

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UMA ESTRATÉGIA DE RETROFIT PARA MONITORAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM TEMPO REAL COM BASE NO METAMODELO SMARTLVGRID

Rubens de Andrade Fernandes

Manaus – Amazonas

Junho de 2022

Rubens de Andrade Fernandes

UMA ESTRATÉGIA DE RETROFIT PARA MONITORAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM TEMPO REAL COM BASE NO METAMODELO SMARTLVGRID

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Controle e de Automação Modernos.

Prof. D.Sc. Ozenir Farah da Rocha Dias (orientador)

Prof. D.Sc. Celso Barbosa Carvalho (coorientador)

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Fernandes, Rubens de Andrade
F363e Uma estratégia de retrofit para monitoramento de parâmetros elétricos em tempo real com base no metamodelo SmartLVGrid / Rubens de Andrade Fernandes . 2022
108 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Ozenir Farah da Rocha Dias
Coorientador: Celso Barbosa Carvalho
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Retrofit. 2. SmartLVGrid. 3. Sistemas de tempo real. 4. IoT. 5. Monitoramento energético. I. Dias, Ozenir Farah da Rocha. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

RUBENS DE ANDRADE FERNANDES

UMA ESTRATÉGIA DE RETROFIT PARA MONITORAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM TEMPO REAL COM BASE NO METAMODELO SMARTLVGRID

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas.

Aprovada em 17 de junho de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ozenir Farah da Rocha Dias, Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Jozias Parente de Oliveira, Membro
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Israel Gondres Torné, Membro
Universidade do Estado do Amazonas

Agradecimentos

- Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me guiar até o presente momento.
- Agradeço a minha mãe, por ser um exemplo de mulher e por seu amor infinito que me fez ser o homem que sou hoje.
- Agradeço a meu pai, por todo o incentivo e conselhos, pelos momentos de reflexão e por ser meu melhor amigo.
- Agradeço a Júlia Victória, pelo apoio e encorajamento nesta jornada.
- Agradeço aos professores Ozenir Dias e Celso Carvalho, por toda orientação e ajuda durante esta etapa.
- Agradeço aos meus tios, Erllon, Eraldo, Evandro Márcio e Marcelo Oliveira, por todos os conselhos e de apoio nesta jornada.
- Agradeço a minha família, por todo o apoio, amor e incentivo.
- Agradeço ao professor Raimundo Cláudio Souza Gomes, por toda a ajuda e pela amizade.
- Agradeço aos professores André Printes, Claudionor Ramos, Israel Torné e Jozias Parente pelos bons momentos vividos e pelos ensinamentos.
- Agradeço aos amigos Gabriel Rocha, Gabrielle Mestrinho, Fabrício Seppe, Heitor, Ítalo Alves, Lennon Nascimento, Neilson Vilaça, Ruan Teixeira e Samuel Rego, pelos momentos de apoio e de alegria. Que venham muitos mais.
- Agradeço a todos os colaboradores do centro de pesquisa e desenvolvimento HUB - Tecnologia e Inovação, por toda ajuda e amizade.

Resumo da Dissertação apresentada à UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

UMA ESTRATÉGIA DE RETROFIT PARA MONITORAMENTO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM TEMPO REAL COM BASE NO METAMODELO SMARTLVGRID

Rubens de Andrade Fernandes

Orientadores: Prof. D.Sc. Ozenir Farah da Rocha Dias

Prof. D.Sc. Celso Barbosa Carvalho

Programa: Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

A gestão de energia elétrica possibilita o planejamento e o uso eficiente deste insumo para melhorar a competitividade, sustentabilidade e para reduzir custos ao consumidor final. Junto a isso, o paradigma de Internet das Coisas (IoT) promove o surgimento de soluções de monitoramento remoto para viabilizar estratégias para este tipo de gestão. Contudo, estas soluções podem favorecer o descarte ou substituição de sistemas desatualizados, porém ainda necessários. Assim, um modelo de referência que preconize o *retrofit* de sistemas pré-existentes seria uma alternativa para implantar recursos de monitoramento para viabilizar a gestão energética. Nesse sentido, este trabalho apresenta uma estratégia para monitoramento de parâmetros elétricos em tempo real a partir do *retrofit* de sistemas elétricos legados. Essa estratégia consiste na adaptação do metamodelo SmartLVGrid para sistematizar a inserção de recursos de monitoramento remoto em circuitos elétricos de baixa tensão. Desse modo, almeja-se analisar os parâmetros elétricos no contexto da eficiência energética e da qualidade de energia. Para validar a proposta, desenvolveram-se plataformas embarcadas de tempo real para monitoramento dos circuitos de um quadros de distribuição de energia, integradas a uma aplicação em *software* para visualização e armazenamento dos dados em nuvem. Dessa forma, este trabalho apresenta uma alternativa para viabilizar a gestão energética através do monitoramento remoto e do

aproveitamento máximo dos recursos pré-existentes. Os resultados obtidos apresentam o monitoramento individual dos parâmetros elétricos, da demanda energética, do fator de potência e de eventos associados à variações da qualidade do produto nos circuitos do quadro de distribuição legado.

Palavras-chave: *Retrofit*, SmartLVGrid, Sistemas de tempo real, IoT, Monitoramento energético.

Abstract of Dissertation presented to UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

A RETROFIT STRATEGY FOR REAL-TIME ELECTRICAL PARAMETER MONITORING BASED ON THE SMARTLVGRID METAMODEL

Rubens de Andrade Fernandes

Advisors: Prof. D.Sc. Ozenir Farah da Rocha Dias

Prof. D.Sc. Celso Barbosa Carvalho

Department: Postgraduate in Electrical Engineering

Electric energy management enables the planning and efficient use of this input to improve competitiveness, sustainability and to reduce costs to the final consumer. In addition, the Internet of Things (IoT) paradigm promotes the emergence of remote monitoring solutions to enable strategies for this type of management. However, these solutions can favor the disposal or replacement of outdated systems, but still necessary. Thus, a reference model that advocates the retrofit of pre-existing systems would be an alternative to implement monitoring resources to enable energy management. In this sense, this work presents a strategy for monitoring electrical parameters in real time from the retrofit of legacy electrical systems. This strategy consists of adapting the SmartLVGrid metamodel to systematize the insertion of remote monitoring resources in low voltage electrical circuits. Thus, the aim is to analyze the electrical parameters in the context of energy efficiency and energy quality. To validate the proposal, real-time embedded platforms were developed for monitoring the circuits of a power distribution board, integrated into a software application for visualization and storage of data in the cloud. In this way, this work presents an alternative to enable energy management through remote monitoring and maximum use of pre-existing resources. The results obtained present the individual monitoring of electrical parameters, energy demand, power

factor and events associated with variations in product quality in the circuits of the legacy distribution board.

Keywords: Retrofit, SmartLVGrid, Real-time systems, IoT, Energy monitoring.

Lista de Figuras

1 Representação de um divisor resistivo. 37
2 Transformador de corrente em operação. 38
3 Amostragem de um sinal analógico. 40
4 Erros de ganho (a) e *offset* (b) positivos obtidos de um ADC. 41
5 Metodologia para aplicação de um modelo de auditoria energética. . . 44
6 Eventos de variações da forma de onda em um sinal elétrico. 46
7 Utilização do protocolo MQTT com dispositivos e usuários. 50
8 Processo de trocas de contextos entre *tasks* em um RTOS. 52
9 Trocas de contextos em ambientes preemptivos e cooperativos. 53
10 Interação entre os estados das *tasks*. 54
11 Exemplificação de uma aplicação com semáforo binário. 55
12 Exemplificação de uma operação FIFO em uma fila. 56

13 Estratégia de retrofit proposta para monitoramento energético. 58
14 Arquitetura SmartLVGrid adaptada ao modelo proposto. 60
15 Diagrama de arquitetura do ACU-BREAKER. 62
16 Diagrama de arquitetura do ACU-ROUTER. 63

17 Processo de comunicação do sistema proposto. 66
18 Estratégia de utilização do ACU-BREAKER. 67
19 Perspectiva superior (a) e inferior (b) em 3D do ACU-BREAKER. . . 71
20 Perspectiva do painel de ACUs elaborado. 72
21 Rotina principal do *firmware* do ACU-BREAKER. 73
22 Interação entre as *tasks* do *firmware* de tempo real desenvolvido. . . . 76
23 ACU-BREAKER em bancada para calibração com fonte de precisão. 77
24 Estrutura do centro de supervisão e controle. 79

25 Painel com ACUs instalado no quadro elétrico. 80
26 *Retrofit* do circuito elétrico com as conexões do ACU-BREAKER. . . 81

27 *Logs* referentes às CSFs implementadas no ACU-BREAKER. 83
28 *Logs* de recebimento dos parâmetros dos circuitos do quadro elétrico. 84
29 *Dashboard* de visualização dos dados de monitoramento e do dispositivo. 85
30 Fator de potência e potência ativa da fase B do circuito 10. 86
31 Fator de potência e potência ativa da fase B do quadro monitorado. . 86
32 Evento de ultrapassagem de demanda. 87
33 Eventos de subtensão no circuito 10. 88
34 Desiquilíbrio das correntes trifásicas do circuito 10. 88

35 Mensagens de requisição (a) e resposta (b) com os parâmetros elétricos. 106
36 Mensagens de requisição (a) e resposta (b) para ajustes dos parâmetros de calibração. 107
37 Mensagens de requisição (a) e resposta (b) para ajustes dos parâmetros de configuração. 107

38 *Top view* (a) e *botton view* (b) do *layout* do ACU-BREAKER. 108

Lista de Tabelas

1 Trabalhos com ênfase em eficiência energética. 25
2 Trabalhos de sistemas de tempo real para monitoramento energético. 26
3 Trabalhos com ênfase em recursos computacionais para gestão energética. 26
4 Trabalhos com ênfase na análise da qualidade do produto. 26
5 Trabalhos com contribuições de técnicas de *retrofit*. 28
6 Trabalhos com ênfase em soluções de *middleware* e de interoperabilidade. 29
7 Trabalhos com contribuições baseadas em metamodelos. 30

8 Variações permitidas para tensão eficaz em regime permanente. . . . 47
9 Valores de VTCDs permitidos em intervalos instantâneos. 47
10 Valores de VTCDs permitidos em intervalos momentâneos. 48
11 Valores de VTCDs permitidos em intervalos temporários. 48

12 Mensagens utilizadas nos pacotes de comunicação. 65
13 Especificações técnicas do ESP-WROOM-32E. 68
14 Especificações dos dispositivos de proteção. 71

Lista de Abreviaturas

ACU *Automation and Control Unit*

ADC *Analog-to-Digital Converter*

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI *American National Standards Institute*

BEMS *Building Energy Management System*

CIN *Coupling and Interaction Node*

CPU *Central Processing Unit*

CSF *Computational Support Function*

DRF *Domain Retrofitting Function*

ESP-IDF *Espressif IoT Development Framework*

FIFO *First-In-First-Out*

FP Fator de Potência

GDT *Gas Discharge Tube*

GPIO *General Purpose Input/Output*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IoT *Internet of Things*

ISF *Inter-Domain Support Function*

ISR *Interruption Service Routine*

JSON *JavaScript Object Notation*

LAN *Local Area Network*

MAN *Metropolitan Area Network*

MQTT *Message Queue Telemetry Transport*

NB-IoT *Narrowband* IoT

OP *Operational Primitives*

PoI *Points of Interface*

PRODIST Procedimentos de Distribuição

PTC *Positive Temperature Coefficient*

QoS *Quality of Service*

RTOS *Real-Time Opera- ting Systems*

SCC *Supervision Control Center*

SmartLVGrid *Smart Low Voltage Grid*

SN *Service Node*

SoC *System-on-a-chip*

SPI *Serial Peripheral Interface*

SQL *Structured Query Language*

SRAM *Static Random-Access Memory*

SSID *Service Set Identifier*

TCP *Transmission Control Protocol*

THD *Total Harmonic Distortion*

UART *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*

VTCD Variações de Tensão de Curta Duração

W3C *Word Wide Web Consortium*

WSN *Wireless Sensors Network*

Sumário

1 Introdução **17**

1.1 Objetivo Geral 20

1.2 Objetivos Específicos 20

1.3 Organização da Dissertação 20

2 Estado da Arte **23**

2.1 Trabalhos relacionados 23

2.1.1 Aplicações de sistemas de monitoramento energético no contexto do paradigma de IoT 23

2.1.2 *Retrofit* 27

2.1.3 *Middleware* e interoperabilidade 28

2.1.4 Metamodelos 30

3 Fundamentação teórica **32**

3.1 Parâmetros elétricos 32

3.1.1 Análise dos parâmetros elétricos com características senoidais 32

3.1.2 Parâmetros elétricos de características não senoidais 34

3.2 Medição de parâmetros elétricos 36

3.2.1 Transdutores para aquisição de parâmetros elétricos 36

3.2.1.1 Transdução da tensão elétrica 36

3.2.1.2 Transdução da corrente elétrica 37

3.2.2 Proteções contra surtos na medição de parâmetros elétricos . . 39

3.2.2.1 Diodo Zener 39

3.2.2.2 Termistor PTC 39

3.2.2.3 GDT 39

3.2.2.4 Isolador digital 40
3.2.3 Aquisição e calibração dos parâmetros elétricos nos sistemas de medição 40
3.3 Eficiência energética 41
3.3.1 O consumo e a demanda energética 42
3.3.2 Fator de Potência 43
3.3.3 Auditoria energética 44
3.4 Qualidade de energia elétrica 45
3.4.1 Qualidade do produto 45
3.4.1.1 Harmônicos 46
3.4.1.2 Variações de frequência 46
3.4.1.3 Variações de tensão de longa duração 47
3.4.1.4 Variações de tensão de curta duração (VTCD) 47
3.4.1.5 Flutuações de tensão 48
3.4.1.6 Desiquilíbrios de tensão e corrente 48
3.5 O protocolo de comunicação MQTT 49
3.6 Sistemas operacionais de tempo real 50
3.6.1 *Tasks* 51
3.6.2 Gerenciamento de *tasks* e recursos em um RTOS 51
3.6.3 Prioridade 53
3.6.4 Os estados das *tasks* 54
3.6.5 Os objetos de um RTOS 55
3.6.5.1 Semáforos 55
3.6.5.2 Grupos de eventos 56
3.6.5.3 Filas de mensagens 56

4 Metodologia para implantação do sistema proposto 57
4.1 Metamodelo SmartLVGrid adaptado ao sistema proposto 60
4.1.1 Modelagem do ACU-BREAKER 61
4.1.2 Modelagem do ACU-ROUTER 62

5 Materiais e especificações para implementação do sistema 64
5.1 Definição da camada de interoperabilidade do sistema 64

5.2 Implementação do *middleware* ACU-BREAKER 66
5.2.1 Especificações de *hardware* 67
5.2.1.1 SoC para processamento e comunicação 68
5.2.1.2 Circuito para aquisição e digitalização dos parâmetros elétricos 69
5.2.1.3 Circuitos de condicionamento de tensão e corrente . 69
5.2.1.4 Dispositivos de proteção 70
5.2.1.5 Esquema elétrico e *Layout* 71
5.2.1.6 Painel de ACUs 71
5.2.2 Desenvolvimento do *firmware* de tempo real 72
5.2.3 Procedimento de calibração do ACU-BREAKER 76
5.3 O *middleware* ACU-ROUTER 77
5.4 Implementação do centro de supervisão e controle 78
5.5 Instalação do sistema proposto 79

6 Resultados **82**
6.1 Validação das CSFs 82
6.2 Validação das ISFs e da DRF de monitoramento dos parâmetros elétricos 83
6.3 Interfaces de *software* desenvolvidas para o SCC 84
6.4 Análises de eficiência energética com o sistema proposto 85
6.5 Análises de qualidade de energia com o sistema proposto 87
6.6 Discussão dos resultados 89

7 Conclusões **91**

Referências Bibliográficas **93**

A Artigos Publicados **105**
A.1 Artigos Publicados em Revista 105
A.2 Artigos Aceitos em Eventos Científicos 105

B Mensagens utilizadas em formato JSON **106**

C *Layout* do ACU-BREAKER **108**

Capítulo 1

Introdução

A sociedade impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias para automatização de processos e sistemas nos mais diversos setores. As indústrias, cidades, residências e instalações prediais são exemplos de alguns dos setores que passam por constantes transformações tecnológicas. Nesse contexto, os paradigmas digitais deste milênio, como a Indústria 4.0, Internet das Coisas (IoT), *Smart Grids*, *Smart Cities* e *Smart Buildings*, promovem processos de convergência tecnológica a partir de soluções digitalmente integradas para monitoramento e controle de ativos e insumos essenciais [1].

A transição digital obtida da implantação destes paradigmas nesses setores pode ocorrer de forma abrupta ou não, a depender do tempo e do custo das implementações necessárias para se obter as funcionalidades desejadas [2]. Soluções de curto prazo, por exemplo, podem levar à necessidade de investimentos maiores que inviabilizariam as implementações desejadas. Ainda, essas soluções promovem o descarte ou substituição de estruturas e dispositivos legados que ainda poderiam contribuir com suas funcionalidades ou que não possuem seus custos de implementação totalmente amortizados [3]. Portanto, nesses casos, é necessário empregar processos que direcionem a transição tecnológica de forma gradual através de estratégias que utilizem ao máximo os recursos pré-existentes, pois, do contrário, esses processos só seriam viáveis para soluções absolutamente novas.

O setor elétrico, indispensável para realização de muitas práticas sociais e econômicas, mantém grande parte da sua estrutura legada desde a sua concepção [4]. Isso implica na execução de métodos de caráter manual para realizar a manutenção

e a gestão dos sistemas elétricos legados em operação [3]. Dessa forma, profissionais especializados ainda são necessários em campo para atuar nestas atividades, o que dificulta o registro e o acesso de dados em tempo real ou, ocasionalmente, pode levar a falhas ou a acidentes de campo.

Assim, a implantação dos paradigmas digitais oportuniza o surgimento de novas técnicas para automatizar os sistemas elétricos e viabilizar a gestão e a eficiência energética. Nesse sentido, as soluções de IoT podem ser empregadas em estratégias de eficiência energética através da adição de recursos de tempo real para comunicação, processamento computacional distribuído, controle e sensoriamento em objetos comuns por meio da interconexão destes em uma redes de dados [5, 6]. Em modelos de *Smart Grids* e *Smart Buildings*, onde a automação dos sistemas elétricos é largamente aplicada, as soluções de IoT garantem a segurança, a eficiência, a qualidade do produto e a máxima excelência dos sistemas presentes em suas operações [7–10]. Contudo, apesar do uso do IoT na implementação de novas soluções para monitoramento e controle energético, a falta de estratégias para integrá-las com sistemas elétricos legados ainda é um problema.

