883d",
  "order": 5,
  "width": "0",
  "height": "0",
  "label": "Fator de Potência",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.40",
  "ymax": "1.00",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#ac0ff5",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#2ca02c",
    "#98df8a",
    "#d62728",
    "#ff9896",
    "#782ac0",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,
  "useDifferentColor": false,
  "className": "",
  "x": 410,

```

```

    "y": 340,
    "wires": [
      []
    ]
  },
  {
    "id": "ac621e79bcc86c1a",
    "type": "function",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Formatar Texto",
    "func": "function getFormattedDate(today) {\n
//var week = new Array('Domingo', 'Segunda', 'Terça',
'Quarta', 'Quinta', 'Sexta', 'Sábado');\n //var day =
week[today.getDay()];\n var dd = today.getDate();\n
var mm = today.getMonth()+1; //Janeiro is 0!\n var
yyyy = today.getFullYear();\n var hour =
today.getHours();\n var min =
today.getMinutes();\n\n if(dd<10) { dd='0'+dd } \n
if(mm<10) { mm='0'+mm } \n if(min<10){
min='0'+min } \n\n return dd+'/'+mm+'/'+'yyyy+'
'+hour+'.'+min;\n}\n\nvar date = new Date();\nvar text
= getFormattedDate(date);\n\nmsg.payload =
String(text)+' ' + Object.values(msg.payload);\nreturn
msg";
    "outputs": 1,
    "timeout": 0,
    "noerr": 0,
    "initialize": "",
    "finalize": "",
    "libs": [],
    "x": 540,
    "y": 400,
    "wires": [
      [
        "d55d313417fb46ec"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "a47f1bbc53742c81",
    "type": "join",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Join",
    "mode": "custom",
    "build": "object",

```

```

    "property": "payload",
    "propertyType": "msg",
    "key": "topic",
    "joiner": "\\n",
    "joinerType": "str",
    "accumulate": false,
    "timeout": "",
    "count": "5",
    "reduceRight": false,
    "reduceExp": "",
    "reduceInit": "",
    "reduceInitType": "",
    "reduceFixup": "",
    "x": 370,
    "y": 400,
    "wires": [
      [
        "ac621e79bcc86c1a"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "28011848d154706c",
    "type": "switch",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Switch",
    "property": "controle",
    "propertyType": "msg",
    "rules": [
      {
        "t": "eq",
        "v": "1",
        "vt": "num"
      }
    ]
  },
  {
    "checkall": "true",
    "repair": false,
    "outputs": 1,
    "x": 690,
    "y": 160,
    "wires": [
      [
        "5af48146a23530a2"
      ]
    ]
  }

```

```

},
{
  "id": "5af48146a23530a2",
  "type": "ui_toast",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "position": "top right",
  "displayTime": "30",
  "highlight": "RED",
  "sendall": true,
  "outputs": 0,
  "ok": "OK",
  "cancel": "",
  "raw": false,
  "className": "",
  "topic": "AVISO",
  "name": "Dashboard Notification",
  "x": 880,
  "y": 160,
  "wires": []
},
{
  "id": "941c8e74a4532002",
  "type": "function",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Notificação",
  "func": "function getFormattedDate(today) {\n
//var week = new Array('Domingo', 'Segunda', 'Terça',
'Quarta', 'Quinta', 'Sexta', 'Sábado');\n // var day =
week[today.getDay()];\n //var dd =
today.getDate();\n //var mm = today.getMonth()+1;
//Janeiro is 0!\n //var yyyy = today.getFullYear();\n
var hour = today.getHours();\n //var min =
today.getMinutes();\n\n //if(dd<10) { dd='0'+dd } \n
//if(mm<10) { mm='0'+mm } \n //if(min<10){
min='0'+min } \n\n return hour;\n}\n\nvar date = new
Date();\nvar text =
getFormattedDate(date);\n\nmsg.controle = 0;\nlet hora
= Number(text);\nlet corrente =
Number(Object.values(msg.payload));\n\nif ((hora >= 6
&& hora < 19) && corrente > 0.1){\n\n\tmsg.controle =
1; //Ativará a mensagem\n var message =
'LUMINÁRIA ACESA FORA DO HORÁRIO OU
FURTO DE ENERGIA';\n msg.payload = message;\n
return msg;\n}\nelse {\n msg.payload = 'NaN';\n
return msg;\n}\n",
  "outputs": 1,
  "timeout": 0,
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],
  "x": 530,
  "y": 160,
  "wires": [
    [
      "28011848d154706c",
      "3ede69325786b0dc"
    ]
  ]
},
{
  "id": "a0cfc743f5dbf6cd",
  "type": "join",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Join",
  "mode": "custom",
  "build": "object",
  "property": "payload",
  "propertyType": "msg",
  "key": "topic",
  "joiner": "\\n",
  "joinerType": "str",
  "accumulate": false,
  "timeout": "",
  "count": "1",
  "reduceRight": false,
  "reduceExp": "",
  "reduceInit": "",
  "reduceInitType": "",
  "reduceFixup": "",
  "x": 370,
  "y": 160,
  "wires": [
    [
      "941c8e74a4532002"
    ]
  ]
},
{
  "id": "d55d313417fb46ec",

```

```

"type": "join",
"z": "21f7c343c42fcfab",
"name": "Join",
"mode": "custom",
"build": "object",
"property": "payload",
"propertyType": "msg",
"key": "topic",
"joiner": "\\n",
"joinerType": "str",
"accumulate": false,
"timeout": "",
"count": "3",
"reduceRight": false,
"reduceExp": "",
"reduceInit": "",
"reduceInitType": "",
"reduceFixup": "",
"x": 630,
"y": 300,
"wires": [
  [
    "d74dfb58eb3cf2e3"
  ]
]
},
{
  "id": "0f170bc7bf9b7aa0",
  "type": "debug",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "debug 1",
  "active": false,
  "tosidebar": true,
  "console": false,
  "tostatus": false,
  "complete": "false",
  "statusVal": "",
  "statusType": "auto",
  "x": 940,
  "y": 380,
  "wires": []
},
{
  "id": "d74dfb58eb3cf2e3",
  "type": "function",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Formatar Texto1",
  "func": "var newpayload = msg.payload;\n\nif
(msg.payload['emonmqtt/corrente2'] ==
msg.payload['emonmqtt/potenciaativa2']){\n delete
newpayload['emonmqtt/potenciaativa2'];\n}\nelse if
(msg.payload['emonmqtt/corrente2'] == 'NaN' &&
msg.payload['emonmqtt/corrente2'] !=
msg.payload['emonmqtt/potenciaativa2']){\n delete
newpayload['emonmqtt/corrente2'];\n}\nelse{\n
delete
newpayload['emonmqtt/potenciaativa2'];\n}\n\nmsg.pa
yload = Object.values(newpayload) + '\\\\n';\nreturn
msg;",
  "outputs": 1,
  "timeout": 0,
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],
  "x": 800,
  "y": 300,
  "wires": [
    [
      "0f170bc7bf9b7aa0",
      "4bd766c25f174244"
    ]
  ]
},
{
  "id": "3ede69325786b0dc",
  "type": "delay",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "delay",
  "pauseType": "delay",
  "timeout": "3",
  "timeoutUnits": "seconds",
  "rate": "1",
  "nbRateUnits": "1",
  "rateUnits": "second",
  "randomFirst": "1",
  "randomLast": "5",
  "randomUnits": "seconds",
  "drop": false,
  "allowrate": false,

```

```

"outputs": 1,
"x": 630,
"y": 240,
"wires": [
  [
    "d55d313417fb46ec"
  ]
]
},
{
  "id": "67a1ccec2b17fad3",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Tensão2",
  "topic": "emonmqtt/tensao2",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 120,
  "y": 600,
  "wires": [
    [
      "50d69e3ee818f328",
      "467d221dbae504d8"
    ]
  ]
},
{
  "id": "50d69e3ee818f328",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "37193dd909db10e6",
  "order": 1,
  "width": "0",
  "height": "0",
  "label": "Tensão (V)",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.0",
  "ymax": "300.0",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#1e30b3",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#2ca02c",
    "#98df8a",
    "#d62728",
    "#ff9896",
    "#9467bd",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,
  "useDifferentColor": false,
  "className": "",
  "x": 390,
  "y": 560,
  "wires": [
    []
  ]
},
{
  "id": "a708240f17585831",
  "type": "file",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Dados2.txt",
  "filename":
"C:\\Users\\bgser\\OneDrive\\Desktop\\TESTE2.txt",
  "filenameType": "str",
  "appendNewline": false,
  "createDir": true,
  "overwriteFile": "false",
  "encoding": "none",
  "x": 990,
  "y": 800,
  "wires": [

```

```

    []
  ]
},
{
  "id": "d872e746770f8051",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Corrente2",
  "topic": "emonmqtt/corrente2",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 120,
  "y": 660,
  "wires": [
    [
      "a57cc12531f3277d",
      "467d221dbae504d8",
      "024e266c06bc738c"
    ]
  ]
},
{
  "id": "4ebc29b182f0a690",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Potência Aparente2",
  "topic": "emonmqtt/potenciaaparente2",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 150,
  "y": 720,
  "wires": [
    [
      "7e8ff061d46ef014",
      "467d221dbae504d8"
    ]
  ]
}

```

```

    ]
  ]
},
{
  "id": "4ad5d21479c81cd6",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Potência Ativa2",
  "topic": "emonmqtt/potenciaativa2",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 140,
  "y": 780,
  "wires": [
    [
      "953ee3a10aee4ba4",
      "467d221dbae504d8",
      "90f6c03a4f5cdf2d"
    ]
  ]
},
{
  "id": "c32c212a8fcccc76",
  "type": "mqtt in",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Fator de Potência2",
  "topic": "emonmqtt/fatordepotencia2",
  "qos": "0",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "51274130ac5d7982",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 150,
  "y": 840,
  "wires": [
    [
      "72e8a249258f8c82",
      "467d221dbae504d8"
    ]
  ]
}

```

```

    ]
  ]
},
{
  "id": "a57cc12531f3277d",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "ae0320a6b3544736",
  "order": 2,
  "width": "0",
  "height": "0",
  "label": "Corrente (A)",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.00",
  "ymax": "5.00",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#ff0000",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#2ca02c",
    "#98df8a",
    "#ff0000",
    "#ff9896",
    "#9467bd",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,
  "useDifferentColor": false,
  "className": "",
  "x": 390,
  "y": 620,
  "wires": [
    []
  ]
}

```

```

    ]
  },
  {
    "id": "7e8ff061d46ef014",
    "type": "ui_chart",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "",
    "group": "37193dd909db10e6",
    "order": 3,
    "width": 0,
    "height": 0,
    "label": "Potência Aparente (VA)",
    "chartType": "line",
    "legend": "true",
    "xformat": "HH:mm",
    "interpolate": "linear",
    "nodata": "",
    "dot": false,
    "ymin": "0.0",
    "ymax": "2000.0",
    "removeOlder": 1,
    "removeOlderPoints": "",
    "removeOlderUnit": "86400",
    "cutout": 0,
    "useOneColor": false,
    "useUTC": false,
    "colors": [
      "#ffbb00",
      "#aec7e8",
      "#ff7f0e",
      "#2ca02c",
      "#98df8a",
      "#d62728",
      "#ff9896",
      "#9467bd",
      "#c5b0d5"
    ],
    "outputs": 1,
    "useDifferentColor": false,
    "className": "",
    "x": 430,
    "y": 720,
    "wires": [
      []
    ]
  }
}

```

```

},
{
  "id": "953ee3a10aee4ba4",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "ae0320a6b3544736",
  "order": 4,
  "width": 0,
  "height": 0,
  "label": "Potência Ativa (W)",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.0",
  "ymax": "2000.0",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#12d20f",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#28bd28",
    "#98df8a",
    "#d62728",
    "#ff9896",
    "#9467bd",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,
  "useDifferentColor": false,
  "className": "",
  "x": 410,
  "y": 780,
  "wires": [
    []
  ]
}
},

```

```

{
  "id": "72e8a249258f8c82",
  "type": "ui_chart",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "",
  "group": "37193dd909db10e6",
  "order": 5,
  "width": "0",
  "height": "0",
  "label": "Fator de Potência",
  "chartType": "line",
  "legend": "true",
  "xformat": "HH:mm",
  "interpolate": "linear",
  "nodata": "",
  "dot": false,
  "ymin": "0.40",
  "ymax": "1.00",
  "removeOlder": 1,
  "removeOlderPoints": "",
  "removeOlderUnit": "86400",
  "cutout": 0,
  "useOneColor": false,
  "useUTC": false,
  "colors": [
    "#ac0ff5",
    "#aec7e8",
    "#ff7f0e",
    "#2ca02c",
    "#98df8a",
    "#d62728",
    "#ff9896",
    "#782ac0",
    "#c5b0d5"
  ],
  "outputs": 1,
  "useDifferentColor": false,
  "className": "",
  "x": 410,
  "y": 840,
  "wires": [
    []
  ]
}
{

```

```

    "id": "40a9d637d7315abe",
    "type": "function",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Formatar Texto",
    "func": "function getFormattedDate(today) {\n
//var week = new Array('Domingo', 'Segunda', 'Terça',
'Quarta', 'Quinta', 'Sexta', 'Sábado');\n //var day =
week[today.getDay()];\n var dd = today.getDate();\n
var mm = today.getMonth()+1; //Janeiro is 0!\n var
yyyy = today.getFullYear();\n var hour =
today.getHours();\n var min =
today.getMinutes();\n\n if(dd<10) { dd='0'+dd } \n
if(mm<10) { mm='0'+mm } \n if(min<10){
min='0'+min } \n\n return dd+'/'+mm+'/'+yyyy+'
'+hour+':'+min;\n}\n\nvar date = new Date();\nvar text
= getFormattedDate(date);\n\nmsg.payload =
String(text)+' '+ Object.values(msg.payload);\nreturn
msg;";
    "outputs": 1,
    "timeout": 0,
    "noerr": 0,
    "initialize": "",
    "finalize": "",
    "libs": [],
    "x": 540,
    "y": 900,
    "wires": [
      [
        "8b85529b11aafe90"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "467d221dbae504d8",
    "type": "join",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Join",
    "mode": "custom",
    "build": "object",
    "property": "payload",
    "propertyType": "msg",
    "key": "topic",
    "joiner": "\\n",
    "joinerType": "str",
    "accumulate": false,

```

```

    "timeout": "",
    "count": "5",
    "reduceRight": false,
    "reduceExp": "",
    "reduceInit": "",
    "reduceInitType": "",
    "reduceFixup": "",
    "x": 370,
    "y": 900,
    "wires": [
      [
        "40a9d637d7315abe"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "e3edecdeb1f84f9d",
    "type": "switch",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Switch",
    "property": "controle",
    "propertyType": "msg",
    "rules": [
      {
        "t": "eq",
        "v": "1",
        "vt": "num"
      }
    ]
  },
  {
    "checkall": "true",
    "repair": false,
    "outputs": 1,
    "x": 690,
    "y": 660,
    "wires": [
      [
        "c274f151e96e3d14"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "c274f151e96e3d14",
    "type": "ui_toast",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "position": "top right",

```

```

"displayTime": "30",
"highlight": "RED",
"sendall": true,
"outputs": 0,
"ok": "OK",
"cancel": "",
"raw": false,
"className": "",
"topic": "AVISO",
"name": "Dashboard Notification",
"x": 880,
"y": 660,
"wires": []
},
{
  "id": "035629fba8179fc2",
  "type": "function",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Notificação 1",
  "func": "function getFormattedDate(today) \n{\n
//var week = new Array('Domingo', 'Segunda', 'Terça',
'Quarta', 'Quinta', 'Sexta', 'Sábado');\n // var day =
week[today.getDay()];\n //var dd =
today.getDate();\n //var mm = today.getMonth()+1;
//Janeiro is 0!\n //var yyyy = today.getFullYear();\n
var hour = today.getHours();\n //var min =
today.getMinutes();\n\n //if(dd<10) { dd='0'+dd } \n
//if(mm<10) { mm='0'+mm } \n //if(min<10){
min='0'+min } \n\n return hour;\n}\n\nvar date = new
Date();\nvar text =
getFormattedDate(date);\n\nmsg.controle = 0;\nlet hora
= Number(text);\nlet corrente =
Number(Object.values(msg.payload));\nhora =
20;\n\nif ((hora >= 6 && hora < 19) && corrente >
0.1){\n\tmsg.controle = 1; //Ativará a
mensagem\n var message = 'LUMINÁRIA ACESA
FORA DO HORÁRIO OU FURTO DE ENERGIA';\n
msg.payload = message;\n return msg;\n}\nelse {\n
msg.payload = 'NaN';\n return msg;\n}\n",
  "outputs": 1,
  "timeout": 0,
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],

```

```

"x": 530,
"y": 660,
"wires": [
  [
    "e3edecdeb1f84f9d",
    "c01bdc7879a31646"
  ]
]
},
{
  "id": "024e266c06bc738c",
  "type": "join",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Join",
  "mode": "custom",
  "build": "object",
  "property": "payload",
  "propertyType": "msg",
  "key": "topic",
  "joiner": "\\n",
  "joinerType": "str",
  "accumulate": false,
  "timeout": "",
  "count": "1",
  "reduceRight": false,
  "reduceExp": "",
  "reduceInit": "",
  "reduceInitType": "",
  "reduceFixup": "",
  "x": 370,
  "y": 660,
  "wires": [
    [
      "035629fba8179fc2"
    ]
  ]
},
{
  "id": "8b85529b11aafe90",
  "type": "join",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Join",
  "mode": "custom",
  "build": "object",
  "property": "payload",

```