A estratégia de *retrofit*, por outro lado, apresenta-se como uma solução para esta problemática. A partir dela, é possível atualizar e customizar sistemas antigos ou tecnologicamente ultrapassados, porém ainda necessários, a fim de preservá-los e de reduzir custos na adição de novas funcionalidades em sistemas legados [11]. Além disso, essa estratégia possibilita uma transição tecnológica gradual e não abrupta nos sistemas elétricos legados, utilizando ao máximo os recursos pré-existentes. Ainda assim, para que o *retrofit* seja utilizado de forma sistêmica na atualização e integração desses sistemas com soluções de IoT, é necessário utilizar um modelo de referência baseado em definições arquiteturais dotadas de camadas lógicas, protocolos e interfaces de interação padronizadas aplicadas às especificidades deste contexto particular. No entanto, a literatura apresenta poucos trabalhos que empreguem técnicas de *retrofit* a partir de modelos de referência para padronizar suas implementações, principalmente no setor elétrico.

Em [4], os autores propuseram um metamodelo de referência para *Smart Grids*, denominado de SmartLVGrid. Ele permite a transição de uma planta passiva legada de distribuição de energia em baixa tensão ao paradigma de *Smart Grids*,

utilizando a estratégia de *retrofit* em conjunto com conceitos de engenharia de sistemas. O SmartLVGrid é composto de pilhas de protocolos que permitem a integração de estruturas legadas com *middlewares* compatíveis (*hardware* e *firmware*). Além disso, esses protocolos especificam como realizar o link lógico (interoperabilidade) dos *middlewares* desenvolvidos com um centro de supervisão e controle para o sistema.

Ainda assim, o metamodelo SmartLVGrid não aborda sobre métodos ou recursos que preconizem a análise de dados para gestão energética em tempo real, incluindo a virtualização e a integração dos sistemas legados com soluções de IoT e com ferramentas computacionais, como *cloud computing* (nuvem), *dashboards* e banco de dados, por exemplo. A partir disso, propõe-se a elaboração de um novo método para gestão da demanda e da qualidade de energia em circuitos legados de baixa tensão, baseando-se na adaptação do metamodelo SmartLVGrid e no uso da estratégia de *retrofit*. Dessa forma, é possível oportunizar o máximo aproveitamento dos recursos pré-existentes e viabilizar a eficiência energética através do monitoramento de parâmetros elétricos com *dashboards* interativos em aplicações de *software* em nuvem. Nesse contexto, não encontrou-se na literatura estudos que realizassem investigações ou implementações práticas de estratégias, incluindo um modelo de referência e uso de *retrofit*, como o dos autores em [4], para realizar a gestão energética da maneira proposta.

Neste trabalho de pesquisa será desenvolvido um novo método para integração e virtualização de circuitos legados com soluções de IoT e com aplicações em nuvem para monitoramento da demanda energética, dos parâmetros elétricos e de qualidade de energia. Como prova de conceito, a metodologia proposta será utilizada para inserir recursos de IoT, *cloud computing* e monitoramento em circuitos prediais de um quadro de distribuição de energia. Para implementar o monitoramento remoto, serão desenvolvidas plataformas de *hardware* embarcado e, respectivamente, seu *firmware*, para implementar as camadas de *middleware* e interoperabilidade descritas no metamodelo SmartLVGrid, mas adaptadas para atender os circuitos do quadro de distribuição em uso. Ao longo deste trabalho, serão descritos os detalhes das aplicações em *software* e das plataformas desenvolvidas, a nível físico e arquitetural, com as informações necessárias para que seja possível utilizar a mesma

metodologia na implementação de outros sistemas e garantir a inserção de novas funcionalidades em infraestruturas legadas com a máxima preservação.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho objetiva apresentar o uso de técnicas de *retrofit* a partir da adaptação do metamodelo SmartLVGrid para desenvolver uma estratégia de monitoramento em tempo real de circuitos elétricos de baixa tensão, a fim de viabilizar a gestão energética de forma remota e em tempo real.

1.2 Objetivos Específicos

(1) Implementar um sistema de monitoramento energético através da adaptação do metamodelo SmartLVGrid e do uso da estratégia de *retrofit*, de forma sistêmica, para viabilizar a gestão energética em circuitos elétricos legados, preservando-as ao máximo;

(2) Desenvolver e implementar dispositivos de *hardware* e seus respectivos *firmwares* para viabilizar o *retrofit* dos circuitos de um quadro de distribuição, com base nas premissas do modelo de referência SmartLVGrid;

(3) Desenvolver uma aplicação em *software* para virtualização dos circuitos, com recursos de *dashboards*, banco de dados e *cloud computing*, integrados de forma sistêmica ao metamodelo SmartLVGrid adaptado neste trabalho;

(4) Apresentar recursos para monitoramento da demanda energética, dos parâmetros elétricos e de qualidade de energia de cada circuito legado do quadro de distribuição;

1.3 Organização da Dissertação

Este documento está organizado em 7 capítulos, incluindo este capítulo de introdução, conforme a descrição a seguir:

- No Capítulo 2, apresentamos o levantamento do estado arte relacionado ao tema deste trabalho. Inicialmente, foram expostos trabalhos da literatura correlacionados com aplicações de sistemas de monitoramento energético no contexto do paradigma de IoT. Nesse sentido, apresentou-se trabalhos associados ao uso de soluções de tempo real e de recursos computacionais para monitoramento energético, trabalhos relacionados com o gerenciamento da demanda e do consumo energético e trabalhos voltados ao contexto da qualidade de energia. Em seguida, aborda-se sobre trabalhos relacionados ao uso de técnicas de *retrofit* para automatizar sistemas legados. Após isso, apresentou-se os trabalhos que propuseram soluções de *middleware* e de interoperabilidade para sistematizar interfaces físicas e de comunicação com os sistemas legados. Por fim, aborda-se sobre a importância e o uso de metamodelos no contexto da atualização dos sistemas legados, enfatizando o metamodelo SmartLVGrid que foi base para concepção deste trabalho.

- No Capítulo 3, realizou-se o levantamento do referencial teórico base para implantação da proposta deste trabalho. Primeiramente, abordou-se sobre a análise dos parâmetros elétricos senoidais e não senoidais. Em seguida, apresentou-se os principais dispositivos de transdução e proteção utilizados na implementação do *hardware* proposto, bem como detalhou-se os procedimentos para aquisição e ajustes dos sinais elétricos monitorados. Alguns dos principais conceitos explorados no estudo de eficiência energética e de qualidade de energia foram abordados em seguida, respectivamente. Após isso, enfatizou-se as principais características do protocolo de comunicação utilizado para troca de mensagens do sistema de monitoramento, o protocolo MQTT. Por fim, este capítulo foi finalizado apresentando os principais conceitos e recursos disponibilizado para aplicações de sistemas operacionais de tempo real.

- No Capítulo 4, apresentou-se o modelo de sistema proposto baseado no *retrofit* dos circuitos legados de baixa tensão de um quadro de distribuição de energia. Além disso, foram expostas as principais contribuições do trabalho e as adaptações realizadas no metamodelo SmartLVGrid para viabilizar a implantação do sistema. Nesse sentido, apresentou-se as principais interfaces físicas com o sistema legado e as interfaces lógicas a serem realizadas pelos elementos de

medição dos parâmetros elétricos.

- No Capítulo 5, apresentou-se os materiais e métodos empregados na implementação do sistema proposto, compatibilizando-os com a arquitetura do sistema exposta no capítulo anterior.

- No Capítulo 6, expuseram-se os resultados obtidos a partir do sistema proposto. Inicialmente, realizou-se a validação da adaptação do metamodelo SmartLVGrid com a verificação das primitivas operacionais estabelecidas e executadas pelos módulos de *retrofit*. Em seguida, com os dados de monitoramento obtidos, realizou-se uma análise de eficiência energética e de qualidade de energia. Por fim, discutiu-se os resultados obtidos, comparando-os com outros trabalhos da literatura e relacionando-os com os objetivos do trabalho.

- No Capítulo 7, apresentou-se as conclusões do trabalho, juntamente com propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Trabalhos relacionados

2.1.1 Aplicações de sistemas de monitoramento energético no contexto do paradigma de IoT

O monitoramento energético propicia eficiência e uma melhor gestão no setor elétrico, pois viabiliza a analise dos parâmetros elétricos da rede, da demanda consumida e da qualidade de energia. A partir disso, os gestores passam a ter recursos computacionais e dados importantes para realizar suas tomadas de decisões. Nesse contexto, as soluções de IoT contribuem para implantar esses recursos de forma remota e em tempo real nos setores residenciais, prediais, industriais e metropolitanos [12, 13]. Mais do que isso, o IoT possibilita a interconexão de dispositivos dedicados ao monitoramento energético e a integração desses elementos com qualquer sistema computacional, incluindo soluções em nuvem.

As aplicações em tempo real possibilitam a atuação e o monitoramento em tempo determinístico, sem conflitos e de forma prioritária para que todos os eventos e tarefas sejam executados da forma esperada. Nesse sentido, a literatura apresenta trabalhos que descrevem soluções de IoT de tempo real para implementação de sistemas de monitoramento energético. Em [14], o monitoramento energético de tempo real foi implementado através de dispositivos de *hardware* interconectados em uma rede móvel baseada em *Narrowband* IoT (NB-IoT) para aplicações de *Smart Grids*. De forma análoga, os autores de [15] e de [16] desenvolveram dispositivos de *hardware*

para disponibilizar, em tempo real, os dados de consumo energético aos usuários a partir de uma rede de dados sem fio. Os autores de [17] utilizaram a plataforma Raspberry Pi 3 como interface entre um medidor energético e uma aplicação gráfica para exibir os dados obtidos em tempo real. Em [18], os autores expuseram um estudo de avaliação da performance de diferentes soluções de IoT de tempo real. Por outro lado, os autores de [19] apresentaram uma solução descentralizada para monitoramento energético em tempo real a partir de dispositivos móveis.

Além dos recursos de comunicação e monitoramento em tempo real, o IoT necessita de recursos computacionais para armazenamento, processamento e visualização de dados. A partir deles, é possível elaborar bases de dados para analisar e expor os principais parâmetros de valor para tomadas de decisões. Nesse sentido, a literatura também expõe trabalhos que usufruem desses recursos em aplicações de monitoramento energético. Em [20], os autores utilizaram recursos de banco de dados em linguagem SQL, juntamente com as interfaces gráficas do aplicativo desenvolvido, para armazenar e exibir os principais parâmetros elétricos e a demanda consumida de um circuito predial. Os autores de [21] ilustraram o consumo energético e os parâmetros de temperatura de um sistema de climatização a partir de *dashboards* interativos. Em [22], os autores discutem soluções para utilização de dispositivos IoT para monitoramento energético a partir de métodos de visualização e armazenamento de dados e processamento em nuvem.

É importante frisar as contribuições da literatura baseadas no uso do IoT para com a eficiência energética. As soluções propostas nessa área normalmente envolvem o gerenciamento da demanda energética e a análise da qualidade de energia em determinadas instalações.

O gerenciamento da demanda energética parte de estratégias e tomadas de decisão para redução do consumo de energia a partir dos dados obtidos. Os autores do trabalho [23] apresentaram o levantamento da demanda energética consumida da Escola de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Politécnica de Madrid durante 1 ano. A partir disso, eles utilizaram uma rede de dados sem fio com dispositivos de mercado para controlar a demanda energética nesta escola com base nos dados monitorados. Por outro lado, os autores de [24] realizaram o gerenciamento da demanda energética de residências em uma modelagem no *software* Simulink, con-

siderando a inserção de fontes renováveis e dispositivos interconectados no cenário proposto. Ainda, o trabalho [25] descreve um sistema de gerenciamento de energia utilizando plataformas IoT de tempo real a fim de melhorar a eficiência energética.

As técnicas de monitoramento baseadas em IoT também podem ser empregadas para avaliar a qualidade do produto no fornecimento de energia elétrica. Nisso consistem muitos dos trabalhos que mitigam a qualidade de energia em âmbito metropolitano, industrial, predial ou residencial. Nos trabalhos [26–29], por exemplo, os autores desenvolveram dispositivos de *hardware* para monitorar remotamente eventos de afundamentos de tensão (*Sags*), sobretensões (*Swells*) ou mesmo os parâmetros elétricos do circuitos utilizados. Em [30], os autores propõem um algoritmo para análise de distúrbios e eventos no contexto da qualidade de energia. Para isso, eles empregaram dispositivos IoT de tempo real no monitoramento dos parâmetros e armazenaram os dados obtidos em nuvem para posterior utilização do algoritmo.

As Tabelas 1, 2, 3 e 4 expõem uma síntese dos trabalhos citados nesta subseção, que estão associados ao contexto alvo deste trabalho. Contudo, não foram encontradas abordagens que descrevam estratégias de *retrofit* para aproveitamento dos sistemas legados encontrados nos trabalhos citados. Assim, as soluções expostas voltam-se para o contexto particular de suas aplicações, o que pode inviabilizar a implantação das estratégias propostas em outros casos. Além disso, não foram encontrados trabalhos que descrevam metamodelos capazes de prover a inserção de recursos de automação, controle eletrônico, processamento distribuído e comunicação em sistemas elétricos a partir de técnicas de retrofit.

Tabela 1: Trabalhos com ênfase em eficiência energética.

Trabalho	**Ano**	**Aplicação**
[23]	2021	Controle de demanda a partir de WSN
[24]	2018	Gerenciamento da demanda com fontes renováveis
[25]	2019	Gerenciamento da demanda com soluções de IoT

Tabela 2: Trabalhos de sistemas de tempo real para monitoramento energético.

Trabalho	**Ano**	**Aplicação**
[14]	2020	Monitoramento da demanda energética em tempo real em uma rede NB-IoT
[15], [16], [17]	2018,2020 2020	Desenvolvimento de dispositivos para monitoramento do consumo em tempo real
[18]	2020	Avaliação de soluções de tempo real para monitoramento energético
[19]	2020	Solução descentralizada de monitoramento energético em dispositivos móveis

Tabela 3: Trabalhos com ênfase em recursos computacionais para gestão energética.

Trabalho	**Ano**	**Aplicação**
[20]	2019	Uso de banco de dados e interfaces para exibir parâmetros elétricos e a demanda de um circuito
[21]	2018	*Dashboards* interativos para exibição do consumo energético
[22]	2021	Métodos de visualização e armazenamento de dados e processamento de dados energéticos em nuvem

Tabela 4: Trabalhos com ênfase na análise da qualidade do produto.

Trabalho	**Ano**	**Aplicação**
[26], [27], [28], [29]	2019,2018 2019,2021	Dispositivos para monitoramento de *sags*, *swells* e parâmetros elétricos
[30]	2020	Algoritmo para análise de distúrbios e eventos de qualidade de energia com dispositivos IoT

2.1.2 *Retrofit*

A estratégia de retrofit consiste no uso de técnicas e recursos para atualização de sistemas antigos ou tecnologicamente ultrapassados, porém ainda necessários [11]. Normalmente, técnicas de retrofit são aplicadas em estruturas prediais e em dispositivos legados para preservá-los e atualizá-los, inserindo novos recursos. No entanto, a utilização destas técnicas requer conhecimentos prévios específicos dos elementos e infraestruturas pré-existentes, afim de que possam ser realizadas as devidas interfaces para possibilitar a implantação das funcionalidades desejadas sem causar danos ou acidentes.

A integração de sistemas legados com ecossistemas digitais utilizando técnicas de *retrofit* e IoT é um tema bem citado na literatura. Em [31], os autores propõem estratégias para uso do *retrofit* na redução do consumo energético e na melhoria do conforto de instalações prediais antigas. Os autores de [32] implementaram uma rede de sensores sem fio, do inglês *Wireless Sensors Network* (WSN), para controle e monitoramento de condicionadores de ar legados a partir de dispositivos de *retrofit*. Em [33], os autores expuseram soluções para automação de infraestruturas legadas utilizando estratégias de *retrofit*. Ainda, os autores de [34] propuseram um modelo baseado no método de *Building Energy Management System* (BEMS) e nas especificações do *Word Wide Web Consortium* (W3C) para realizar o monitoramento e controle do consumo de energia a partir de uma rede de sensores sem fio, no contexto de *Smart Buildings*, a partir de uma estratégia retrofit.

A Tabela 5 expõe os trabalhos de *retrofit* abordados acima. Estes trabalhos apresentaram resultados satisfatórios quanto a atualização tecnológica dos sistemas pré-existentes utilizando estratégias de retrofit. Contudo, os métodos propostos atendem um número preestabelecido de casos e sistemas, dificultando a escalabilidade, o processamento distribuído ou até mesmo a interoperabilidade com outras aplicações. Além disso, os autores não empregaram modelos arquiteturais genéricos para padronizar as estratégias apresentadas na utilização de maiores quantidades de dispositivos, de mesma natureza ou não.

Tabela 5: Trabalhos com contribuições de técnicas de *retrofit*.

Trabalho	**Ano**	**Aplicação**
[31]	2015	Uso do *retrofit* para redução do consumo energético e melhoria do conforto de prédios antigos
[32]	2017	Uso do *retrofit* para viabilizar o controle e monitoramento de condicionadores de ar
[33]	2018	Estratégias de *retrofit* para automatizar infraestruturas legadas
[34]	2021	Estratégia de *retrofit* para monitoramento e controle do consumo de energia a partir de um modelo baseado no método de BEMS e nas especificações do W3C

2.1.3 *Middleware* e interoperabilidade

As soluções de *middleware* realizam interfaces entre sistemas heterogêneos, a nível físico ou lógico. Este tipo de interface é considerada um dos maiores desafios no âmbito do IoT, seja no desenvolvimento de *software* ou *hardware* [35, 36]. Por outro lado, existem situações onde é necessário realizar, além da interface, a interação entre diferentes sistemas. Nesses casos, o uso de métodos de interoperabilidade se faz necessário, principalmente em aplicações de IoT que necessitam interagir independente do protocolo de comunicação utilizado [37,38]. Assim, o uso de soluções de *middleware* e interoperabilidade auxiliam na escalabilidade de aplicações IoT, na interface e interação com sistemas legados, reduzindo a complexidade de integração de novas tecnologias com soluções existentes.

A literatura também apresenta trabalhos que viabilizam processos de convergência tecnológica através de soluções de *middleware* de interoperabilidade. Os autores de [39] propuseram um método para realizar a interoperabilidade de sistemas industriais legados no contexto da indústria 4.0 através de alterações mínimas nos meios de comunicação existentes. Em [40], os autores propuseram um modelo de arquitetura para possibilitar a interoperabilidade e a interconexão dos dispositivos situados no campus da universidade de Málaga, como prova de conceito para futuras

aplicações do modelo em implantações de *Smart Cities*. O trabalho [41] apresenta uma solução de *middleware* que viabiliza a interface de dispositivos situados em *intelligent office environments*. Em [42], os autores implantaram um modelo de *Smart Grids* a partir de uma arquitetura de *middleware* baseada no *retrofit* de medidores legados para monitoramento de parâmetros elétricos em WSNs. Os mesmos autores, em [43], contribuíram uma metodologia para possibilitar a interoperabilidade de medidores legados em *Smart Grids* a partir de WSNs.

A Tabela 6 apresenta as principais características dos trabalhos supracitados. Esses trabalhos contribuem com soluções para padronização dos processos de convergência tecnológica propostos para os sistemas utilizados. Contudo, eles não abordam a interação entre soluções de *middleware* e interoperabilidade, envolvendo interfaces físicas e lógicas dos sistemas pré-existentes. Ainda, não foram expostas metodologias que descrevam interfaces genéricas para as soluções propostas com outros sistemas além dos expostos nos respectivos trabalhos. Dessa forma, mesmo que ocorra a padronização de metodologias para inserção de *middlewares* ou para garantir a interoperabilidade entre novas tecnologias, um modelo genérico para outros casos e sistemas deveria ser adotado. Assim, seria possível virtualizar qualquer elemento legado, a nível físico e lógico, a partir de uma estratégia de *retrofit*.

Tabela 6: Trabalhos com ênfase em soluções de *middleware* e de interoperabilidade.

Trabalho	**Ano**	**Aplicação**
[39]	2017	Método para interoperabilidade de sistemas industriais legados no contexto da indústria 4.0
[40]	2019	Modelo para interoperabilidade de dispositivos em um campus universitário
[41]	2010	*Middleware* para interface de dispositivos situados em *intelligent office environments*
[42]	2018	Modelo baseado em uma arquitetura de *middleware* para *retrofit* de medidores legados em WSNs
[43]	2018	Metodologia para possibilitar a interoperabilidade de medidores legados a partir de WSNs

2.1.4 Metamodelos

Assim como os modelos são abstrações de alguma realidade, os metamodelos são abstrações de modelos para projetar novas linguagens de modelagem ou estender as linguagens de modelagem existentes [44]. Eles são empregados na análise, elaboração e desenvolvimento de modelos de integração de qualquer sistema. Isso inclui a integração de sistemas legados com interfaces de *middleware* e de interoperabilidade [1,45]. Logo, eles viabilizam a transição tecnológica de sistemas pré-existentes.

Nesse contexto, a literatura expõe trabalhos que apresentaram casos de sucesso utilizando esta abordagem para metamodelos. Em [46], os autores propuseram um metamodelo IoT com a premissa de conectar objetos heterogêneos em um alto nível de interoperabilidade. Os autores de [47] também implementaram um metamodelo IoT capaz de transformar uma solução de *software* escrita em uma linguagem de modelagem específica para uma aplicação em Java no intuito de padronizar o desenvolvimento de forma orientada. Em [48], um metamodelo foi proposto para interação de dispositivos em ambientes inteligentes a partir de uma modelagem de relações e atributos. Em [3], os autores introduziram um meta-sistema para viabilizar a transição de sistemas legados de distribuição de energia elétrica ao paradigma de *Smart Grids* através da estratégia de *retrofit*. A Tabela 7 apresenta as principais características dos trabalhos supracitados.

Tabela 7: Trabalhos com contribuições baseadas em metamodelos.

Trabalho	**Ano**	**Aplicação**
[46]	2018	Metamodelo para interoperabilidade de dispositivos heterogêneos
[47]	2017	Metamodelo para transformação de soluções de *software* de forma orientada
[48]	2016	Metamodelo para interação de dispositivos em ambientes inteligentes
[3]	2017	Meta-sistema baseado em *retrofit* para transição de sistemas legados de distribuição de energia ao paradigma de *Smart Grids*

Mais a frente, o meta-sistema de [3] evoluiu para o metamodelo SmartLV-Grid, que se apresenta com primitivas e protocolos para utilização de soluções de *middlewares* e interoperabilidade através do *retrofit* de sistemas elétricos legados de baixa tensão [4]. Visto que este metamodelo descreve interfaces genéricas a serem utilizadas para atualização de sistemas pré-existentes, é possível estender as aplicações e recursos disponibilizados por ele a qualquer nicho tecnológico, inclusive no próprio setor elétrico. Não encontrou-se outras abordagens como esta na literatura. Portanto, o metamodelo SmartLVGrid será utilizado como base para realizar o *retrofit* de circuitos elétricos para viabilizar o monitoramento remoto dos parâmetros elétricos.

Capítulo 3

Fundamentação teórica

3.1 Parâmetros elétricos

Os parâmetros de um sistema elétrico fornecem informações necessárias para investigar a demanda e a qualidade de energia em um circuito específico ou em uma unidade consumidora. Estes parâmetros podem ser analisados a partir da natureza senoidal dos sinais envolvidos, que podem ser descritos a partir das formulações matemáticas apresentadas ao decorrer desta seção.

3.1.1 Análise dos parâmetros elétricos com características senoidais

A potência elétrica, também conhecida como demanda energética, pode ser obtida através da expressão apresentada na Equação 1. Este parâmetro pode ser definido a partir da variação de energia elétrica no tempo, normalmente representado em Joules por segundo , $\frac{J}{s}$, ou Watts, W.

$$p = \frac{dw}{dt} \tag{1}$$

A partir disso, a energia elétrica consumida pode ser expressa de acordo com o intervalo de tempo em análise. Que neste caso, é apresentado em um intervalo de integração de t_0 a t na Equação 2, que denota a expressão para energia a partir da Equação 1. Ressalta-se que a energia elétrica, neste caso, será expressa por Watts por segundo, Ws.

$$w = \int_{t_0}^{t} p dt \tag{2}$$

A potência elétrica também pode ser computada pelo produto da tensão e da corrente elétrica. Quando obtido em um determinado instante de tempo, este parâmetro é denominado de potência instantânea e pode ser representada através da Equação 3.

$$p(t) = v(t) \times i(t) \tag{3}$$

Onde a tensão e corrente elétrica são definidas pelas Equações 4 e 5, respectivamente.

$$v(t) = \sqrt{2} V sen(\omega t) \tag{4}$$

$$i(t) = \sqrt{2} I sen(\omega t - \theta) \tag{5}$$

Onde ω é a velocidade angular e θ é a defasagem entre a corrente e a tensão elétrica. Ao considerar características puramente senoidais de tensão e corrente, a perspectiva fasorial possibilita uma análise alternativa para potência elétrica por meio da potência útil (P), da potência reativa (Q) e da potência aparente (S). A potência útil, também conhecida como potência ativa, representa a energia elétrica aproveitada na forma de calor [49]. Dessa forma, a energia elétrica útil gera trabalho e pode ser transformada em outros tipos de energia, como energia mecânica, química, entre outras. A potência útil pode ser expressa pela potência média dissipada pela pela carga e é expressa em Watts.

De forma dual, a potência reativa representa a energia associada a geração do campo magnético ou do campo elétrico em cargas indutivas ou capacitivas, respectivamente. Assim sendo, esta energia não produz trabalho. Contudo, é de suma importância para o funcionamento de máquinas motrizes, cargas reativas e serviços ancilares [50]. A potência reativa pode ser classificada como indutiva (Q_L) ou capacitiva (Q_c), dependendo da característica reativa predominante da carga em análise, ambas expressas em Volt-Ampére reativo (VAr). Contudo, para cargas com ambas

as características, a potência reativa equivalente é expressa conforme descrito na Equação 6.

$$Q = Q_L - Q_C \tag{6}$$

Por fim, a potência aparente (S), também chamada de potência total, é descrita como a soma fasorial das potências ativas e reativas de determinada carga, expressa em Volt-Ampere (VA). A Equação 7 descreve o cálculo da potência aparente em termos das outras potências supracitadas.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{7}$$

3.1.2 Parâmetros elétricos de características não senoidais

Com características não senoidais, os parâmetros elétricos devem ser analisados por outra perspectiva. Eles passam a possuir componentes senoidais conhecidas como harmônicas que devem ser computadas juntamente com a componente senoidal fundamental. Dessa forma, os valores eficazes de tensão e corrente elétrica passam a serem computados através de seus valores médios, conforme apresentado nas Equações 8 e 9, respectivamente [51].

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} (v_f + v_h)^2 dt \tag{8}$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} (i_f + i_h)^2 dt \tag{9}$$

Onde v_f e i_f representam as componentes fundamentais, v_h e i_h representam os termos das harmônicas remanescentes e o intervalo $[\tau, \tau + kT]$ é dado como intervalo de aferição. O tempo de início de uma coleta é representado por τ. Assumindo que k é um número inteiro positivo e que T é o período da componente fundamental do parâmetro em análise, o produto kT representa o tempo de aferição do parâmetro em análise. Dessa forma, a potência aparente será representada pela Equação 10.

$$S = VI \tag{10}$$

Neste tipo de análise não senoidal, a potência útil também pode ser obtida através de seu valor médio ou da soma de suas componentes associadas às características harmônicas e fundamental. Para isso, a notação da potência útil é descrita pela Equação 11.

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt = P_f + P_h \tag{11}$$

Onde P_f é a potência ativa da componente fundamental e P_h é a potência ativa referente as componentes harmônicas. De forma análoga a Equação 18, o fator de potência pode ser calculado pela razão da potência útil pela potência aparente.

É importante enfatizar que maior parte dos sistemas presentes no setor elétrico são desbalanceados, mesmo que por pouca diferença. Portanto, é importante considerar essa análise na aferição dos parâmetros supracitados nas outras subseções. Considerando as fases a, b e c de um dado circuito, é possível analisar a potência útil trifásica, a potência reativa trifásica, a potência aparente trifásica e o fator de potência trifásico a partir das Equações 12, 13, 14 e 15, respectivamente.

$$P_{3\phi} = P_a + P_b + P_c \tag{12}$$

$$Q_{3\phi} = Q_a + Q_b + Q_c \tag{13}$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2} \tag{14}$$

$$FP_{3\phi} = \frac{P_{3\phi}}{S_{3\phi}} \tag{15}$$

Percebe-se então a influência das componentes harmônicas no consumo de energia elétrica, uma vez que estas impactam diretamente na demanda consumida. Por isso, é necessário que os dispositivos de medição possam aferir este parâmetro em condições não senoidais. Por este motivo, esta análise será empregada na implementação deste trabalho. Contudo, é necessário considerar o desbalanceamento do sistema elétrico a ser monitorado. Neste caso, uma análise trifásica não senoidal para sistemas elétricos desbalanceados é necessária.

3.2 Medição de parâmetros elétricos

Um dos principais dispositivos empregados no setor elétrico, seja para fins de eficiência ou controle energético, são os dispositivos de medição de parâmetros elétricos. Inicialmente, estes equipamentos eram empregados para aquisição dos parâmetros de energia em unidades consumidoras e possuíam características predominantemente analógicas [52, 53]. Com o passar dos anos e com o advento de novas tecnologias para processamento digital de sinais, os sistemas de medição estão cada vez mais compactos e incorporando mais funcionalidades, o que possibilita o aprofundamento no estudo de sistemas energéticos. Nesta seção, serão explorados alguns dos conceitos e recursos que precedem a implementação destes dispositivos .

3.2.1 Transdutores para aquisição de parâmetros elétricos

Os dispositivos de transdução de sinais são utilizados na conversão de parâmetros de qualquer natureza em sinais elétricos. Dessa forma, os sinais obtidos podem ser amostrados e quantizados para que possam ser analisados a partir de uma unidade de processamento. Na medição de parâmetros elétricos de energia, os elementos de transdução são empregados para aferição de tensão e corrente e são de suma importância para análises de demanda e de qualidade de energia [54].

3.2.1.1 Transdução da tensão elétrica

Para monitorar a tensão elétrica através de um dispositivo de medição eletrônico, é necessário que o transdutor escolhido consiga ajustar os parâmetros do sinal em análise para que possa ser utilizado em uma unidade de processamento. Para isso, deve-se considerar previamente os níveis de amplitude, relação sinal ruído, frequência, largura de banda, entre outros parâmetros do transdutor escolhido. Para tensão elétrica, usualmente empregam-se soluções baseadas em circuitos divisores de tensão resistivos ou capacitivos e em transformadores de potencial indutivos. Neste trabalho, o transdutor utilizado será o resistor, empregado a partir de um divisor resistivo. Em comparação com outros transdutores, o resistor possui o menor custo, alta largura de banda, boa linearidade e boa precisão, adequando-se melhor em estudos de qualidade de energia [55–57]. A Figura 1 apresenta um divisor resistivo

utilizado para redução de níveis de tensão.

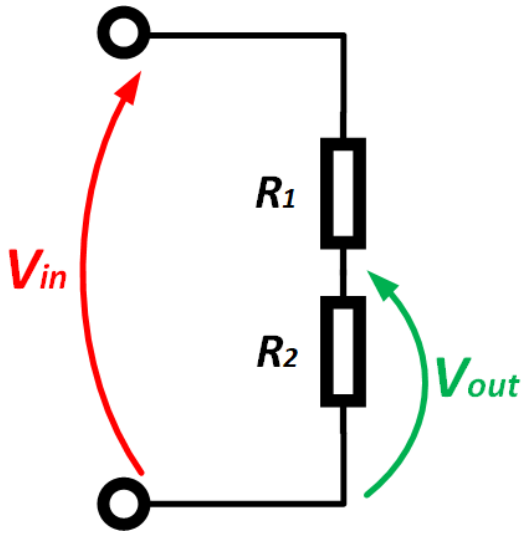


Figura 1: Representação de um divisor resistivo.

De forma geral, a função de transferência referente a tensão de saída de um circuito divisor de tensão por divisor resistivo é apresentado pela Equação 16.

$$V_{out} = V_{R_2} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{16}$$

No contexto de medição de parâmetros elétricos, V_{in} é a tensão da rede elétrica e V_{out} é a saída do divisor de tensão, representando o sinal condicionado para ser utilizado por uma unidade de processamento. É válido ressaltar que os limites de precisão e potência de resistores para medição de tensão variam de acordo com a aplicação e com o cenário aos quais serão submetidos.

3.2.1.2 Transdução da corrente elétrica

A transdução da corrente elétrica para com os sistemas de medição de energia parte do mesmo princípio da transdução da tensão elétrica. Os sensores de efeito *hall*, transformadores de corrente e *shunts* são os transdutores mais utilizados para aferição da corrente elétrica. Neste trabalho, o transdutor utilizado foi o transformador de corrente, por sua praticidade de instalação na implementação da técnica de *retrofit* a ser apresentada a posteriori. Através do acoplamento magnético do transformador de corrente, a corrente medida presente no enrolamento primário deste dispositivo é transformada em uma corrente menor no secundário de forma

proporcional [58]. A Equação 17 descreve esta relação de proporcionalidade, que associa as correntes e enrolamentos de primário e secundário.

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} \tag{17}$$

Onde I_P e I_S são as correntes e N_P e N_S os enrolamentos de primário e secundário, respectivamente. O primário, na abordagem deste trabalho, é utilizado para medir a corrente do circuito. O secundário, por sua vez, é utilizado como o sinal condicionado para aferição da corrente no sistema de medição. Esses transdutores também possuem isolação galvânica, garantida por seu acoplamento magnético [59]. Isso permite mensurar correntes elevadas com maior proteção para operadores de campo e sistemas de medição eletrônicos. Na Figura 2 é possível observar o uso de um transformador de corrente em operação. Ressalta-se que juntamente com o secundário do transformador de corrente, podem existir outros circuitos de condicionamento para ajustar o sinal de corrente obtido aos instrumentos de medição, como o próprio divisor resistivo.

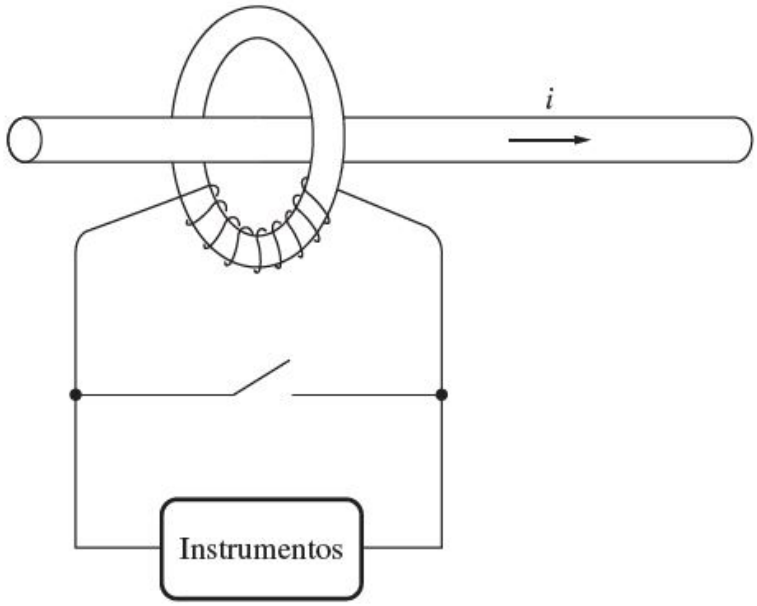


Figura 2: Transformador de corrente em operação [58].

3.2.2 Proteções contra surtos na medição de parâmetros elétricos

Os surtos atmosféricos podem provocar sobretensões e sobrecorrentes no sistema elétrico [60]. Com isso, existe a necessidade de utilizar dispositivos de proteção capazes de garantir a integridade dos sistemas de medição de parâmetros elétricos quando conectados aos circuitos. Neste trabalho, os dispositivos de proteção contra surtos integrados ao *hardware* dos dispositivos de medição desenvolvidos foram o diodo Zener, o termistor de coeficiente de temperatura positivo, do inglês *Positive Temperature Coefficient* (PTC), e o GDT, do inglês *Gas Discharge Tube*.

3.2.2.1 Diodo Zener

Uma vez atingida a corrente de saturação reversa deste dispositivo, a tensão reversa em seus terminais passa a possuir um valor constante, a ser determinado pela especificação deste componente. Esta tensão é denominada de tensão Zener [61]. Este dispositivo foi utilizado para que, em casos de sobretensão ou sobrecorrente, os sinais obtidos dos transdutores se mantivessem constantes para, assim, evitar danos ao circuito do *hardware* desenvolvido.

3.2.2.2 Termistor PTC

O termistor ou fusível reajustável PTC é um dispositivo polimérico de coeficiente de temperatura positivo. Ele é um componente eletrônico passivo utilizado para proteção contra falhas de sobrecorrente em circuitos elétricos [62]. Quando opera em baixas temperaturas, ele permite a passagem de corrente elétrica com resistência mínima entre seus terminais. À medida em que esquenta com o aumento de corrente, a resistência em seus terminais aumenta, dificultando a passagem de corrente. Este dispositivo será utilizado para proteção do divisor de tensão resistivo utilizado para condicionamento do sinal de tensão.

3.2.2.3 GDT

O GDT é empregado na proteção contra descargas atmosféricas e outras oscilações de energia. Ele consiste de um pré-arranjo de eletrodos em um gás dentro de

uma cobertura isolante, normalmente de material cerâmico. Assim, esse dispositivo atua na dissipação de transientes de tensão, evitando avarias no sistema em que é utilizado [63]. Além do diodo Zener e do termistor PTC, o GDT também será utilizado no para proteção dos canais de tensão dos dispositivos de medição.