```

"propertyType": "msg",
"key": "topic",
"joiner": "\\n",
"joinerType": "str",
"accumulate": false,
"timeout": "",
"count": "3",
"reduceRight": false,
"reduceExp": "",
"reduceInit": "",
"reduceInitType": "",
"reduceFixup": "",
"x": 630,
"y": 800,
"wires": [
  [
    "1e5b1a52eace64d4"
  ]
]
},
{
  "id": "1b131878875ddafb",
  "type": "debug",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "debug 2",
  "active": true,
  "tosidebar": true,
  "console": false,
  "tostatus": false,
  "complete": "false",
  "statusVal": "",
  "statusType": "auto",
  "x": 940,
  "y": 880,
  "wires": []
},
{
  "id": "1e5b1a52eace64d4",
  "type": "function",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Formatar Texto1",
  "func": "var newpayload = msg.payload;\n\nif
(msg.payload['emonmqtt/corrente2'] ==
msg.payload['emonmqtt/potenciaativa2']){\n delete
newpayload['emonmqtt/potenciaativa2'];\n}\nelse if

```

```

(msg.payload['emonmqtt/corrente2'] == 'NaN' &&
msg.payload['emonmqtt/corrente2'] !=
msg.payload['emonmqtt/potenciaativa2']){\n delete
newpayload['emonmqtt/corrente2'];\n}\nelse{\n
delete
newpayload['emonmqtt/potenciaativa2'];\n}\n\nmsg.pa
yload = Object.values(newpayload) + "\\n\\n";\nreturn
msg;\n\n",
  "outputs": 1,
  "timeout": 0,
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],
  "x": 800,
  "y": 800,
  "wires": [
    [
      "a708240f17585831",
      "1b131878875ddafb"
    ]
  ]
},
{
  "id": "c01bdc7879a31646",
  "type": "delay",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "delay",
  "pauseType": "delay",
  "timeout": "3",
  "timeoutUnits": "seconds",
  "rate": "1",
  "nbRateUnits": "1",
  "rateUnits": "second",
  "randomFirst": "1",
  "randomLast": "5",
  "randomUnits": "seconds",
  "drop": false,
  "allowrate": false,
  "outputs": 1,
  "x": 630,
  "y": 740,
  "wires": [
    [
      "8b85529b11aafe90"
    ]
  ]
}

```

```

    ]
  ]
},
{
  "id": "90f6c03a4f5cdf2d",
  "type": "join",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Join",
  "mode": "custom",
  "build": "object",
  "property": "payload",
  "propertyType": "msg",
  "key": "topic",
  "joiner": "\\n",
  "joinerType": "str",
  "accumulate": false,
  "timeout": "",
  "count": "1",
  "reduceRight": false,
  "reduceExp": "",
  "reduceInit": "",
  "reduceInitType": "",
  "reduceFixup": "",
  "x": 370,
  "y": 960,
  "wires": [
    [
      "2e59b80101a01e4e"
    ]
  ]
},
{
  "id": "2e59b80101a01e4e",
  "type": "function",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Notificação 2",
  "func": "function getFormattedDate(today) \n{\n
//var week = new Array('Domingo', 'Segunda', 'Terça',
'Quarta', 'Quinta', 'Sexta', 'Sábado');\n // var day =
week[today.getDay()];\n //var dd =
today.getDate();\n //var mm = today.getMonth()+1;
//Janeiro is 0!\n //var yyyy = today.getFullYear();\n
var hour = today.getHours();\n //var min =
today.getMinutes();\n\n //if(dd<10) { dd='0'+dd } \n
//if(mm<10) { mm='0'+mm } \n //if(min<10){

```

```

min='0'+min } \n\n return hour;\n}\n\nvar date = new
Date();\nvar text =
getFormattedDate(date);\n\nmsg.controle = 0;\nlet hora
= Number(text);\nlet PotAtiva =
Number(Object.values(msg.payload));\nhora =
20;\n\nif ((hora <= 6 || hora >= 19) && (PotAtiva <
(720*0.95))) { //Indicar potência do
conjunto\n\tmsg.controle = 1; //Ativará a
mensagem\n var message = 'UMA OU MAIS
LUMINÁRIAS COM DEFEITO';\n msg.payload =
message;\n return msg;\n}\n\nelse {\n msg.payload =
'NaN';\n return msg;\n}\n",
  "outputs": 1,
  "timeout": 0,
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],
  "x": 530,
  "y": 960,
  "wires": [
    [
      "c927621138f27d48",
      "c01fc2245651317b"
    ]
  ]
},
{
  "id": "c927621138f27d48",
  "type": "switch",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Switch",
  "property": "controle",
  "propertyType": "msg",
  "rules": [
    {
      "t": "eq",
      "v": "1",
      "vt": "num"
    }
  ],
  "checkall": "true",
  "repair": false,
  "outputs": 1,
  "x": 690,

```

```

    "y": 980,
    "wires": [
      [
        "c274f151e96e3d14"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "c01fc2245651317b",
    "type": "delay",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "delay",
    "pauseType": "delay",
    "timeout": "3",
    "timeoutUnits": "seconds",
    "rate": "1",
    "nbRateUnits": "1",
    "rateUnits": "second",
    "randomFirst": "1",
    "randomLast": "5",
    "randomUnits": "seconds",
    "drop": false,
    "allowrate": false,
    "outputs": 1,
    "x": 690,
    "y": 940,
    "wires": [
      [
        "8b85529b11aafe90"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "b1553f8352a69e6b",
    "type": "join",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Join",
    "mode": "custom",
    "build": "object",
    "property": "payload",
    "propertyType": "msg",
    "key": "topic",
    "joiner": "\\n",
    "joinerType": "str",
    "accumulate": false,

```

```

    "timeout": "",
    "count": "1",
    "reduceRight": false,
    "reduceExp": "",
    "reduceInit": "",
    "reduceInitType": "",
    "reduceFixup": "",
    "x": 370,
    "y": 460,
    "wires": [
      [
        "e66278c0f9a04927"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "e66278c0f9a04927",
    "type": "function",
    "z": "21f7c343c42fcfab",
    "name": "Notificação 2",
    "func": "function getDateFormatted(today) {\n
//var week = new Array('Domingo', 'Segunda', 'Terça',
'Quarta', 'Quinta', 'Sexta', 'Sábado');\n // var day =
week[today.getDay()];\n //var dd =
today.getDate();\n //var mm = today.getMonth()+1;
//Janeiro is 0!\n //var yyyy = today.getFullYear();\n
var hour = today.getHours();\n //var min =
today.getMinutes();\n\n //if(dd<10) { dd='0'+dd } \n
//if(mm<10) { mm='0'+mm } \n //if(min<10){
min='0'+min } \n\n return hour;\n}\n\nvar date = new
Date();\nvar text =
getDateFormatted(date);\n\nmsg.controle = 0;\nlet hora
= Number(text);\nlet PotAtiva =
Number(Object.values(msg.payload));\n//hora =
20;\n\nif ((hora <= 6 || hora >= 19) && (PotAtiva <
(720*0.95))) { //Indicar potência do
conjunto\n\tmsg.controle = 1; //Ativará a
mensagem\n var message = 'UMA OS MAIS
LUMINÁRIAS COM DEFEITO';\n msg.payload =
message;\n return msg;\n}\nelse {\n msg.payload =
'NaN';\n return msg;\n}\n",
    "outputs": 1,
    "timeout": 0,
    "noerr": 0,
    "initialize": "",

```