3.2.2.4 Isolador digital

Além das proteções analógicas apresentadas anteriormente, o sistema de medição de parâmetros elétricos proposto neste trabalho também contém interfaces digitais que requerem proteção. Para isso, é possível contar com os isoladores digitais. Esse componente atua na transferência de sinais enquanto isola eletricamente os domínios de baixa e alta tensão [64]. Dessa forma, com o uso deste dispositivo, é possível proteger os circuitos digitais do sistema com relação ao circuito de condicionamento de entrada da rede elétrica.

3.2.3 Aquisição e calibração dos parâmetros elétricos nos sistemas de medição

Após o uso dos transdutores e de elementos para condicionamento dos sinais medidos, a aquisição dos parâmetros elétricos depende da conversão e do processamento dos sinais tensão e corrente elétrica por meio de conversores analógicos-digitais (ADCs) [65]. Esses conversores possibilitam realizar a quantização e amostragem de sinais analógicos para então processá-los digitalmente. A saída digital deste dispositivos depende de sua resolução, ou seja, o número de bits que representará o sinal analógico quantizado. A Figura 3 ilustra um sinal analógico amostrado ao longo do tempo por um ADC.

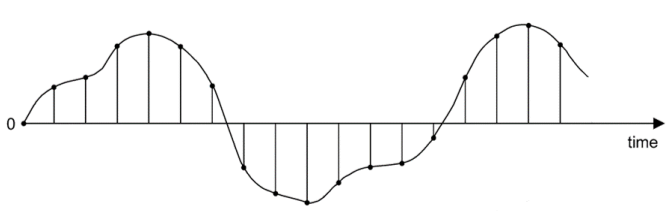


Figura 3: Amostragem de um sinal analógico [65].

Contudo, ainda podem haver imperfeições nos sinais adquiridos por parte

destes conversores, como erros de ganho ou deslocamento (*offset*). A Figura 4 ilustra erros de ganho (a) e *offset* (b) positivos em um ADC com resolução de 3 bits.

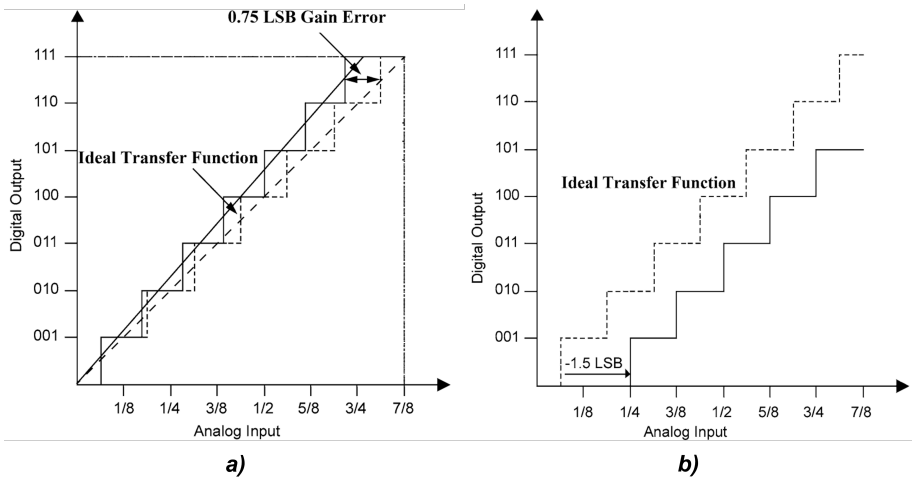


Figura 4: Erros de ganho (a) e *offset* (b) positivos obtidos de um ADC [65].

Assim, é necessário calibrar o ADC realizando ajustes no condicionamento de entrada do circuito ou no *firmware* utilizado, a fim de se obter maior precisão nos resultados desejados. Para isso, é necessário garantir que o sinal obtido do transdutor está ajustado para não exceder os valores máximos e mínimos suportados pelo ADC, possibilitando quantizar a maior parte do sinal. Este procedimento é comumente conhecido como ajuste do fundo de escala do conversor [66]. É importante ressaltar que as alterações de temperatura ou possíveis variações nos seus processos de fabricação podem levar os transdutores a atuar de forma imprecisa. Quando a calibração envolve ajustes de *firmware*, necessita-se conhecer valores de referência que possam ser utilizados como base para ajustar os sinais medidos a sua representação ideal, conforme mostrado na Figura 4. Neste trabalho, para calibração de ganho e *offset* dos sinais de tensão e corrente elétrica em *firmware*, utilizou-se uma fonte de precisão capaz de indicar o real valor medido para ajustar os parâmetros desejados de forma digital.

3.3 Eficiência energética

A eficiência energética é definida como a racionalização de energia por meio de medidas ou ações comportamentais, econômicas e tecnológicas sobre sistemas e processos [67]. Como resultado, espera-se a curto, médio e longo prazo, a redução do

consumo energético sem prejuízo da quantidade ou da qualidade dos bens e serviços. Uma das formas de se obter eficiência energética consiste em conhecer a demanda útil e reativa e o fator de potência de determinado sistema, pois, a partir disso, é possível planejar reduções no consumo energético ao longo do tempo. Neste trabalho, almeja-se alcançar a eficiência energética por meio de ações tecnológicas que resultarão no monitoramento remoto em tempo real de circuitos elétricos. Com isso, será possível fornecer informações que promovam o gerenciamento das grandezas elétricas. Para esclarecer a importância deste tema, base para concepção deste trabalho, serão apresentados ao alguns dos principais tópicos relacionados à eficiência energética e o gerenciamento da demanda no contexto deste trabalho.

3.3.1 O consumo e a demanda energética

O consumo energético de uma unidade consumidora ou de um determinado circuito é caracterizado pelo acúmulo de energia útil ou reativa ao longo do tempo. Por outro lado, a demanda energética é dada como a média das potências solicitadas pelas cargas de uma unidade consumidora. No Brasil, esta média é realizada no período de 15 minutos [68].

Tanto o consumo quanto a demanda energética podem ser utilizados como parâmetros de tarifação da energia elétrica, a depender do grupo das unidades consumidoras: grupo A ou grupo B [69]. No grupo A, as unidades consumidoras são alimentadas com tensões iguais ou superiores à 2,3 kV e podem ser tarifadas pelo consumo e pela demanda energética contratada (kW). Nesses casos, a concessionária é contratada para oferecer uma demanda de potência ativa fixa no ponto de entrega da unidade consumidora [70]. Quando ultrapassada, os responsáveis pela unidade consumidora deverão arcar com o custos desta transgressão. Indústrias e estabelecimentos comerciais de médio ou grande porte normalmente se enquadram no grupo A. No grupo B, as unidades consumidoras são atendidas com tensões inferiores a 2,3 kV e são tarifadas apenas pelo consumo energético acumulado (kWh). Residências, apartamentos, estabelecimentos de pequeno porte e instalações em áreas rurais usualmente se enquadram neste grupo.

Desse modo, o monitoramento da demanda e do consumo de energia de uma unidade consumidora ou de cargas específicas são de suma importância para se

obter uma maior economia de energia. Quando realizada em tempo real, os gestores podem antever e agir em situações de ultrapassagem de demanda, reduzindo, assim, as tarifas de transgressão por ultrapassagem. Da mesma forma, com as informações do consumo energético de cargas específicas em uma unidade consumidora, é possível planejar o uso dessas cargas de forma a reduzir as tarifações de consumo energético, promovendo economia e sustentabilidade.

3.3.2 Fator de Potência

Um modo de analisar a eficiência do uso de energia elétrica pode ser realizado através da verificação do fator de potência, que consiste na razão da potência útil pela potência aparente de um determinado período de tempo. Ou seja, a porcentagem do quanto se aproveita a energia útil em relação a energia total [68]. Quanto mais próximo de 1, mais eficiente se torna o sistema pois a maior parte da energia consumida está sendo convertida em trabalho [71]. Alternativamente, este parâmetro pode ser obtido através do cosseno do ângulo de defasagem entre a potência útil e a potência aparente , também representado pela letra grega θ. Quando obtém-se um fator de potência unitário, a carga apresenta um comportamento resistivo pois toda energia recebida é dissipada e gera trabalho. Por outro lado, um fator de potência positivo mas não unitário indica uma carga com comportamento indutivo. Ainda, se este parâmetro resultar em um valor negativo, presumi-se uma carga com comportamento capacitivo. A Equação 18 expressa a obtenção deste parâmetro.

$$FP = cos(\theta) = \frac{P}{S} \tag{18}$$

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece um fator de potência de referência mínimo de 0,92 [69]. Com base nesse valor, os gestores podem utilizar recursos de controle, como bancos de capacitores, para evitar o consumo de reativo em excesso em determinados circuitos. Do contrário, o consumo de reativo além do permitido é cobrado aos consumidores. Nesse caso, o monitoramento o do fator de potência torna-se uma necessidade desses consumidores para conhecer e evitar o consumo de energia reativa em excesso.

3.3.3 Auditoria energética

Conforme mencionado anteriormente, o setor elétrico mantém grande parte de sua infraestrutura legada desde a sua concepção [4]. Dessa forma, pode-se inferir que o sistema elétrico não é observável em grande parte de sua infraestrutura, tornando a gestão energética de difícil execução. Contudo, os sistemas de monitoramento estão contribuindo para tornar o sistema elétrico observável, expondo dados de demanda para que os gestores realizem tomadas de decisão para um melhor aproveitamento energético.

Nisso consiste a auditoria energética, que visa determinar quem, quanto e como se está consumindo energia e fundamentar a implantação de métodos para racionalizar o uso de insumos energéticos [68]. Por meio disso, é possível discriminar as perdas e as principais cargas consumidoras de uma instalação para buscar alternativas para redução do consumo, promovendo a sustentabilidade e economia. A Figura 5 ilustra os procedimentos a se tomar para implantar uma auditoria energética, constituídos da identificação, quantificação, modificação e acompanhamento das perdas e gastos energéticos.

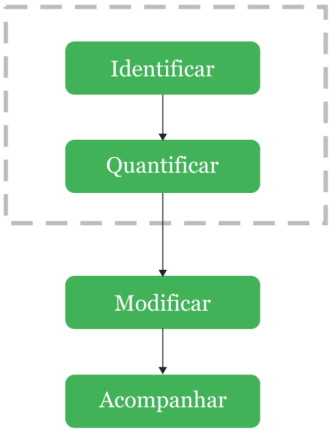


Figura 5: Metodologia para aplicação de um modelo de auditoria energética [68].

Conforme ilustrado na figura acima, a auditoria energética necessita inicialmente de procedimentos para identificar e quantificar as perdas de energia em uma instalação. Quanto maior a instalação, maior a necessidade de se obter dados que caracterizem ou apontem para soluções destes procedimentos iniciais. Só então após isso, é possível modificar e acompanhar o comportamento do sistema. Nesse sentido, enfatiza-se novamente a importância do monitoramento energético para auditoria e

eficiência energética, no que diz respeito a mitigação do consumo de energia em uma instalação residencial, predial ou industrial.

3.4 Qualidade de energia elétrica

A qualidade de energia elétrica permite avaliar a conformidade do suprimento de energia elétrica a fim de garantir a operação segura dos sistemas elétricos [72]. Os problemas desse segmento afetam fortemente as unidades consumidoras industriais, comerciais e prediais, pois qualquer variação anômala nos parâmetros elétricos pode resultar em avarias ou mal funcionamento dos equipamentos presentes nestes setores. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) trata da qualidade de energia nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) em seu módulo 8 [73]. Por outro lado, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) também aborda sobre qualidade de energia em [74]. Nesse trabalho, os valores de referência para análise da qualidade do produto serão baseados nas especificações do IEEE.

A avaliação da qualidade de energia pode decorrer da qualidade do atendimento, que se volta para o atendimento comercial entre clientes e empresas, da qualidade do serviço, que lida com a continuidade do fornecimento de energia elétrica, e com a qualidade do produto, que se volta para a análise dos parâmetros elétricos da rede [75]. Neste trabalho, a partir dos dados obtidos do sistema de monitoramento proposto, serão avaliados apenas os aspectos de qualidade do produto no que tange às variações permitidas aos parâmetros elétricos dos circuitos.

3.4.1 Qualidade do produto

A qualidade do produto volta-se para o estudo das variações das formas de onda das componentes do sistema elétrico, dentre as quais se destacam os harmônicos, as variações de frequência, as variações de tensão de curta e longa duração, flutuações de tensão e desiquilíbrios de tensão e corrente [75]. A Figura 6 ilustra alguns destes eventos.

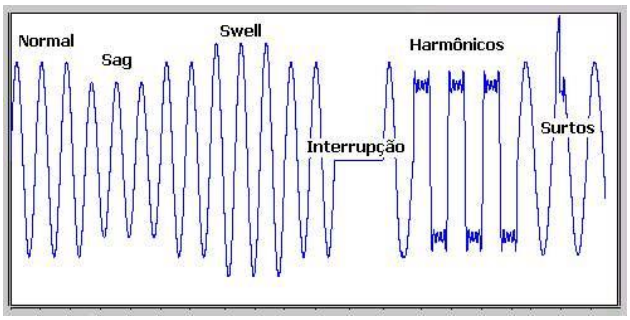


Figura 6: Eventos de variações da forma de onda em um sinal elétrico [76].

3.4.1.1 Harmônicos

Os harmônicos, também chamados de componentes harmônicas, são sinais de tensão ou corrente elétrica, múltiplos da frequência fundamental, que distorcem as características do sinal da frequência fundamental [75]. Na presença de harmônicos, é importante obter-se a distorção harmônica total (THD) para análise do impacto dessas componentes na qualidade de energia elétrica. As Equações 19 e 20 descrevem o cálculo das THDs de tensão e corrente elétrica, respectivamente.

$$THD_V = \sqrt{\frac{V}{V_f} - 1} \tag{19}$$

$$THD_I = \sqrt{\frac{I}{I_f} - 1} \tag{20}$$

3.4.1.2 Variações de frequência

As tensões trifásicas dos sistema elétrico possuem características senoidais de frequência fixa. Uma vez que as variações de carga do sistema possam variar, a frequência das tensões trifásicas também podem. Quando isso ocorre, máquinas motrizes e equipamentos eletroeletrônicos podem estar sujeitos a avarias ou ao mal funcionamento. No Brasil, a frequência fundamental do sistema elétrico é padronizada em 60 Hz e, segundo o módulo 8 do PRODIST, as variações de frequência são permitidas entre 59,9 Hz e 60,1 Hz [73]. De forma análoga, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define uma variação máxima de frequência de ±0,1 Hz [74].

3.4.1.3 Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração ou de regime permanente referem-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos [73]. Segundo as normativas do IEEE apresentadas em [74], essas variações de tensões devem ser avaliadas a partir do período de 1 minuto. A Tabela 8 apresenta os valores de sobretensão, subtensão e interrupção da tensão elétrica permitidos em valores por unidade (pu).

Tabela 8: Variações permitidas para tensão eficaz em regime permanente [74].

Variações de tensão de longa duração	**Magnitude eficaz**
Sobretensão	1,1 até 1,2 pu
Subtensão	0,8 até 0,9 pu
Interrupção	0,0 pu

3.4.1.4 Variações de tensão de curta duração (VTCD)

De forma dual às variações de tensão em regime permanente, as variações de curta duração ocorrem em um intervalo pequeno, entre meio ciclo da frequência fundamental e 1 minuto, segundo o IEEE [74]. Os pequenos afundamentos de tensão e pequenas sobretensões são classificados como *Sags* e *Swells*, respectivamente. Além disso, dependendo do tempo, a variação pode ser classificada como instantânea, momentânea ou temporária. Neste trabalho, abordaremos as VTCDs apenas as VTCDs temporárias a partir do *hardware* desenvolvido. As Tabelas 9, 10 e 11 expõem os valores por unidade (pu) permitidos para *Sags*, *Swells* e de interrupções da tensão elétrica de curta duração em intervalos instantâneos, momentâneos e temporários, respectivamente.

Tabela 9: Valores de VTCDs permitidos em intervalos instantâneos [74].

VTCDs	**Duração**	**Magnitude eficaz**
Swells	0,5 - 30 ciclos	1,1 até 1,8 pu
Sags	0,5 - 30 ciclos	0,1 até 0,9 pu

Tabela 10: Valores de VTCDs permitidos em intervalos momentâneos [74].

VTCDs	**Duração**	**Magnitude eficaz**
Swells	30 ciclos - 3s	1,1 até 1,4 pu
Sags	30 ciclos - 3s	0,1 até 0,9 pu
Interrupção	0,5 ciclo – 3s	$<$ 0,1 pu

Tabela 11: Valores de VTCDs permitidos em intervalos temporários [74].

VTCDs	**Duração**	**Magnitude eficaz**
Swells	3s - 1 min	1,1 até 1,2 pu
Sags	3s - 1 min	0,1 até 0,9 pu
Interrupção	3s - 1 min	$<$ 0,1 pu

3.4.1.5 Flutuações de tensão

Segundo [73], a flutuação de tensão é definida como um surto ou uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica da tensão elétrica. Ainda, o IEEE define que as flutuações de tensão são variações sistemáticas ou uma série de mudanças aleatórias de tensão, onde a magnitude não excede as faixas de tensão especificadas pela ANSI C84.1-2016, de 0,95 pu a 1,05 pu [74]. Desse modo, a variação permitida da tensão eficaz nesses requisitos é de $\pm 5\%$.

3.4.1.6 Desiquilíbrios de tensão e corrente

Os desiquilíbrios de tensão e corrente ocorrem quando a magnitude desses sinais trifásicos divergem entre si ou quando há diferenças de ângulos entre as componentes de fases [75]. Quando ocorrem nas correntes trifásicas, isso pode indicar o desbalanceio entre fases em detrimento da distribuição não equivalente das cargas em cada fase. Como consequência, isso pode gerar o desiquilíbrio de tensão ao longo da rede de distribuição pelas perdas ôhmicas. Além disso, isso pode impactar o desempenho das cargas motrizes presentes nas instalações [58]. Segundo o IEEE, o fator de desiquilíbrio de tensão não deve exceder 0,5% e pode ser definido a partir da Equação 21 [77].

$$K(\%) = \frac{max[|Va - Vm|, |Vb - Vm|, |Vc - Vm|]}{|Vm|} \times 100\% \quad (21)$$

Onde $K(\%)$ é o fator de desiquilíbrio, Va, Vb e Vc são as tensões de fase e Vm é a tensão média das fases.

3.5 O protocolo de comunicação MQTT

Os processos de aquisição e distribuição de dados estão proporcionando grandes avanços tecnológicos. Para isso, os sistemas computacionais estão cada vez mais interconectados em redes de dados e passam a englobar não só grandes estruturas industriais, mas também instalações prediais, residenciais e metropolitanas. Nesse contexto, os meios de comunicação sem fio tem influenciado diretamente na escalabilidade destes tipos de redes, dada a praticidade de instalação dos dispositivos computacionais nos mais diversos ambientes.