```

"finalize": "",
"libs": [],
"x": 530,
"y": 460,
"wires": [
  [
    "db4e82855ed2f5fd",
    "3df22f7c5201422b"
  ]
]
},
{
  "id": "db4e82855ed2f5fd",
  "type": "switch",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "Switch",
  "property": "controle",
  "propertyType": "msg",
  "rules": [
    {
      "t": "eq",
      "v": "1",
      "vt": "num"
    }
  ],
  "checkall": "true",
  "repair": false,
  "outputs": 1,
  "x": 690,
  "y": 480,
  "wires": [
    [
      "5af48146a23530a2"
    ]
  ]
},
{
  "id": "3df22f7c5201422b",
  "type": "delay",
  "z": "21f7c343c42fcfab",
  "name": "delay",
  "pauseType": "delay",
  "timeout": "3",
  "timeoutUnits": "seconds",
  "rate": "1",
  "nbRateUnits": "1",
  "rateUnits": "second",
  "randomFirst": "1",
  "randomLast": "5",
  "randomUnits": "seconds",
  "drop": false,
  "allowrate": false,
  "outputs": 1,
  "x": 690,
  "y": 440,
  "wires": [
    [
      "d55d313417fb46ec"
    ]
  ]
},
{
  "id": "51274130ac5d7982",
  "type": "mqtt-broker",
  "name": "EMQX",
  "broker": "broker.emqx.io",
  "port": "1883",
  "clientid": "",
  "autoConnect": true,
  "usetls": false,
  "protocolVersion": "4",
  "keepalive": "60",
  "cleansession": true,
  "autoUnsubscribe": true,
  "birthTopic": "",
  "birthQos": "0",
  "birthRetain": "false",
  "birthPayload": "",
  "birthMsg": {},
  "closeTopic": "",
  "closeQos": "0",
  "closeRetain": "false",
  "closePayload": "",
  "closeMsg": {},
  "willTopic": "",
  "willQos": "0",
  "willRetain": "false",
  "willPayload": "",
  "willMsg": {},
  "userProps": ""
}

```

```

"sessionExpiry": ""
},
{
  "id": "594c39a64965883d",
  "type": "ui_group",
  "name": "Luminária X",
  "tab": "4b91921f7bc2d2de",
  "order": 2,
  "disp": true,
  "width": "12",
  "collapse": false,
  "className": ""
},
{
  "id": "b1cc0ae15a18a022",
  "type": "ui_group",
  "name": "",
  "tab": "4b91921f7bc2d2de",
  "order": 2,
  "disp": true,
  "width": "12",
  "collapse": false,
  "className": ""
},
{
  "id": "37193dd909db10e6",
  "type": "ui_group",
  "name": "Luminária Y",
  "tab": "f7a9842cdaed74c1",
  "order": 1,
  "disp": true,
  "width": "12",