O Wi-Fi, padrão IEEE 802.11, ganha destaque nesse cenário pelo fato de interconectar sensores e atuadores com aplicações de *software* via TCP/IP [78]. Desse modo, quando um dispositivo Wi-Fi, ou nó, conecta-se a um ponto de acesso com conexão Internet, este nó passa ter acesso à Internet através de seus protocolos. Isso facilita, inclusive, a conexão de soluções IoT com serviços em nuvem [79]. Contudo, no âmbito do IoT, é necessário atentar pela leveza do protocolo, em relação ao *overhead*, a fim de reduzir o consumo energético e otimizar o uso de memória disponível.

O protocolo MQTT, *Message Queue Telemetry Transport*, é caracterizado pela maneira simples de transmitir dados. Este protocolo transporta dados através do protocolo TCP e possui o cabeçalho do pacote de dados com o tamanho mínimo de 2 *bytes*. Isso implica em menor latência e, consequentemente, em um consumo menor de energia pelo dispositivo em processos de transmissão e recepção de dados, principalmente em redes Wi-Fi. Sua arquitetura envolve o uso de um servidor, *broker*, onde os clientes podem assinar (ouvir) ou publicar dados em determinados tópicos [80]. Ressalta-se que o protocolo MQTT conta com três níveis de qualidade de serviço (QoS) que lidam com elementos de desempenho da rede, como latência, taxa de erro e tempo de atividade [81]. São eles:

- QoS 0: A mensagem é enviada apenas uma vez, não é armazenada e o publicador não recebe nenhuma informação sobre a entrega da mensagem;
- QoS 1: A mensagem é enviada pelo menos uma vez e é armazenada no publicador e no assinante até a confirmação de entrega. Outras tentativas de envio podem ocorrer caso o envio da mensagem não seja confirmado;
- QoS 2: São realizadas duas rodadas de transmissão. Na primeira rodada, o publicador envia a mensagem para o assinante e aguarda uma confirmação do assinante de que a mensagem foi armazenada. Do contrário, a mensagem continuará a ser transmitida e continuará armazenada. Na segunda rodada, o publicador informa ao assinante que ele pode concluir o processamento da mensagem e aguarda uma segunda confirmação. Se o publicador não receber a confirmação, outras tentativas de envio a ocorrerão. Após o recebimento dessa confirmação, o publicador exclui a mensagem armazenada.

A Figura 7 ilustra uma típica comunicação de um usuário e de um dispositivo inteligente com um *broker* MQTT através de um ponto de acesso, neste caso representado por um *gateway*. Na implementação deste trabalho, utilizou-se protocolo MQTT com o *broker* conhecido como Mosquitto para interconexão dos dispositivos de medição de energia com a aplicação de *software* desenvolvida em nuvem.

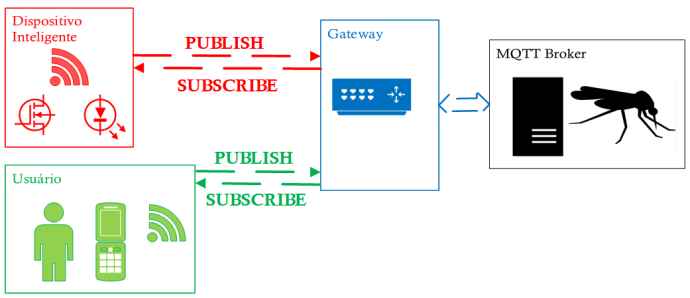


Figura 7: Utilização do protocolo MQTT com dispositivos e usuários.

3.6 Sistemas operacionais de tempo real

Boa parte dos sistemas computacionais modernos são destinados a aplicações multitarefas específicas. Nisso constituem-se os sistemas embarcados, que são amplamente empregados em soluções para IoT e para outros paradigmas digitais [82].

Algumas destas aplicações necessitam de um conjunto de rotinas a serem executadas a partir de processos, e até subprocessos, para que todas as ações desejadas ocorram em tempo hábil e para garantir a previsibilidade do comportamento das aplicações, mesmo em rotinas assíncronas. Dependendo da aplicação, o tempo de execução desses processos pode ocorrer em uma fração de microssegundos ou até em minutos. Assim, a duração desses processos carateriza uma operação em tempo real de sistemas computacionais convencionais ou embarcados [83].

Nesse contexto, os sistemas operacionais de tempo real, ou *Real-Time Operating Systems* (RTOS), são fortes aliados no gerenciamento desses processos, quando inseridos no *firmware* de processadores e microcontroladores. Um RTOS deve ser capaz de gerenciar tarefas de comunicação, processamento e controle em dispositivos embarcados, também denominadas de *tasks*. Quanto maior o número de *tasks* a serem tratadas no microcontrolador, maior a complexidade do sistema e do *software* a ser implementado. Utilizar esses sistemas operacionais no desenvolvimento do *firmware* não garante que o sistema opere de forma determinística no tempo. Para isso, deve-se conhecer e saber utilizar os recursos disponibilizados pelo RTOS para se obter o comportamento desejado no sistema desenvolvido [84]. Neste trabalho, um sistema operacional de tempo real será utilizado como base para elaboração das *tasks* de conectividade, monitoramento energético e de recursos computacionais presentes nos dispositivos desenvolvidos. Ao longo desta seção, serão apresentados os conceitos dos recursos utilizados na implementação do *firmware* desenvolvido.

3.6.1 *Tasks*

As *tasks*, ou tarefas, podem ser definidas como programas alocados de forma estática ou dinâmica na memória, que utilizam o processador durante determinado tempo e que possuem suas próprias características, como variáveis, pilhas de protocolos, entre outros [84]. Este conceito será debatido mais afundo ao explorar outros recursos disponibilizados pelos sistemas operacionais de tempo real.

3.6.2 Gerenciamento de *tasks* e recursos em um RTOS

Para realizar o gerenciamento das *tasks* e outros recursos, um RTOS necessita de uma base de temporização conhecida como *timer tick*, ou *ticks*. Normalmente,

ela é gerada através de uma interrupção periódica no processador ou no microcontrolador utilizado. Através do *timer tick*, é possível estabelecer o tempo necessário para execução de uma rotina, agendamento de tarefas, entre outras funcionalidades.

A parte do RTOS responsável pelo agendamento e controle do tempo de execução das tarefas a serem executadas é chamada de *scheduler* [85], que utiliza um algoritmo conhecido como *scheduler policy* para prover uma parcela de *ticks* a fim de ocupar a CPU com as rotinas de cada *task*. Ressalta-se que a própria tarefa pode suspender a si mesma, estando excluída, neste caso, de qualquer processamento oferecido pelo *scheduler*. Além disso, uma *task* não sabe quando será suspensa ou retomada. Portanto, caso a *task* seja interrompida quando estiver processando algum tipo de informação ou controlando algum recurso físico da pastilha, é necessário que o sistema operacional salve o contexto atual desta *task* utilizando os recursos de armazenamento do processador para que, ao retornar, sua rotina continue de onde parou. O processo de interromper e salvar o contexto de uma *task* e restaurar outra de onde foi interrompida é chamado de troca de contexto. A Figura 8 ilustra o processo de trocas de contexto entre três *tasks* na CPU, com base nos *ticks* pré-estabelecidos pelo *scheduler* a cada uma.

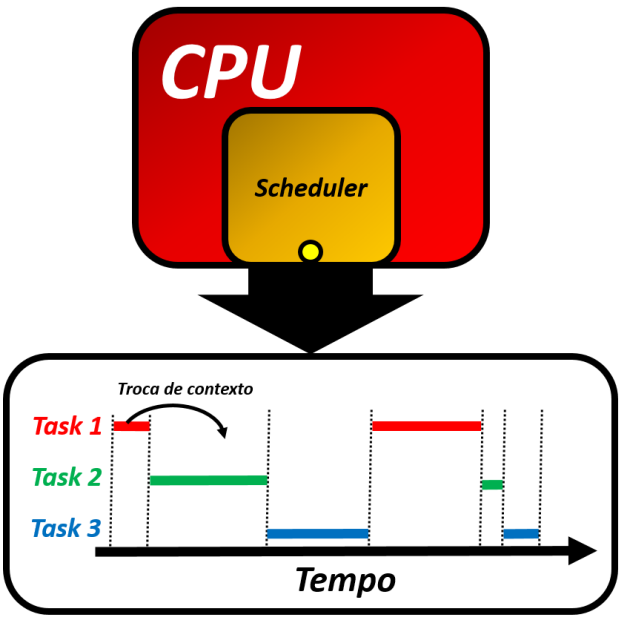


Figura 8: Processo de trocas de contextos entre *tasks* em um RTOS.

Um RTOS pode ser classificado como um sistema multitarefas, pois consegue gerenciar a execução das muitas tarefas estabelecidas para o dispositivo. Além disso,

o RTOS possui recursos de temporização complexos exigiriam do desenvolvedor a elaboração de algoritmos específicos dedicados as mesmas funcionalidades.

3.6.3 Prioridade

Um *scheduler* pode operar em dois tipos de ambiente: o preemptivo e o cooperativo. No ambiente preemptivo, o *scheduler* é forçado a realizar a troca de contexto antes que uma *task* possa ser finalizada caso haja uma *task* de prioridade maior em espera. Do contrário, em um ambiente cooperativo, as *tasks* devem ser concluídas antes que possa haver a troca de contexto, independente da prioridade das *tasks* em espera. A Figura 9 ilustra as duas situações mediante a instância de três tarefas, de diferentes prioridades, executadas pela CPU de um processador. Em ambos os ambientes, o *scheduler* preferencia as tarefas de maior prioridade, pois, através delas, o sistema pode estabelecer um gerenciamento hierárquico dos processos concorrentes na máquina.

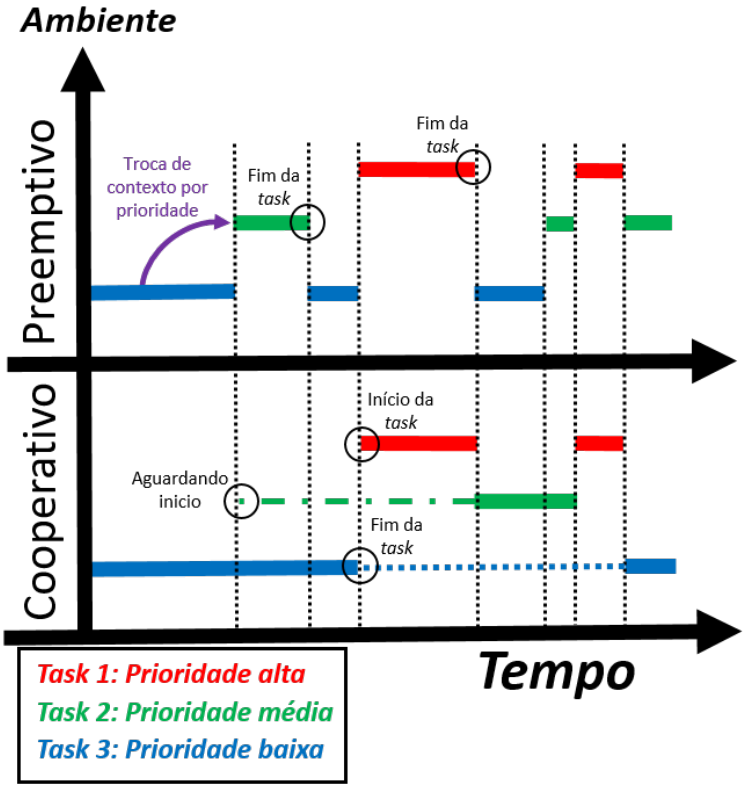


Figura 9: Trocas de contextos em ambientes preemptivos e cooperativos.

3.6.4 Os estados das *tasks*

As *tasks* podem encontrar-se em determinadas condições, ou estados, em determinado instante de tempo. Estes estados são: execução, pronto para execução, em espera, inativo ou interrompido [84]. Quando uma *task* encontra-se em estado de execução, ela utiliza os recursos de armazenamento e processamento da pastilha para executar suas rotinas. Por outro lado, quando uma *task* encontra-se pronta para execução, o *scheduler* pode selecioná-la em um próximo contexto para entrar em estado de execução. Em estado de espera, a *task* acaba de ser executada e pode entrar em inatividade ou pode prepara-se para ser executada, dependendo de sua prioridade. Em inatividade, uma *task* pode estar bloqueada ou suspensa do *scheduler* até que um método de desbloqueio venha a ser instanciado, ou uma nova *task* seja criada no lugar da anterior [86]. Além disso, existe a possibilidade de haver um serviço de interrupção de rotina, que pode interromper a *task* em execução e forçar a troca de contexto instantaneamente. A Figura 10 ilustra um diagrama de estados, representado as interações descritas entre os estados de uma *task*.



Figura 10: Interação entre os estados das *tasks* [86].

3.6.5 Os objetos de um RTOS

As sinalizações e a troca de informações entre as tarefas de um RTOS ocorrem por meio dos seus objetos, que auxiliam na coordenação e no sincronismo da execução das rotinas estabelecidas. Existem dois tipos de objetos disponíveis para uso em um RTOS, os de sincronização e os de comunicação. Os objetos de sincronização são empregados para sinalizar quando determinada rotina de uma *task* atingiu, ou não, certo estado. Por outro lado, os objetos de comunicação são utilizados para transferir informações entre as tarefas presentes no sistema. A seguir, serão apresentados os objetos utilizados no elaboração das *tasks* do sistema proposto neste trabalho.

3.6.5.1 Semáforos

Os semáforos sinalizam a ocorrência de um evento para determinada *task*, de forma síncrona ou assíncrona, através de uma *flag* conhecida pelas rotinas envolvidas. Os tipos de semáforos mais utilizados são os semáforos binários, os semáforos contadores e os semáforos de exclusão mútua, também chamados de *mutexes*. A principal distinção entre o semáforo binário e o semáforo contador, é que o binário pode assumir apenas dois valores possíveis, 0 ou 1. O semáforo contador é empregado para realizar contagens de acesso ao recurso em questão. Os semáforos de exclusão mútua, também chamados de *mutexes*, são derivações dos semáforos binários utilizados para informar quando determinado recurso está bloqueado ou desbloqueado. A Figura 11 ilustra uma aplicação de liberação de rotina, por meio de uma implementação com semáforo binário.

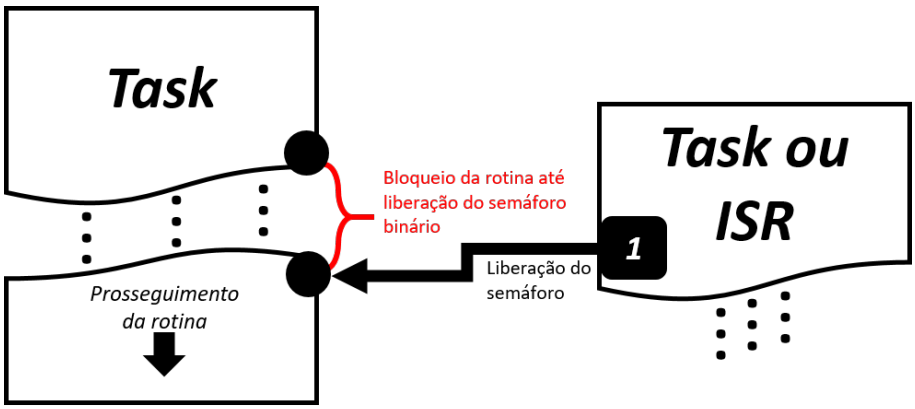


Figura 11: Exemplificação de uma aplicação com semáforo binário.

3.6.5.2 Grupos de eventos

Outro objeto de sincronização é o grupo de eventos, que é composto por um vetor de *flags* onde cada elemento é representado por um bit. Esse bit, por sua vez, indica a ocorrência de determinado evento no sistema. Portanto, cada *flag* está associada a um grupo de possíveis ocorrências.

3.6.5.3 Filas de mensagens

As filas de mensagens são utilizadas para transferência de mensagens entre *tasks* e interrupções (ISRs). A vantagem no uso de filas está na possibilidade de acumular mensagens em um vetor. Dessa forma, múltiplas rotinas podem transferir seus dados por uma fila de mensagens, simultaneamente, até o limite de posições estabelecido. Usualmente, as operações de entrada e saída de dados na fila são de caráter FIFO, *first-in-first-out*. A Figura 12 representa o processo de uma operação FIFO em uma fila de mensagens.

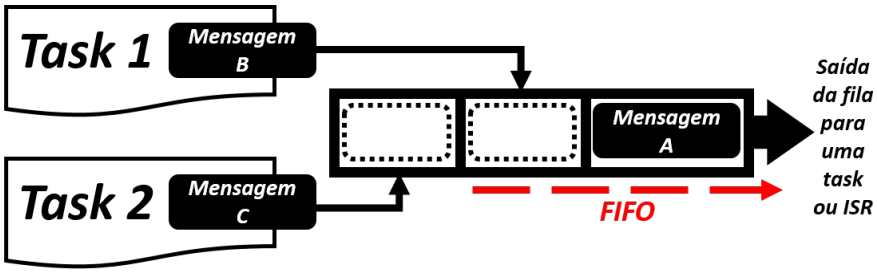


Figura 12: Exemplificação de uma operação FIFO em uma fila.

Capítulo 4

Metodologia para implantação do sistema proposto

Neste capítulo, serão abordados os aspectos metodológicos da pesquisa realizada, apresentando os procedimentos necessários para monitorar os parâmetros elétricos de circuitos de baixa tensão em tempo real, através de técnicas de *retrofit* e da adaptação do metamodelo SmartLVGrid, a fim de viabilizar a gestão energética de forma remota e em tempo real. Com o intuito de conhecer as problemáticas envolvendo a área de estudo deste trabalho, realizou-se uma pesquisa exploratória sobre o tema e o procedimento técnico utilizado para obtenção dos dados necessários foi a pesquisa experimental. Ressalta-se que este estudo teve por finalidade realizar uma pesquisa de natureza aplicada e para alcançar os objetivos propostos e melhor apreciação deste trabalho, foi utilizada uma análise qualitativa.

O SmartLVGrid, inicialmente, foi concebido para ser utilizado em conjunto com as unidades consumidoras de baixa tensão e suas interfaces com o sistema elétrico legado. Contudo, o trabalho [1] apresentou um modelo baseado no *retrofit* de um circuito legado de iluminação predial, mostrando a viabilidade da adaptação do SmartLVGrid em outros casos e sistemas. Nesse mesmo contexto, este trabalho contribui com um método de *retrofit* para um novo perfil de carga: os circuitos elétricos legados de um quadro de distribuição de energia. O termo legado, neste caso, refere-se ao fato de que, anteriormente, os circuitos não possuíam qualquer elemento que proporcionasse a execução de funcionalidades de controle ou de monitoramento remoto. Ressalta-se que as especificações necessárias para entendimento e aplicação

desse metamodelo em outros casos e sistemas estão descritas em [4]. A Figura 13 ilustra a estratégia de *retrofit* utilizada no sistema de monitoramento proposto.