  "collapse": false,
  "className": ""
},
{
  "id": "ae0320a6b3544736",
  "type": "ui_group",
  "name": "",
  "tab": "f7a9842cdaed74c1",
  "order": 2,
  "disp": true,
  "width": "12",
  "collapse": false,
  "className": ""
},
{
  "id": "4b91921f7bc2d2de",
  "type": "ui_tab",
  "name": "Luminárias1",
  "icon": "dashboard",
  "disabled": false,
  "hidden": false
},
{
  "id": "f7a9842cdaed74c1",
  "type": "ui_tab",
  "name": "Luminárias2",
  "icon": "dashboard",
  "disabled": false,
  "hidden": false
}
]

```

Apêndice E – Perfil harmônico das Cargas Utilizadas

Este apêndice apresenta o perfil das cargas ensaiadas. O software WT-Viewer do wattímetro Yokogawa WT-210 foi utilizado para gerar as figuras. A Tabela 28 apresenta a Distorção Harmônica Total (DHT) da tensão da fonte de potência Pacific 110-ADX quando o equipamento está funcionando a vazio. Já a Figura 59 e a Figura 60 mostram o perfil da tensão fornecida, consistindo em, na prática, um sinal puramente senoidal.

Tabela 28 - Distorção Harmônica Total de Tensão da fonte.

Tensão de Alimentação (V)	DHT (%)
220,0	0,10
127,0	0,19

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

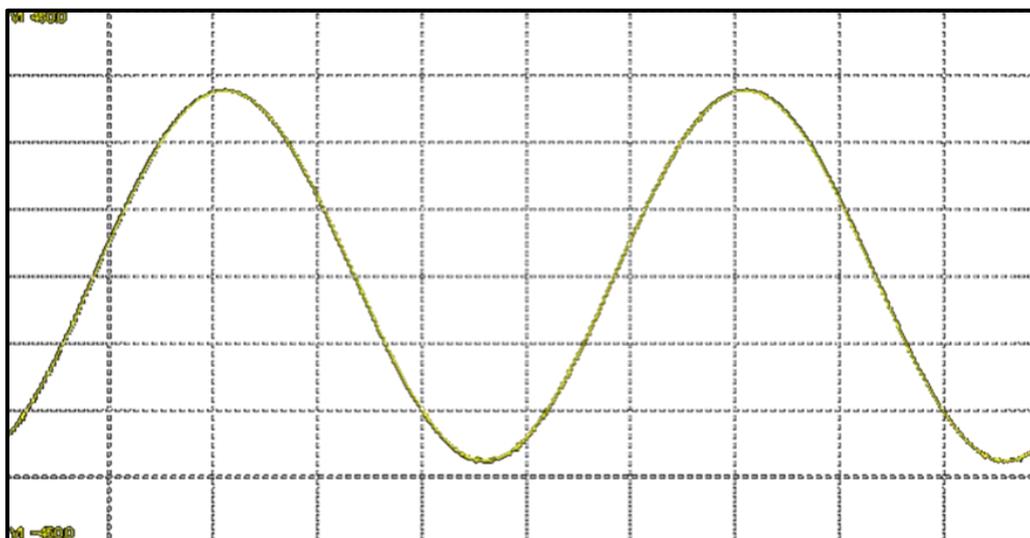


Figura 59 - Perfil da tensão fornecida pela fonte em 220V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

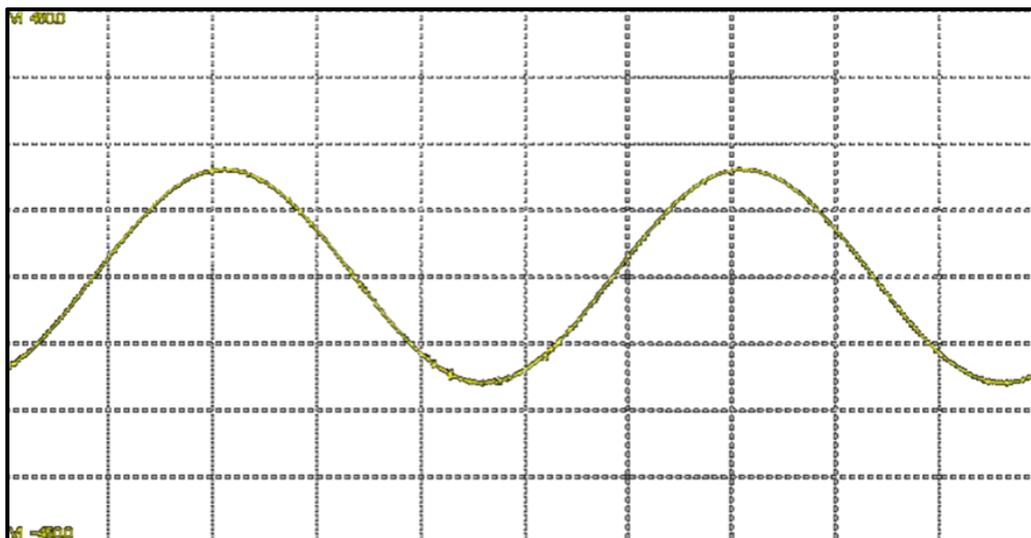


Figura 60 - Perfil da tensão fornecida pela fonte em 127V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

A Tabela 29 apresenta a DHT da corrente da Carga 1. Já a Figura 61 e a Figura 62 mostram o perfil da corrente requerida. Observa-se que a característica senoidal da onda é mantida devido ao conteúdo harmônico ser muito baixo.

Tabela 29 - Distorção Harmônica Total de Corrente da Carga 1.

Tensão de Alimentação (V)	DHT (%)
220,0	0,5
127,0	0,4

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

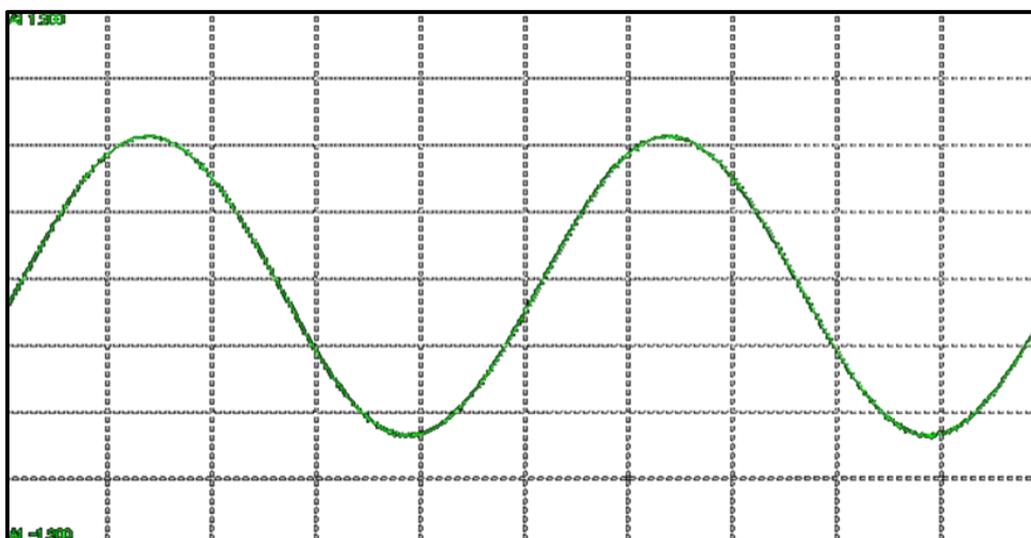


Figura 61 - Perfil de corrente da Carga 1 em 220V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

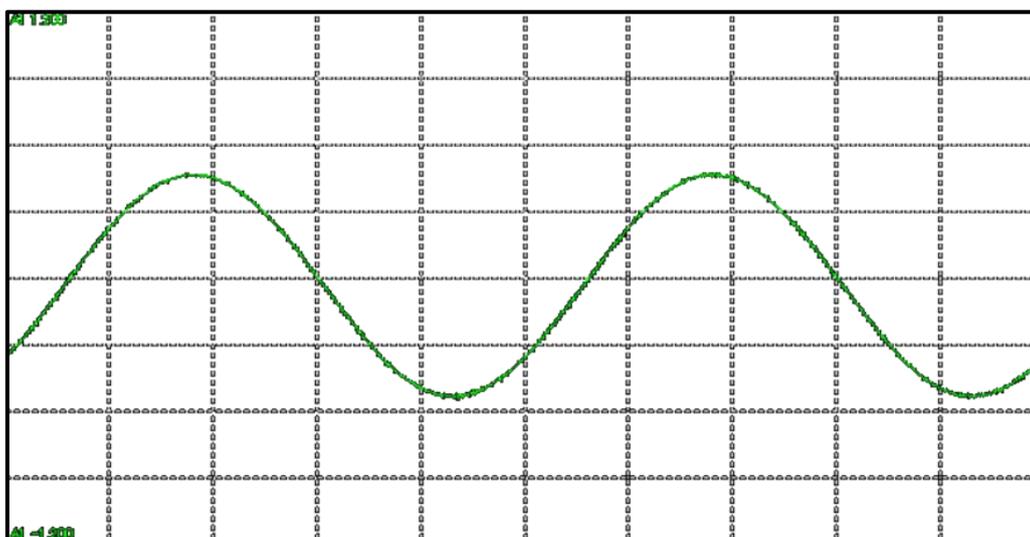


Figura 62 - Perfil de corrente da Carga 1 em 127V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

A Tabela 30 apresenta a DHT da corrente da Carga 2. Já a Figura 63 e a Figura 64 mostram o perfil da corrente requerida. Percebe-se que o conteúdo harmônico presente já é capaz de distorcer o sinal, apesar da característica senoidal ainda estar visivelmente presente. A Tabela 31 mostra as ordens harmônicas avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38]. Dentre elas, a 3ª ordem, em vermelho, é a que mais se sobressai.

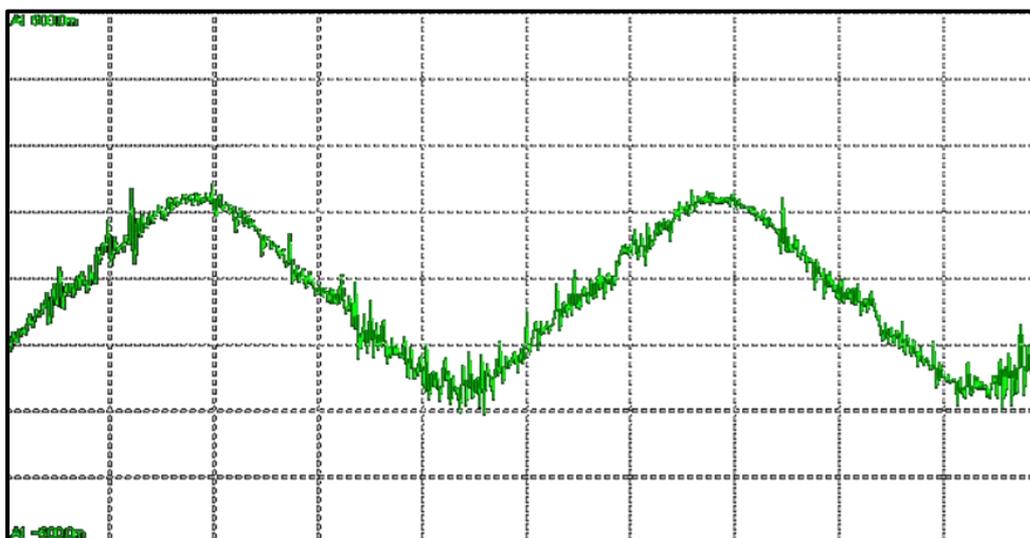


Figura 63 - Perfil de corrente da Carga 2 em 220V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

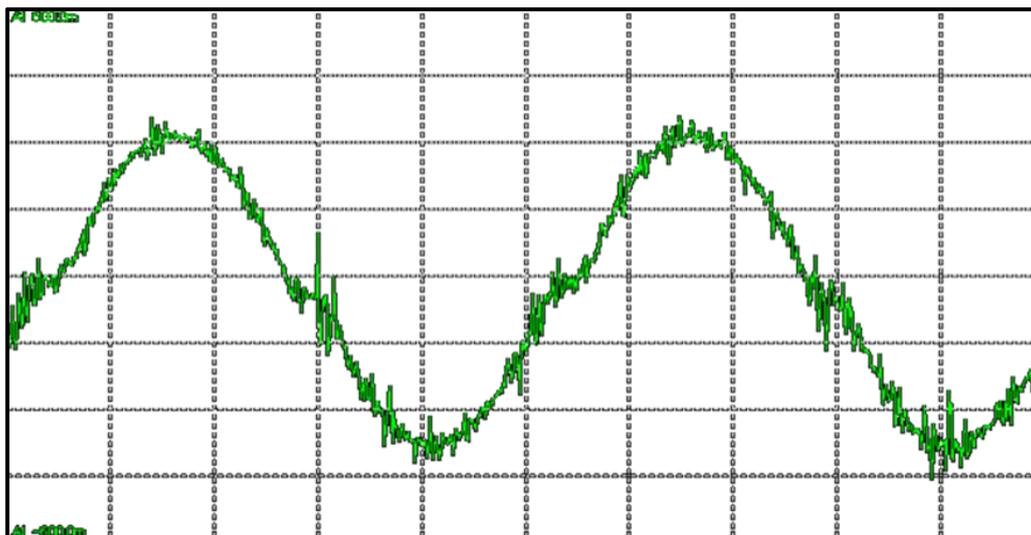


Figura 64 - Perfil de corrente da Carga 2 em 127V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

Tabela 30 - Distorção Harmônica Total de Corrente da Carga 2.

Tensão de Alimentação (V)	DHT (%)
220,0	10,9
127,0	9,5

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

Tabela 31 – Ordens harmônicas da Carga 2 avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38].

220 V		127 V	
Ordem/Valor (%)		Ordem/Valor (%)	
2 – 0,5	21 – 1,0	2 – 0,3	21 – 0,6
3 – 8,5	23 – 1,1	3 – 7,1	23 – 0,8
5 – 1,1	25 – 1,3	5 – 4,8	25 – 0,8
7 – 2,0	27 – 0,5	7 – 2,4	27 – 0,6
9 – 2,3	29 – 0,9	9 – 0,9	29 – 0,4
11 – 2,0	31 – 0,8	11 – 0,5	31 – 0,3
13 – 1,7	33 – 0,7	13 – 0,5	33 – 0,4
15 – 1,4	35 – 0,7	15 – 0,4	35 – 0,3
17 – 1,0	37 – 1,1	17 – 0,4	37 – 0,5
19 – 1,2	39 – 0,7	19 – 0,4	39 – 0,5

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

A Tabela 32 apresenta a DHT da corrente da Carga 3. Já a Figura 65 e a Figura 66 mostram o perfil da corrente requerida. Em comparação com as cargas 1 e 2, observa-se que o índice harmônico é consideravelmente maior. Percebe-se que o conteúdo harmônico presente distorce a forma de onda significativamente, dessa forma, perdendo a característica de uma senoide. Apesar da distorção ser relativamente menor em 127 V, o perfil continua bastante distorcido em relação a uma senoide. No entanto se assemelha mais a uma senoide do que o perfil apresentado em 220 V. A Tabela 33 mostra as ordens harmônicas avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38]. Dentre elas, em 220 V, a 3^a, 7^a, 9^a e a 11^a, em vermelho, são as que se destacam. Já em 127 V, apenas a 3^a e a 5^a, em vermelho, se sobressaem.

Tabela 32 - Distorção Harmônica Total de Corrente da Carga 3.

Tensão de Alimentação (V)	DHT (%)
220,0	52,9
127,0	31,3

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

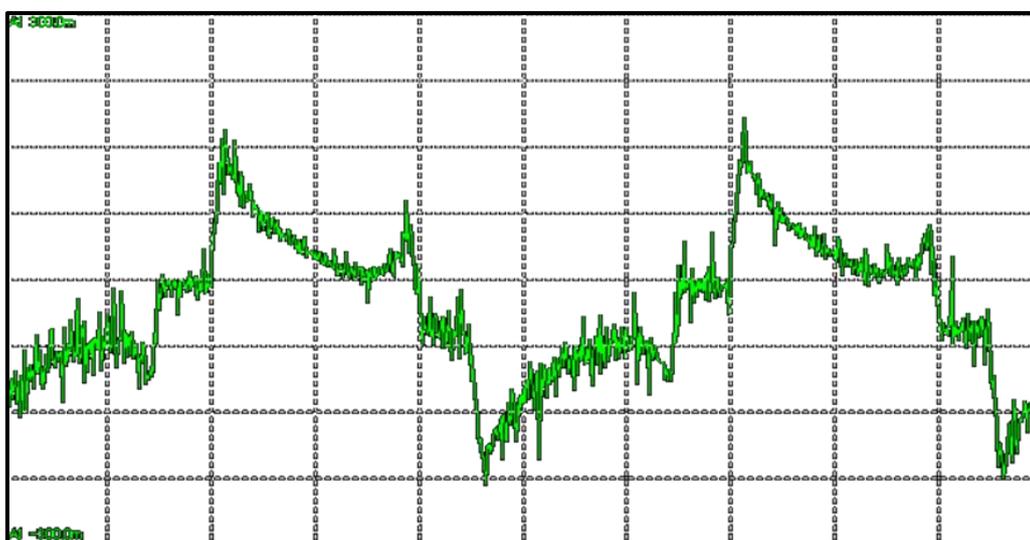


Figura 65 - Perfil de corrente da Carga 3 em 220V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

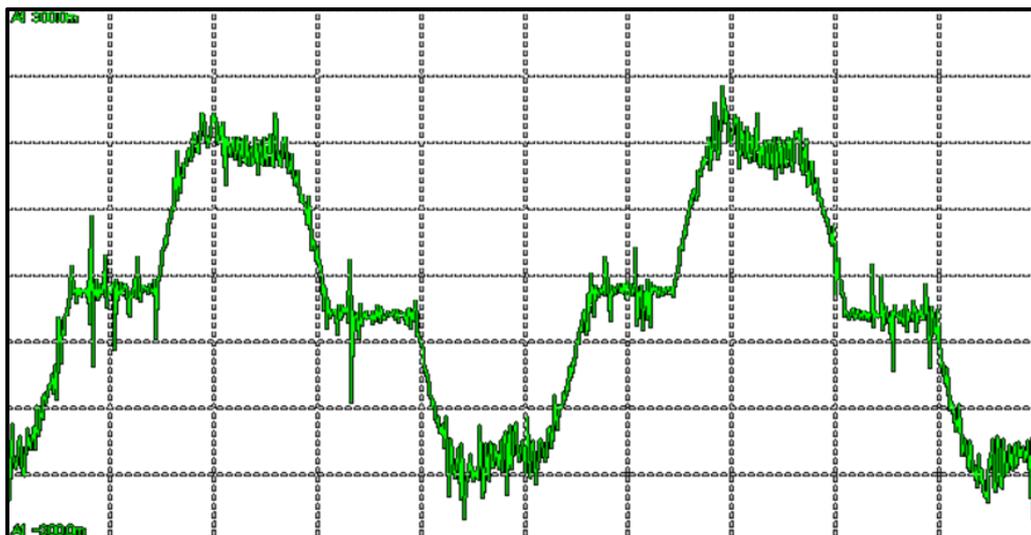


Figura 66 - Perfil de corrente da Carga 3 em 127V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

Tabela 33 - Ordens harmônicas da Carga 3 avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38].

220 V		127 V	
Ordem/Valor (%)		Ordem/Valor (%)	
2 – 0,5	21 – 2,3	2 – 0,3	21 – 0,4
3 – 41,0	23 – 2,0	3 – 22,3	23 – 0,6
5 – 8,3	25 – 3,9	5 – 20,2	25 – 0,4
7 – 16,1	27 – 3,1	7 – 5,2	27 – 0,8
9 – 20,1	29 – 1,8	9 – 4,0	29 – 0,5
11 – 12,9	31 – 1,1	11 – 2,0	31 – 0,5
13 – 2,8	33 – 1,3	13 – 0,6	33 – 0,6
15 – 5,6	35 – 0,6	15 – 2,5	35 – 0,7
17 – 8,8	37 – 1,2	17 – 1,3	37 – 0,3
19 – 6,8	39 – 1,0	19 – 0,8	39 – 0,6

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