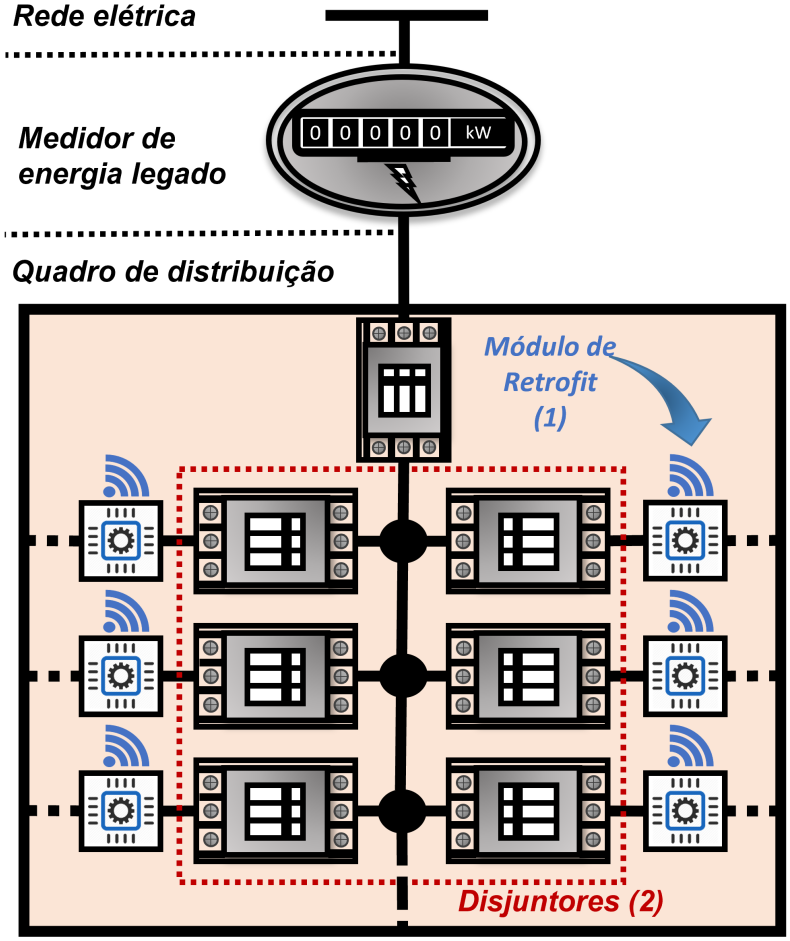


Figura 13: Estratégia de retrofit proposta para monitoramento energético.

Conforme ilustrado acima, a estratégia proposta neste trabalho promove a inserção de módulos de *retrofit* (1) constituídos de *hardwares* e *firmwares* específicos para comunicação em rede, processamento, armazenamento de dados e para aquisição dos parâmetros elétricos de cada circuito do quadro. Ressalta-se que os módulos de *retrofit* (1) são calibrados com uma fonte de precisão antes de serem instalados nos circuitos. Estes módulos (1) foram inseridos junto aos disjuntores (2) do quadro de distribuição de energia no intuito de padronizar os dispositivos desenvolvidos e suas instalações, de reduzir os impactos visuais em ambientes externos e de preservar ao máximo a instalação elétrica existente. Dessa forma, evitou-se o descarte ou remoção de qualquer insumo presente no circuito (cabos, paredes, pontos de tomada, disjuntores, entre outros).

A partir do *retrofit* dos circuitos do quadro elétrico, foi possível supervisioná-

los a partir de um centro de supervisão e controle. Neste trabalho, este centro supervisório estará situado em nuvem para acesso dos parâmetros monitorados de qualquer lugar. Além disso, esse centro supervisório foi concebido para disponibilizar recursos de gestão energética em tempo real, viabilizando a análise do consumo energético, da demanda consumida em termos de potência útil e reativa e dos parâmetros de qualidade do produto. Ressalta-se que a literatura não apresentou trabalhos com esta abordagem, envolvendo o uso de metamodelos e técnicas de *retrofit* para tal. Nesse sentido, serão apresentados os seguintes recursos de análise com os dados obtidos:

- Recursos de visualização e análise do fator de potência e da demanda energética dos circuitos do quadro de distribuição;
- Recursos de monitoramento e análise da qualidade do produto, dentre os quais estão os eventos de variações de tensão de longa duração, VTCDs temporáreas, flutuações de tensão e desiquilíbrios de tensão e corrente;
- Recursos de visualização e registro do histórico dos parâmetros elétricos e dos eventos ocorridos em cada circuito.

É importante mencionar que os valores de distorção harmônica total (THD) para tensão e corrente elétrica e a identificação das variações de frequência não serão implementadas neste trabalho, em detrimento da limitação dos recursos de *hardware* obtidos para elaboração do sistema. Os testes e validação dos resultados obtidos serão obtidos a partir da integração dos módulos de *retrofit* instalados com o centro de supervisão e controle, onde será possível identificar, individualmente, cada circuito com seus respectivos parâmetros elétricos e eventos.

A seção a seguir apresenta a modelagem realizada para implantação do sistema proposto. Com base nesta modelagem, é possível entender as entidades utilizadas para interação do sistema e as adaptações realizadas a partir do metamodelo SmartLVGrid para inserção de novos recursos aos circuitos do quadro de distribuição. Ressalta-se que os materiais e especificações para implementação do sistema serão expostos no capítulo seguinte.

4.1 Metamodelo SmartLVGrid adaptado ao sistema proposto

Para inserir um novo perfil de carga ao contexto do metamodelo SmartLVGrid, foi necessário implementar as camadas de *middleware* e de *interoperabilidade* desse metamodelo e adaptá-las para que as interfaces necessárias fossem realizadas com os circuitos do quadro. Essas adaptações foram realizadas a partir das especificações das primitivas operacionais e da composição dos ACUs a serem utilizados. Isso também envolve os métodos para integração das interfaces físicas dos ACUs com os circuitos legados do quadro de distribuição, que serão detalhados na próxima seção. Além disso, o centro de supervisão e controle foi implementado com base em serviços em nuvem, *dashboards* e banco de dados, premissas essas não exploradas pelo metamodelo. A Figura 14 ilustra as interfaces adaptadas do metamodelo SmartLVGrid para o sistema proposto neste trabalho, juntamente com a integração do sistema com o centro de supervisão e controle.

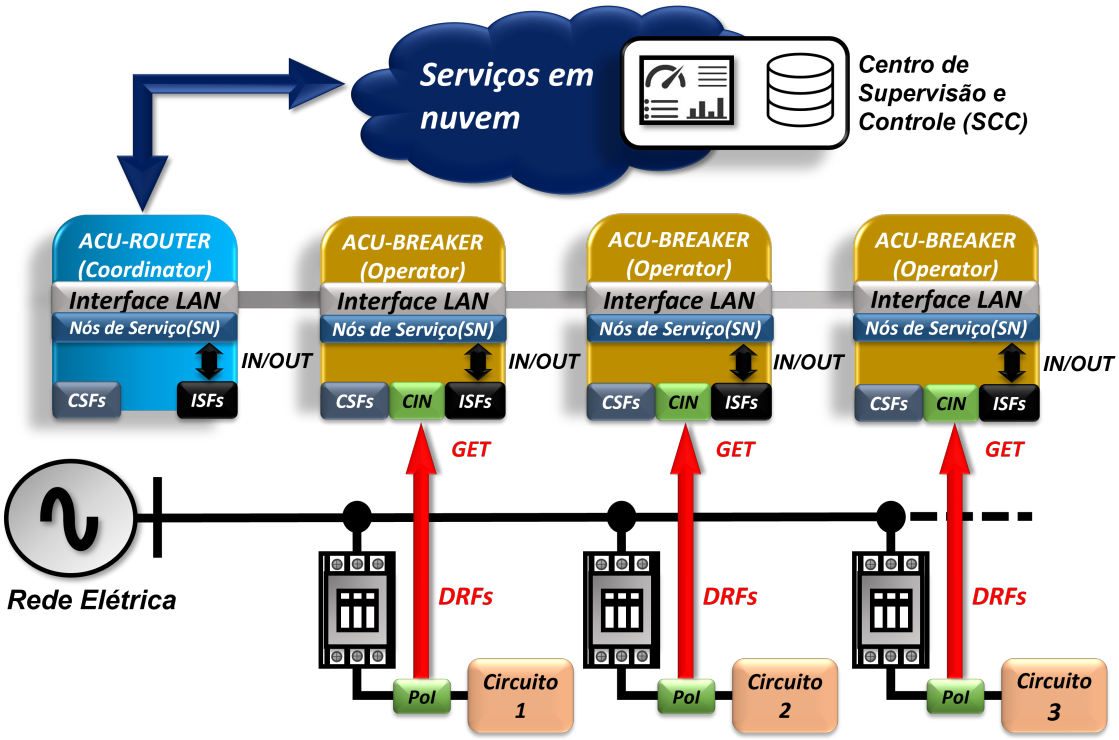


Figura 14: Arquitetura SmartLVGrid adaptada ao modelo proposto.

Neste trabalho, os módulos de *retrofit* para medição dos parâmetros elétricos atuam como ACUs *operators* do sistema. Eles foram denominados de ACU-

BREAKERs, pois estão situados próximo aos disjuntores dos circuitos legados. Por outro lado, o sistema conta com um roteador para comunicação do sistema e interface com os serviços de nuvem responsáveis por abrigar as aplicações de *software* com *dashboards* e banco de dados. Assim sendo, este dispositivo foi classificado como ACU *coordinator* e foi denominado de ACU-ROUTER, em detrimento do seu papel de roteador para com o sistema.

A Figura 14 ilustra a interoperabilidade entre os ACUs do sistema através da interface de rede de área local (LAN). O ACU-ROUTER, no papel de *coordinator*, deve comunicar-se com o centro de supervisão e controle (SCC), que, neste trabalho, está situado em nuvem junto aos outros serviços computacionais de visualizações e processamento de dados no contexto da eficiência energética e da qualidade de energia. Com os ACUs interconectados, cada circuito pode ser virtualizado pelo SCC no intuito de organizar, individualmente, os parâmetros obtidos de cada circuito. Ressalta-se que o ponto de interface situa-se entre o disjuntor e o circuito elétrico, de onde a porta "*Get*" extrairá os dados de medição até o CIN. Ressalta-se que, neste caso, os nós de serviço atuarão na interface dos meios de comunicação disponíveis com a rede LAN, disponibilizando os dados e vias de acesso para isso (portas TCP, endereços de IP, SSID, entre outros). A seguir, será realizada uma breve descrição da arquitetura de cada ACU proposto no sistema.

4.1.1 Modelagem do ACU-BREAKER

A Figura 15 expõe o diagrama de arquitetura do ACU-BREAKER com suas respectivas interfaces baseadas no metamodelo SmartLVGrid. Conforme mencionado anteriormente, este ACU é responsável pela coleta de parâmetros elétricos do circuito legado associado a seu respectivo disjuntor. Dessa forma, a medição dos parâmetros elétricos, segundo o metamodelo SmartLVGrid, é caracterizada como uma DRF a ser executada pela porta "*Get*" deste ACU. De forma análoga, a comunicação deste ACU é realizada através da porta "*In/Out*", que é responsável por executar as ISFs de requisições e respostas ao ACU *coordinator* (ACU-ROUTER). Ainda, o ACU-BREAKER possui CSFs associadas ao gerenciamento da conexão em rede e ao armazenamentos dos dados de conexão e de configuração do dispositivo. Para executar as primitivas operacionais supracitadas, ressalta-se que este ACU possui

recursos de processamento digital para aquisição e ajustes dos parâmetros elétricos medidos, comunicação, transdução e condicionamento dos sinais elétricos e proteção contra possíveis surtos de sobrecorrente e sobretensão.

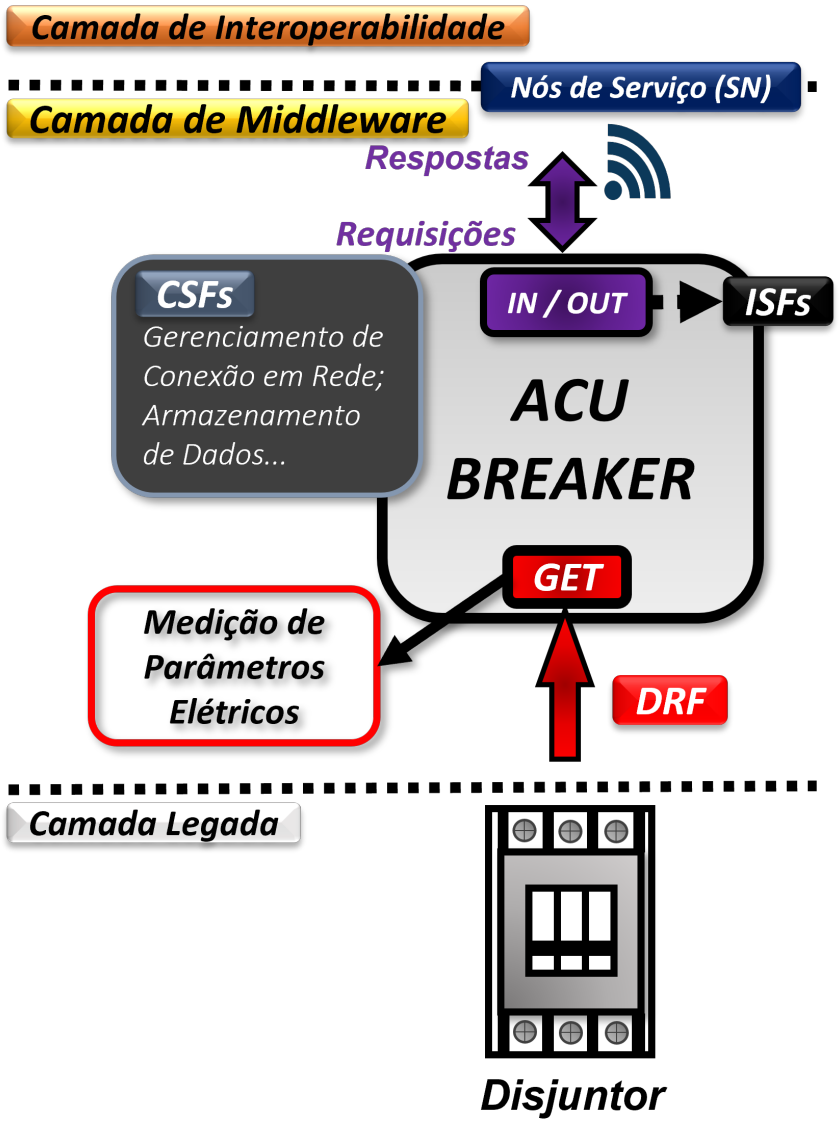


Figura 15: Diagrama de arquitetura do ACU-BREAKER.

4.1.2 Modelagem do ACU-ROUTER

De forma análoga, a Figura 16 ilustra o diagrama de arquitetura do ACU-ROUTER e suas respectivas interfaces. Apesar deste ACU não possuir interfaces com a camada legada e portas "*Get*" e "*Run*" para execução de DRFs, ele desempenha um importante papel no sistema proposto. Através dele, é possível realizar a interface dos ACUs *operators*, responsáveis pela medição dos parâmetros elétri-

cos, com o centro de supervisão e controle (SCC), que se encontra na nuvem. Essa interface também é realizada através de suas portas "*In/Out*", por meio das ISFs associadas às mensagens de requisições e respostas. Como CSF, este ACU deve executar o gerenciamento da conexão dos ACUs *operators* na rede de dados utilizada.

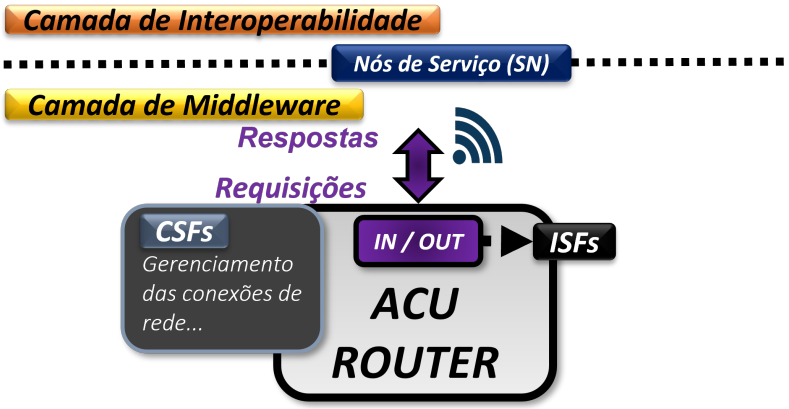


Figura 16: Diagrama de arquitetura do ACU-ROUTER.

Capítulo 5

Materiais e especificações para implementação do sistema

Este capítulo aborda as estratégias utilizadas para desenvolver e implementar as camadas de *middleware* e de interoperabilidade e o centro de supervisão e controle do sistema de monitoramento deste trabalho. Para isso, serão definidos os recursos de *software*, os padrões de trocas de mensagens e as especificações de *hardware* e *firmware* dos módulos de *retrofit*, compatibilizando-os conforme as especificações do modelo proposto.

5.1 Definição da camada de interoperabilidade do sistema

No metamodelo SmartLVGrid, não são estabelecidas tecnologias ou recursos a serem utilizados para implementar as estratégias de *retrofit* sobre o sistema legado. Por se tratar de um modelo de convergência tecnológica gradual, é possível utilizar os recursos mais viáveis no processo de implementação do sistema. Isso também é válido para os recursos e a infraestrutura da rede de comunicação. Nesse sentido, para aproveitar a infraestrutura de rede disponível nas proximidades do quadro de distribuição de energia, optou-se por utilizar o protocolo de comunicação MQTT em uma rede Wi-Fi. A partir disso, estabeleceu-se as premissas para viabilizar a interoperabilidade entre os dispositivos.

Neste trabalho, o *broker* MQTT Mosquitto foi executado em uma máquina

virtual na nuvem, juntamente com as aplicações e serviços de *software* do centro de supervisão e controle (SCC). A empresa provedora dos serviços de nuvem foi a DigitalOcean. Na comunicação MQTT, o endereço de IP utilizado para acesso ao *broker* foi o próprio endereço da máquina virtual, na porta TCP 1883. Este endereço e porta foram repassados ao *firmware* para conexão dos ACUs em rede por meio de mensagens a serem apresentadas a posteriori. Desse modo, os nós de serviço (SNs) preconizados no metamodelo foram implementados com o estabelecimento da conexão dos ACUs na rede Wi-Fi local e com o *broker* MQTT. Ressalta-se que os pacotes foram transmitidos no sistema com QoS 0, para reduzir a latência da troca de dados entre os ACUs e o *broker*.