A Tabela 34 apresenta a DHT da corrente da Carga 4. Já a Figura 67 e a Figura 68 mostram o perfil da corrente requerida. Em comparação com as cargas mostradas até então, observa-se a presença de altos índices de conteúdo harmônico, dessa forma, fazendo com que apresente uma forma de onda completamente distorcida em relação a uma senoide. A Tabela 35 mostra as ordens harmônicas avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38]. Observa-se que em ambas as tensões, todos os valores apresentados superam os limites estabelecidos pela norma, com destaque, em vermelho, para as ordens que apresentaram índice superior a 20%.

Tabela 34 - Distorção Harmônica Total de Corrente da Carga 4.

Tensão de Alimentação (V)	DHT (%)
220,0	167,9
127,0	112,1

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

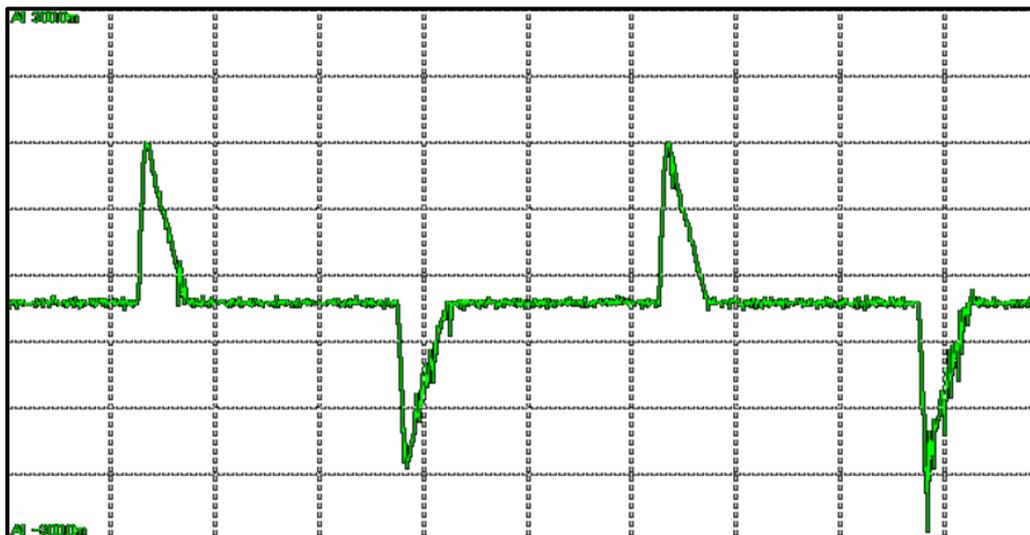


Figura 67 - Perfil de corrente da Carga 4 em 220V.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

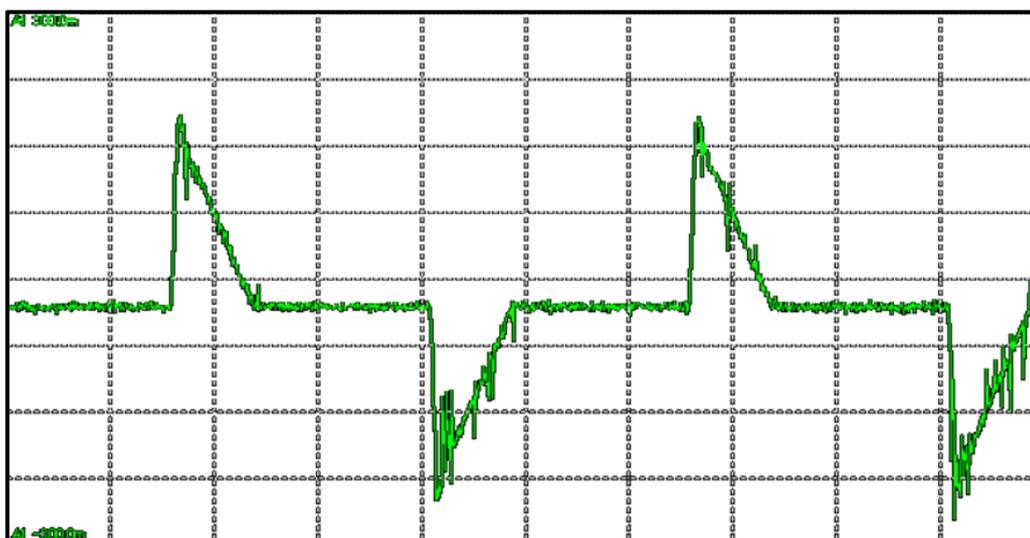


Figura 68 - Perfil de corrente da Carga 4 em 127V.

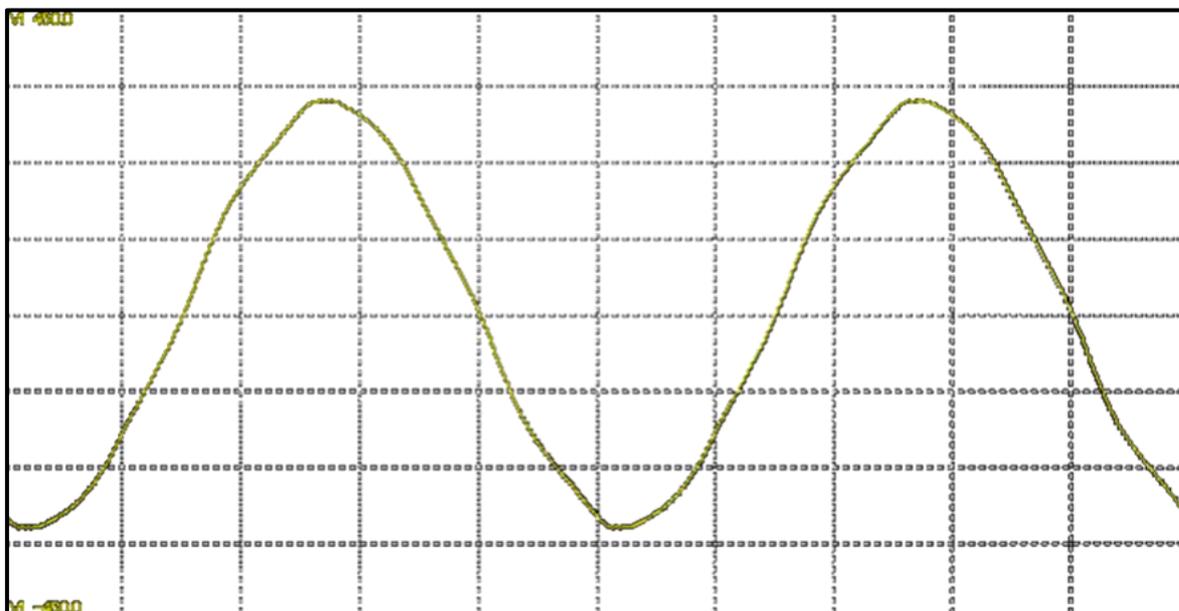
Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

Tabela 35 – Ordens harmônicas da Carga 4 avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38].

220 V		127 V	
Ordem/Valor (%)	Ordem/Valor (%)	Ordem/Valor (%)	Ordem/Valor (%)
2 – 2,8	21 – 20,2	2 – 2,1	21 – 10,8
3 – 93,3	23 – 17,8	3 – 81,1	23 – 10,0
5 – 81,8	25 – 15,3	5 – 52,8	25 – 9,4
7 – 67,3	27 – 13,8	7 – 29,1	27 – 8,5
9 – 51,8	29 – 12,4	9 – 21,8	29 – 7,9
11 – 37,3	31 – 11,2	11 – 20,9	31 – 7,2
13 – 27,6	33 – 9,8	13 – 16,7	33 – 5,9
15 – 23,2	35 – 8,5	15 – 13,6	35 – 5,1
17 – 22,6	37 – 7,1	17 – 13,2	37 – 4,3
19 – 21,9	39 – 6,5	19 – 12,3	39 – 3,8

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

A Tabela 36 apresenta a DHT da tensão da rede em 220 V as quais a Carga 5 e a Carga 6 poderiam estar submetidas. Já a Figura 69 mostra o perfil da tensão fornecida, onde, apesar da aparência senoidal, percebe-se uma deformação quando comparado com a Figura 59.

**Figura 69 - Perfil da tensão fornecida pela rede em 220V.**

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

Tabela 36 - Distorção Harmônica Total de Tensão da rede.

Tensão de Alimentação (V)	DHT (%)
220,0	2,14

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

A Tabela 37 apresenta a DHT da corrente da Carga 5. Já a Figura 70 e a Figura 71 mostram, respectivamente, o perfil da corrente requerida quando alimentado pela fonte de potência Pacific 110-ADX e pela rede. Percebe-se que o conteúdo harmônico presente, apesar de ser considerado baixo, é capaz de distorcer o sinal em alguns pontos, no entanto, a característica senoidal ainda está visivelmente presente. Dado que a rede se trata de uma fonte de tensão não estabilizada, estando sujeita a flutuações, percebe-se distorções mais acentuadas nos picos do sinal medido. A Tabela 38 mostra as ordens harmônicas avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38]. Observa-se que o perfil harmônico desta carga é baixo em ambas as situações, com o aumento da DHT ocorrendo devido elevação do conteúdo harmônico na 3^a, 5^a e 7^a ordem (em vermelho).