Para viabilizar a interoperabilidade dos ACUs com o SCC por meio da interface LAN Wi-Fi e do protocolo MQTT, foram utilizados pacotes de dados de requisições e respostas no formato JSON (*JavaScript Object Notation*) utilizando a biblioteca cJSON, exclusiva para operações com JSON em linguagem C [87]. As respostas dos ACUs, nesse caso, eram transmitidas apenas após o recebimento de suas respectivas requisições. A Tabela 12 apresenta as mensagens transmitidas nos pacotes de requisições e de respostas do sistema. As notações completas dos pacotes contendo essas mensagens em formato JSON encontram-se no Apêndice B deste trabalho.

Tabela 12: Mensagens utilizadas nos pacotes de comunicação.

Mensagem	**Descrição**
”get_measurements”	Mensagem enviada no pacote JSON de requisição e de resposta ao pedido de parâmetros elétricos
”set_calibration_ref”	Mensagem enviada no pacote JSON de requisição e de resposta dos ajustes de calibração
”set_register”	Mensagem enviada no pacote JSON de requisição e de resposta dos ajustes de configuração de rede

A Figura 17 ilustra o processo de comunicação adotado para viabilizar a comunicação dos ACUs com o centro de supervisão e controle hospedado na nuvem. Através dos serviços em nuvem, o centro de supervisão e controle consegue estabelecer comunicação com a interface LAN do sistema por meio da rede Wi-Fi. Quando

uma mensagem de requisição é transmitida, após a configuração dos nós de serviço, as ISFs, que implementam a troca de dados e a sincronização da comunicação dos ACUs através da interface de rede, são executadas por meio do envio de pacotes no protocolo MQTT. Na Figura 17, esse processo é ilustrado com base na arquitetura do sistema proposto para um pedido de parâmetros elétricos.

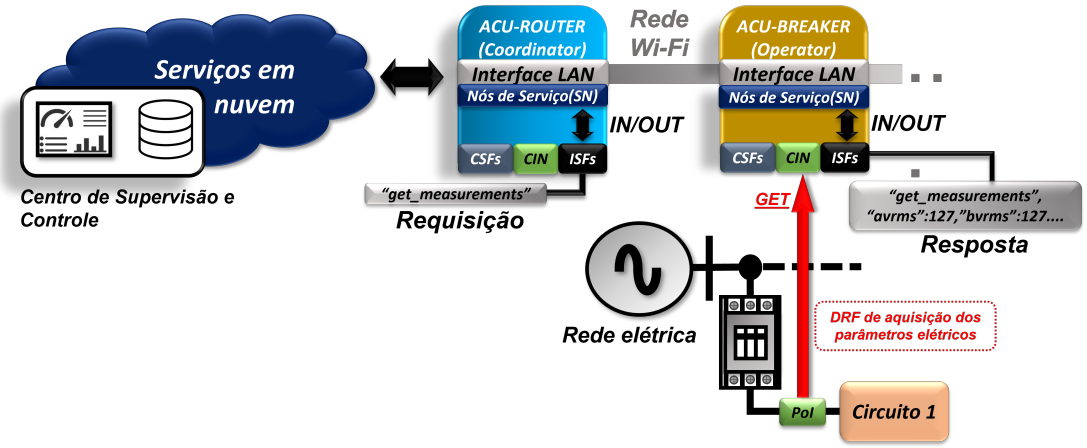


Figura 17: Processo de comunicação do sistema proposto.

5.2 Implementação do *middleware* ACU-BREAKER

A concepção do ACU-BREAKER foi baseada no desenvolvimento de um dispositivo de *hardware*, com seu respectivo *firmware*, para monitorar os parâmetros elétricos em tempo real de um circuito trifásico situado em um quadro de distribuição de energia. Ressalta-se que este dispositivo também pode ser utilizado para monitoramento de circuitos bifásicos ou monofásicos. O SmartLVGrid não recomenda o uso de plataformas ou recursos específicos para concepção dos ACUs. Por outro lado, deve-se utilizar recursos que possibilitem o máximo aproveitamento da infraestrutura legada. Dito isso, para monitorar os circuitos do quadro elétrico através da estratégia de *retrofit* preconizada na arquitetura do sistema proposto, elaborou-se um painel contendo seis destes ACUs, fontes de alimentação e *backup* de baterias (para operação contínua mesmo em casos de interrupção de energia). Dessa forma, cada painel de ACUs será instalado a cada seis disjuntores do quadro elétrico. É importante mencionar que o ACU-BREAKER foi projetado com dimensões reduzidas, a fim de facilitar sua instalação a posteriori. A Figura 18 ilustra a estratégia descrita

acima para instalação do ACU-BREAKER e os recursos de *hardware* presentes em sua concepção.

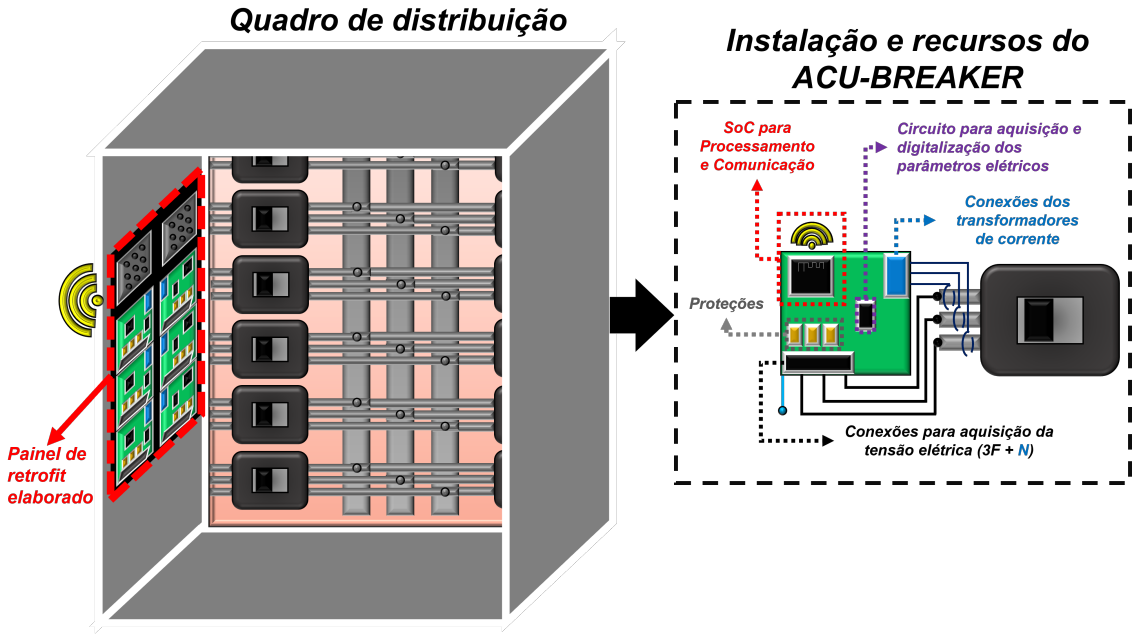


Figura 18: Estratégia de utilização do ACU-BREAKER.

Conforme mostrado acima, o ACU-BREAKER conta com um *System-on-a-chip* (SoC) com recursos de processamento e comunicação. Através dele, serão implementadas as DRFs, CSFs e ISFs inerentes a este ACU. Ele também possui componentes discretos responsáveis pela proteção e condicionamento dos sinais elétricos, obtidos através das conexões de aquisição das tensões elétricas e das conexões com os transformadores de corrente. É importante frisar que essas conexões implementam fisicamente a porta *Get* deste ACU. Para garantir a confiabilidade dos parâmetros elétricos obtidos, mesmo em condições não senoidais, optou-se por utilizar um circuito integrado dedicado à aquisição e digitalização dos parâmetros elétricos por meio da técnica do valor médio. Através deste mesmo circuito integrado, implementou-se um procedimento para calibração dos parâmetros obtidos, garantindo, também, a precisão dos valores adquiridos. A seguir, serão apresentadas as especificações de *hardware* utilizadas no desenvolvimento do ACU-BREAKER.

5.2.1 Especificações de *hardware*

Nesta subseção, apresenta-se os recursos utilizados no desenvolvimento e implementação do ACU-BREAKER.

5.2.1.1 SoC para processamento e comunicação

Conforme já mencionado, o ACU-BREAKER conta com um SoC com recursos de processamento e comunicação. Para isso, utilizou-se o SoC ESP32-D0WD-V3 presente no módulo ESP32-WROOM-32E da fabricante Espressif [88, 89]. Através dele, foi possível usufruir dos recursos de comunicação Wi-Fi e do protocolo MQTT para implementar as ISFs, por meio das mensagens de requisições e respostas, e o gerenciamento da conexão em rede (uma das CSFs). Além disso, ele possui recursos de comunicação serial UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) que foram utilizados para depuração do *firmware* desenvolvido e recursos de comunicação serial SPI (*Serial Peripheral Interface*), para comunicação com o circuito integrado de aquisição de sinais elétricos. Por meio dessas mesmas interfaces seriais, efetuou-se os procedimentos para calibração dos parâmetros elétricos medidos antes da instalação dos dispositivos.

O módulo ESP32-WROOM-32E conta com uma memória *flash* de 4 MB, que foi utilizada para implementar a CSF de armazenamento dos parâmetros de ajustes de calibração e para armazenamento dos parâmetros de configuração da rede de comnicação. Além disso, ele também conta com antena integrada, filtros e pode suportar variações de temperatura entre -40°C à 120°C, o que o torna aplicável para diversos ambientes. A Tabela 13 apresenta algumas das especificações técnicas do módulo ESP32-WROOM-32E.

Tabela 13: Especificações técnicas do ESP-WROOM-32E [89].

Parâmetros	**Especificações**
CPU	Xtensa dual-core 32-bit LX6
Frequência de operação da CPU	80-240 MHz
Wi-Fi	802.11 b/g n
Frequência central de rádio	2,4 GHz
Flash	4 MB
SRAM	520 KB
N°de GPIOs	26
N°de interfaces UART disponíveis	3
N°de interfaces SPI disponíveis	2

5.2.1.2 Circuito para aquisição e digitalização dos parâmetros elétricos

A aquisição dos parâmetros elétricos foi baseada no circuito integrado ADE7758 e os componentes discretos associados a ele. Este circuito integrado é produzido pela fabricante Analog Devices e tem por função o recebimento dos parâmetros elétricos de tensão e corrente previamente condicionados, para que possa então digitalizá-los e processá-los de forma precisa. Por meio disso, é possível obter os parâmetros de tensão e corrente eficazes, frequência da rede e energias ativa, reativa e aparente a cada 960 ms [90]. Seus ADCs internos possuem resolução de 24 bits e operam com uma taxa de amostragem de até 26 ksps. Ressalta-se que o método do valor médio é apresentado no *datasheet* do referido circuito integrado para computar esses parâmetros internamente, permitindo a análise de parâmetros senoidais e não senoidais [91]. Os parâmetros de potência ativa, reativa e aparente e fator de potência podem ser computados por um processador com os parâmetros de energia obtidos.

O ADE7758 se comunica com a unidade de processamento por meio de um barramento serial SPI, *Serial Peripheral Interface*. Para se comunicar, ele depende de um cristal de precisão de 10 MHz. No barramento SPI, a unidade de processamento é classificada como mestre e o ADE7758 como escravo, sempre à espera de dados seriais que apontem para um determinado registrador interno. Cada registrador desempenha uma determinada funcionalidade, como ajustes de ganho e *offset* dos parâmetros elétricos ou retorno dos parâmetros elétricos solicitados, por exemplo. Através dos ajustes supracitados, é possível calibrar o sistema de medição por meio de um *firmware* compatível.

5.2.1.3 Circuitos de condicionamento de tensão e corrente

Os ADCs internos do ADE7758 contam com sinais de tensão e corrente previamente condicionados com baixos valores. O valor de pico máximo, ou valor de fundo de escala, dos sinais inseridos nos três canais de tensão e corrente é de 500 mV [90]. Nesse sentido, almejando uma leitura máxima de 500 V de pico da rede elétrica, ajustou-se o circuito de transdução baseado em um divisor resistivo para operar com esta relação nos canais de tensão. Baseando-se na Equação 16 e considerando o neutro como referência, $V_{out} = 500mV$, $V_{in} = 500V$ e $R_1 = 1M\Omega$, o valor obtido para R_2 foi 1 $k\Omega$. Dessa forma, estabeleceu-se o condicionamento dos

canais de tensão. É importante frisar que estes resistores devem ter precisão máxima de 1%, para maximizar a eficácia do sistema, e operar com potências de até 0,25 W, para evitar sobreaquecimento devido os altos potenciais elétricos aos quais podem ser submetidos. No ACU-BREAKER, utilizou-se resistores SMD 0603 que atendessem estas especificações.

Os transformadores de corrente foram dimensionados para atender as correntes dos disjuntores dos circuitos. Para atender esta demanda, optou-se por utilizar os transformadores de corrente não invasivos da série AcuCT mV, produzidos pela fabricante Accuenergy [92]. Independente da corrente nominal destes transformadores, as suas saídas em fundo de escala são de 333 mV. Contudo, para utilizá-los com os canais de corrente diferenciais do ADE7758, foi necessário realizar ajustes nos sinais obtidos destes transdutores. O fundo de escala máximo dos canais de corrente é de 500 mV de pico, porém pode ser ajustado para 250 mV ou 125 mV de pico. Nesse sentido, utilizamos um divisor resistivo para ajustar a saída do transformador de corrente para 250 mV de pico e configuramos o fundo de escala do canal de corrente para o mesmo valor, alterando os registros de ganho interno do ADE7758.

5.2.1.4 Dispositivos de proteção

A transdução da tensão elétrica é realizada de forma não isolada. Desse modo, para garantir a proteção contra surtos, sobrecorrentes e sobretensões, as proteções de entrada dos canais de tensão do ACU-BREAKER são compostas por GDTs, termistores PTC e diodos do tipo Zener, respectivamente. Nesse sentido, para garantir a proteção do módulo ESP-WROOM-32E na comunicação SPI com o ADE7758, utilizou-se um isolador digital para separar o neutro da rede elétrica da referência digital do módulo. Desse modo, foi necessário utilizar duas fontes de alimentação no painel de ACUs projetado, uma para alimentação do ADE7758 e outra para alimentação do ESP-WROOM-32E. Por outro lado, os canais de corrente contam a isolação galvânica e a medição não invasiva dos transformadores de corrente. Assim sendo, apenas diodos do tipo Zener foram utilizados para evitar que sobressinais viessem a danificar os canais de corrente. As referências dos dispositivos utilizados são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Especificações dos dispositivos de proteção.

Dispositivos de proteção	**Referências**
Diodo Zener	AZ23C2V7 [93]
GDT	2035-60-SM [94]
Termistor PTC	MF-RM040/240-2 [95]
Isolador digital	SI8663 [96]

5.2.1.5 Esquema elétrico e *Layout*

O esquema elétrico e o *layout* do ACU-BREAKER foram desenvolvidos no *software* Altium 21. O *layout* está ilustrado no Apêndice C deste trabalho. A Figura 19 ilustra uma perspectiva em três dimensões (3D) do *layout* projetado para o ACU-BREAKER. Ressalta-se que para posicionar o ACU-BREAKER no painel desenvolvido, duas versões de *layout* foram elaboradas para externar o conector de corrente (azul) para fora em ambos os lados do painel.

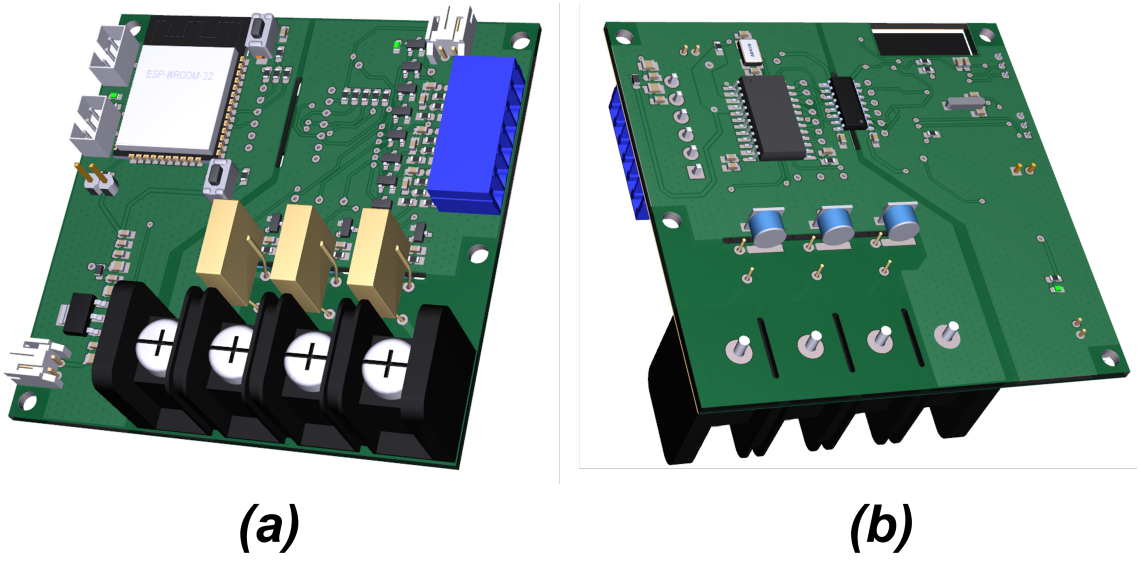


Figura 19: Perspectiva superior (a) e inferior (b) em 3D do ACU-BREAKER.

5.2.1.6 Painel de ACUs

Conforme citado anteriormente, foi elaborado um painel contendo seis ACU-BREAKERs, duas fontes de alimentação de 5V (uma para o circuito digital do módulo ESP32-WROOM-32E e outra para o circuito de aquisição do ADE7758) e

um *backup* de baterias. Adicionalmente, uma placa de suporte foi elaborada e posicionada ao painel para distribuir a energia das fontes para os ACUs, através de conectores. O painel foi desenvolvido para ser posicionado internamente ao quadro de distribuição e instalado em seis dos circuitos presentes. Para um total de 47 circuitos, 8 painéis foram montados. A Figura 20 ilustra o painel de ACUs previamente desenvolvido no *software* Inventor.