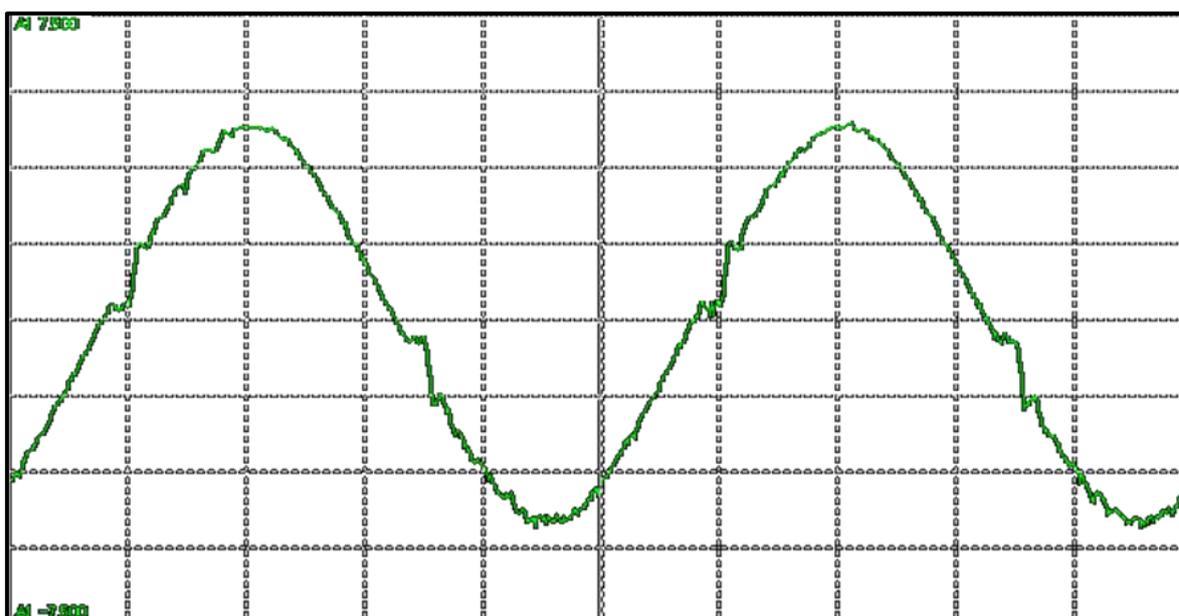


Figura 70 - Perfil de corrente da Carga 5 em 220V na Pacific 110-ADX.

Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

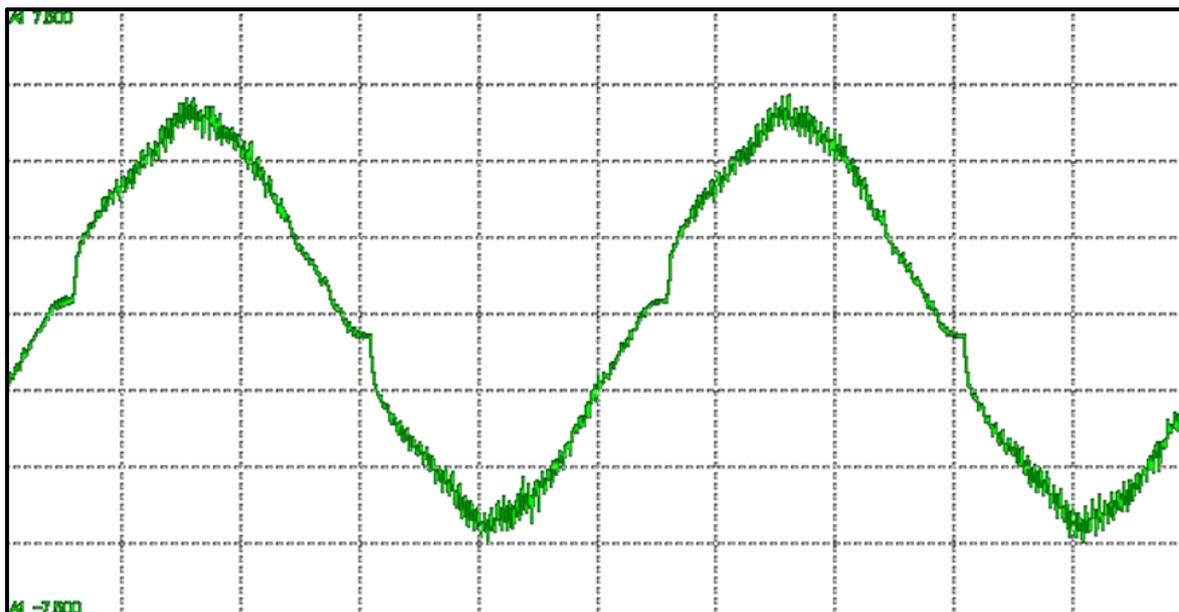


Figura 71 - Perfil de corrente da Carga 5 em 220V na rede.
 Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

Tabela 37 - Distorção Harmônica Total de Corrente da Carga 5.

Fonte de Alimentação	DHT (%)
Pacific 110-ADX	5,9
Rede	6,8

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

Tabela 38 - Ordens harmônicas da Carga 5 avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38].

Pacific 110-ADX		Rede	
Ordem/Valor (%)	Ordem/Valor (%)	Ordem/Valor (%)	Ordem/Valor (%)
2 – 0,1	21 – 1,1	2 – 0,1	21 – 1,0
3 – 3,9	23 – 0,8	3 – 4,1	23 – 1,1
5 – 1,4	25 – 0,8	5 – 2,3	25 – 0,3
7 – 1,3	27 – 1,2	7 – 3,2	27 – 0,8
9 – 1,4	29 – 0,8	9 – 1,3	29 – 0,7
11 – 1,2	31 – 0,5	11 – 1,0	31 – 0,6
13 – 1,3	33 – 0,7	13 – 1,8	33 – 0,2
15 – 1,0	35 – 1,1	15 – 0,8	35 – 0,4
17 – 1,1	37 – 0,3	17 – 0,9	37 – 0,6
19 – 1,1	39 – 0,1	19 – 0,8	39 – 0,2

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

A Tabela 39 apresenta a DHT da corrente da Carga 6. Já a Figura 72 e a Figura 73 mostram, respectivamente, o perfil da corrente requerida quando alimentado pela fonte de potência Pacific 110-ADX e pela rede. Observa-se um perfil similar ao da Carga 5, sendo caracterizado pelo baixo índice de conteúdo harmônico. A Tabela 40 mostra as ordens harmônicas avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38]. Verifica-se que o aumento da DHT ocorre devido elevação do conteúdo harmônico na 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem (em vermelho).

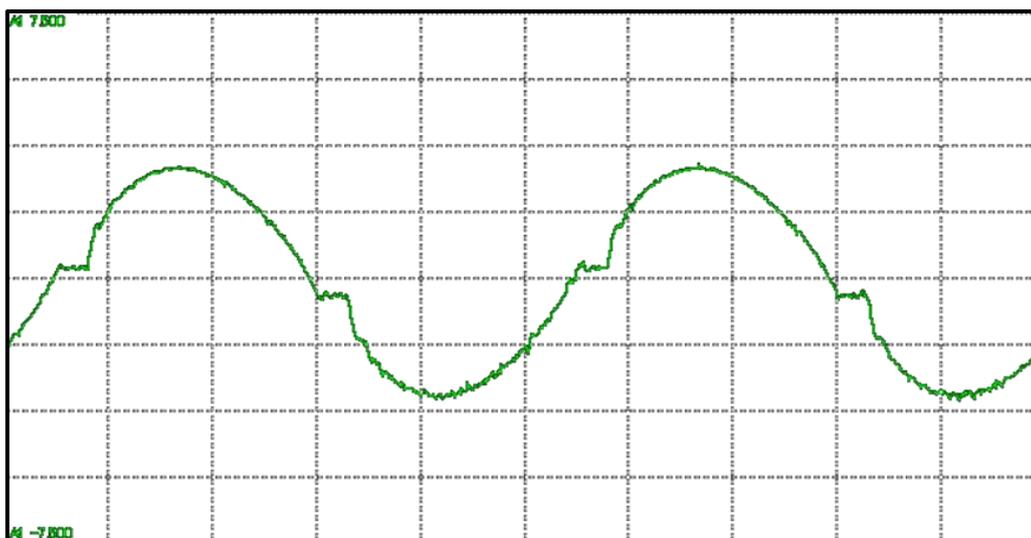


Figura 72 - Perfil de corrente da Carga 6 em 220V na Pacific 110-ADX.
Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

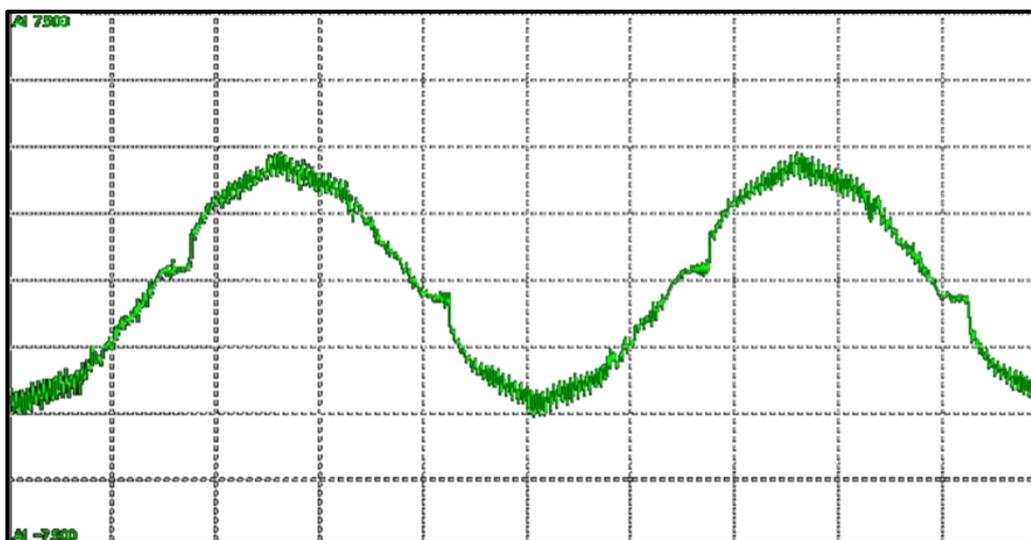


Figura 73 - Perfil de corrente da Carga 6 em 220V na rede.
Fonte: WT-Viewer, Resultado Experimental.

Tabela 39 - Distorção Harmônica Total de Corrente da Carga 6.

Fonte de Alimentação	DHT (%)
Pacific 110-ADX	7,6
Rede	8,0

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.

Tabela 40 - Ordens harmônicas da Carga 6 avaliadas pela IEC 61000-3-2 [38].

Pacific 110-ADX		Rede	
Ordem/Valor (%)		Ordem/Valor (%)	
2 – 0,1	21 – 0,5	2 – 0,1	21 – 0,4
3 – 3,1	23 – 0,9	3 – 3,5	23 – 0,6
5 – 2,2	25 – 0,6	5 – 3,6	25 – 0,7
7 – 3,9	27 – 0,5	7 – 3,6	27 – 0,9
9 – 3,2	29 – 1,0	9 – 3,0	29 – 0,9
11 – 2,0	31 – 0,6	11 – 2,3	31 – 0,9
13 – 2,5	33 – 0,5	13 – 1,8	33 – 0,6
15 – 1,3	35 – 0,6	15 – 1,2	35 – 0,4
17 – 0,5	37 – 0,4	17 – 0,8	37 – 0,4
19 – 0,7	39 – 0,2	19 – 0,5	39 – 0,3

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados experimentais.