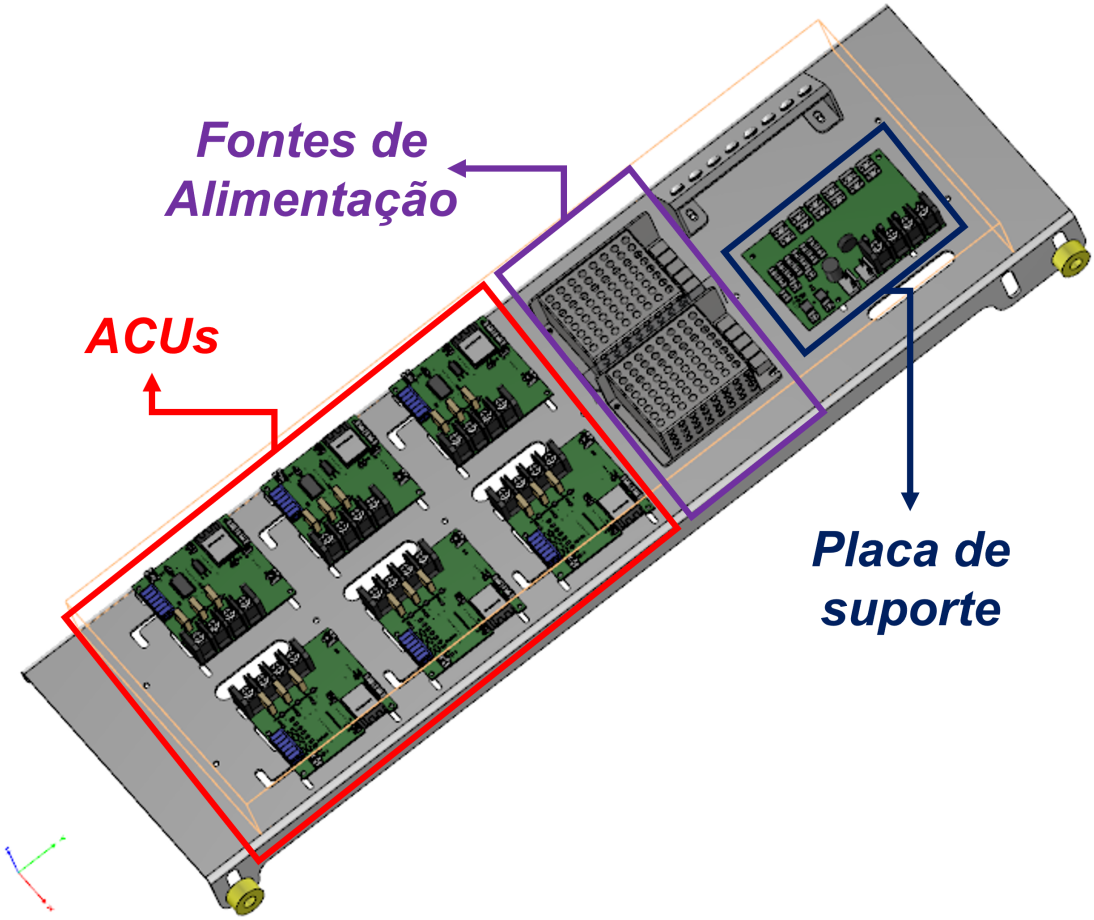


Figura 20: Perspectiva do painel de ACUs elaborado.

5.2.2 Desenvolvimento do *firmware* de tempo real

O *firmware* do ACU-BREAKER garante a execução das suas CSFs, com os recursos de processamento e armazenamento de dados, das ISFs, através dos processos de trocas de mensagens, e da sua DRF, por meio da aquisição e processamento dos parâmetros elétricos. Para garantir um melhor gerenciamento das tarefas associadas a essas primitivas operacionais, realizou-se o desenvolvimento do *software* embarcado utilizando um sistema operacional de tempo real e seus recursos. Desse

modo, o sistema operacional utilizado foi o FreeRTOS no ambiente de desenvolvimento *Espressif IoT Development Framework* (ESP-IDF), em linguagem C. Este *framework* é exclusivo para programação dos processadores da fabricante Espressif, inclusive o módulo utilizado neste ACU [97].

Primeiramente, iniciou-se o desenvolvimento do *firmware* com a instancia das funções de inicialização e de configuração do ACU e seus periféricos. Após isso, instanciou-se as *tasks* responsáveis por executar as rotinas necessárias para o funcionamento do dispositivo. Conforme mencionado no referencial teórico, o *scheduler* do sistema operacional é responsável por agendar a execução das *tasks* na CPU. No entanto, conforme mostrado na Tabela 13, o SoC utilizado é *dual-core*, o que significa que ele pode processar uma *task* em cada uma de suas CPUs (”CPU0 e ”CPU1”), paralelamente. Este processo é denominado de multiprocessamento [84]. Dessa forma, utilizou-se esse recurso para instanciar *tasks* em cada um dos núcleos do SoC ESP32-D0WD-V3. Isso foi realizado na rotina principal do *firmware*, ilustrada na Figura 21.

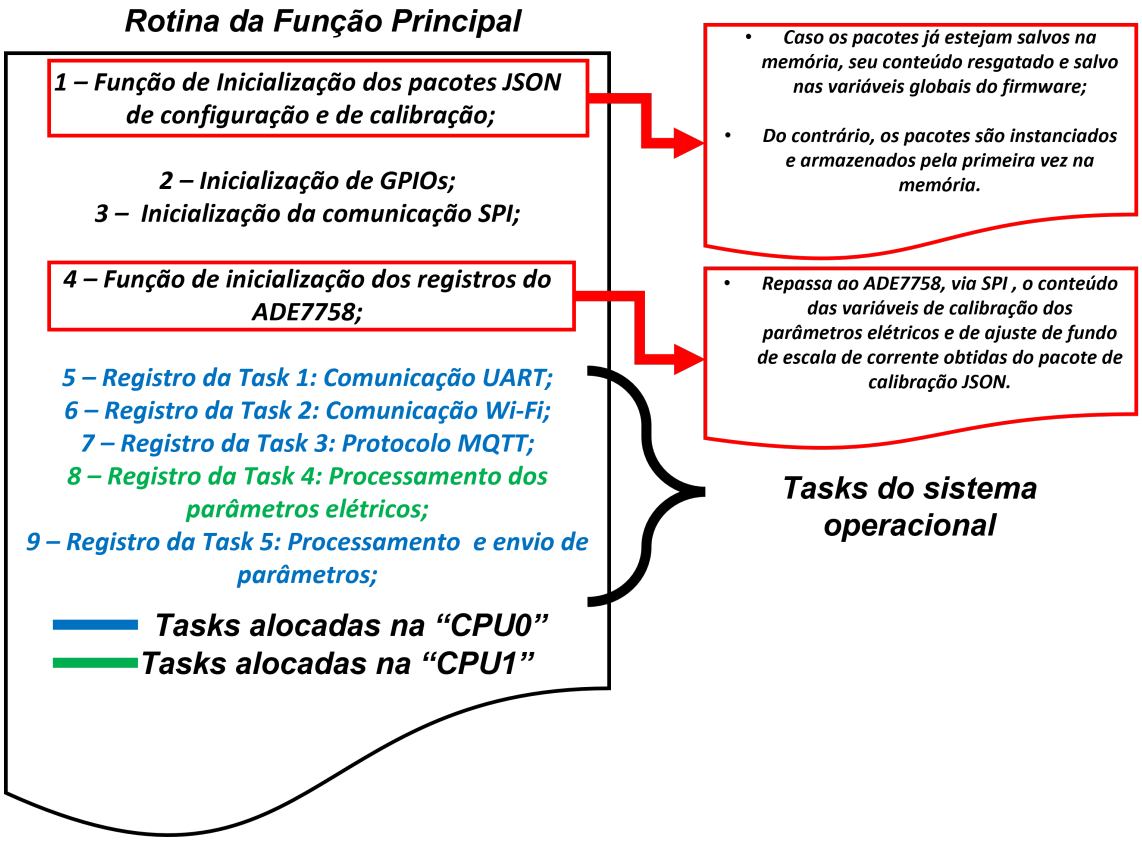


Figura 21: Rotina principal do *firmware* do ACU-BREAKER.

Dessa forma, ficou estabelecido que as *tasks* referentes a comunicação, arma-

zenamento e processamento de dados (ISFs e CSFs) seriam alocadas na "CPU0" do SoC. Por outro lado, a *task* 4, referente a DRF de medição dos parâmetros elétricos, ficou alocada para ser executada na "CPU1". Esta abordagem foi adotada pois a DRF de medição dos parâmetros elétricos ocorre de forma síncrona e, para evitar que fosse interrompida por outras *tasks* de maior prioridade, ela foi alocada exclusivamente para ser executada na "CPU1". Ressalta-se que a rotina da função principal é executada, por padrão do *framework* ESP-IDF, na "CPU0". Cada *task* apresentada na Figura 21 será descrita a seguir, juntamente com a prioridade alocada a cada uma:

- *Task* 1: Essa *task* tem prioridade 25 (máxima) e é responsável por gerenciar a recepção de dados da comunicação serial UART para efetuar as rotinas de calibração e de configuração de rede no ACU-BREAKER. Através dela, é possível receber os pacotes de configuração ou de calibração em formato JSON e encaminhá-los para a *task* 5, a fim de atualizá-los e salvá-los na memória. Além disso, também pode-se receber requisições de parâmetros elétricos por meio desta *task*. É importante frisar que, enquanto os dados recebidos estiverem sendo processados na *task 5*, um semáforo binário é utilizado para bloquear o uso da serial até o término do processamento. Além disso, também foi utilizada uma fila de mensagens para repassar os dados recebidos a *task* 5.

- *Task* 2: Essa *task* também tem prioridade máxima e é responsável por gerenciar a conexão Wi-Fi do ACU-BREAKER. Em casos de desconexão, ela tenta a reconexão automaticamente e informa as *tasks* 3 e 5 deste evento através de um objeto de grupo de eventos. De forma dual, o grupo de eventos também pode sinalizar o estabelecimento de uma conexão Wi-Fi para as *tasks* 3 e 5.

- *Task* 3: De forma análoga a *task* 2, essa *task* é responsável pelo gerenciamento do recebimento das mensagens via MQTT, bem como a conexão com o *broker*. Sua prioridade é 10. Quando a conexão Wi-Fi é perdida, o grupo de eventos da *task* 2 sinaliza esta *task* para desconecta-la do *broker* MQTT, e vice-versa. Da mesma forma, um grupo de eventos instanciado nesta *task* sinaliza para *task 5* a conexão estabelecida com o *broker*, a assinatura no tópico MQTT ou o recebimento de uma mensagem do *broker*. Nesse último caso, uma fila de

mensagens é utilizada para repassar a mensagem recebida para a *task* 5.

- *Task* 4: Essa *task* de prioridade 10 foi exclusivamente alocada na "CPU1" para obter os parâmetros de energias, frequência, tensão eficaz e corrente eficaz através da comunicação serial SPI com o ADE7758. Esses dados são obtidos a cada 1 segundo, para possibilitar a analise das VTCDs momentâneas e temporárias no contexto da qualidade de energia. Em posse desses parâmetros e com base na temporização de 1 segundo, os valores de potências e fator de potência são computados nesta *task*. Esses dados são estruturados no formato JSON e colocados em uma fila para serem enviados via serial UART ou MQTT pela *task* 5. Ressalta-se que serão repassados os dados de *timestamp* na referida estrutura. Essa *task* está apta a receber uma fila com os parâmetros de calibração atualizados pela *task* 5, a fim de repassá-los ao ADE7758.

- *Task* 5: Essa *task* está sempre à espera das filas supracitadas com requisições de dados configuração, calibração ou dados de processamento dos parâmetros elétricos. A cada um segundo, quando a *task* 4 indexa seus dados na fila, a *task* 5 preenche uma *string* com esses dados, no formato do pacote JSON de requisição dos parâmetros elétricos, e os transmite via MQTT com QoS 0. Para isso, é necessário receber a sinalização dos grupos de eventos de que as conexões Wi-Fi e MQTT estão em funcionamento. No caso de uma requisição de dados de configuração, de medição dos parâmetros elétricos ou na execução do procedimento de calibração pela interface serial UART, os dados solicitados serão transmitidos pela mesma interface ao solicitante. Na falta de dados de medição por parte do centro de medição e controle, este serviço poderá receber um pedido de requisição desses dados a partir do *timestamp* da amostra, considerando uma variação de até 2 segundos. Essa *task* também processa os dados de calibração e repassa os parâmetros de ajustes computados em uma fila para *task* 4, a fim de que os registradores internos do ADE7758 sejam sobrescritos e a medição ocorra de forma precisa.

A Figura 22 ilustra a relação entre as *tasks* apresentada nos itens anteriores.

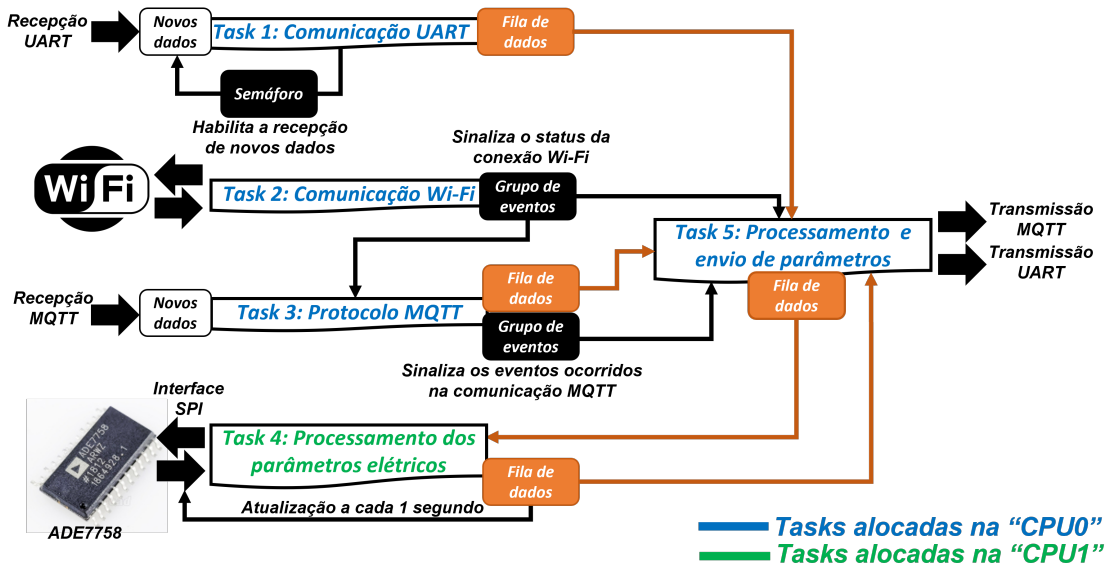


Figura 22: Interação entre as *tasks* do *firmware* de tempo real desenvolvido.

5.2.3 Procedimento de calibração do ACU-BREAKER

O procedimento de calibração do ADE7758 para aferição dos parâmetros elétricos está descrito em seu *datasheet* [90]. Ele consiste nos ajustes dos registradores internos de fase, *offset* e ganho dos parâmetros de tensão, corrente e energia. Para realizar esses ajustes, é necessário utilizar uma fonte de precisão para fornecer parâmetros conhecidos de tensão e corrente de forma precisa. O *datasheet* recomenda que o dispositivo seja calibrado para as tensões e correntes nominais do circuito, o que não significa que serão seus parâmetros de fundo de escala. Por exemplo, a tensão de fase nominal do quadro monitorado é de 127 V_{rms}, porém, como explicado anteriormente, o ACU-BREAKER pode monitorar até 500 V de pico (fundo de escala), cerca de 353,55 V_{rms}.

É importante frisar que cada ACU-BREAKER foi calibrado individualmente, pois cada um é afetado de forma diferente pela tolerância ou precisão dos componentes utilizados para condicionamento ou transdução dos sinais. Nesse sentido, cada ACU-BREAKER foi calibrado com base nas tensões e correntes nominais da fase de cada circuito. A fonte de precisão utilizada foi a fonte PPS400.3 da fabricante MTE [98]. Nela, os valores de tensão, corrente, fase e frequência foram configurados e inseridos no ACU-BREAKER. Após isso, utilizando a interface serial UART, o usuário solicita os parâmetros elétricos com a mensagem de requisição "get_measurements", ilustrada no Apêndice B. Em seguida, o usuário deve preencher e enviar

pela interface serial UART o pacote da mensagem "set_calibration_ref" com os valores obtidos da medição e os valores fornecidos de tensão, corrente, energia ativa, energia reativa e energia aparente. Também deve ser passado o tempo desejado para acúmulo de energia no pacote. Dessa forma, a *task* 5 deve armazenar e processar esses dados, conforme especificado no *datasheet*, e repassar os parâmetros de ajuste de *offset*, ganho e fase a *task* 4. A *task* 4, por sua vez, escreverá nos registradores do ADE7758 os parâmetros de ajuste para que a medição ocorra de forma precisa. Nos testes realizados, foi possível obter uma medição com cerca de 1% de erro através dos ajustes de calibração. A Figura 23 ilustra o ACU-BREAKER em uma bancada para ser calibrado na fonte de precisão utilizada.

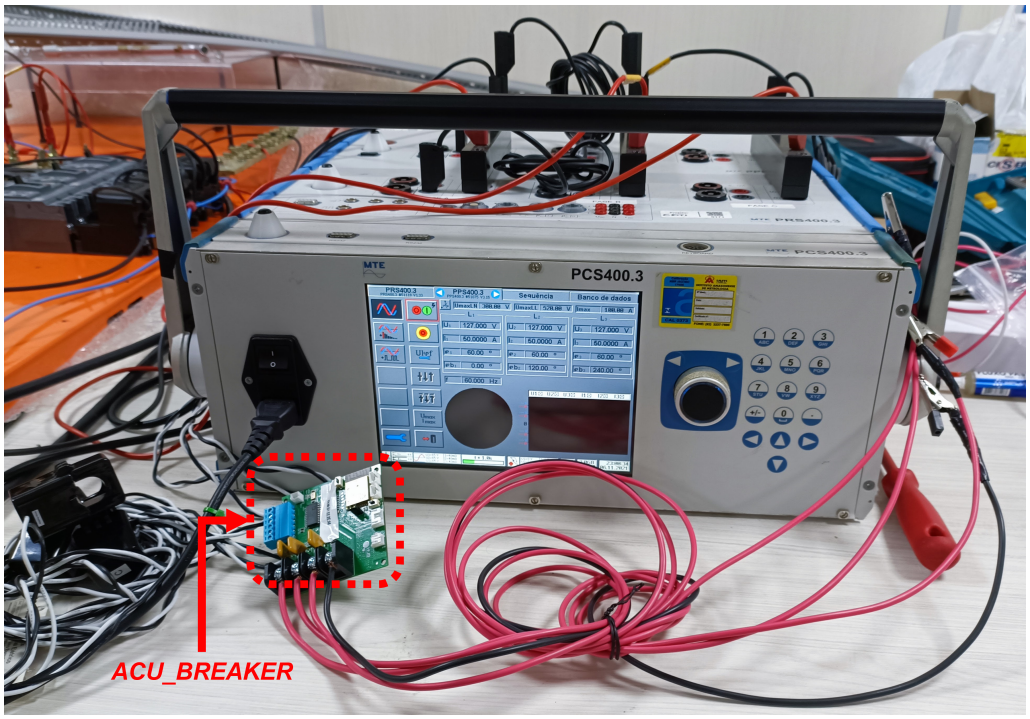


Figura 23: ACU-BREAKER em bancada para calibração com fonte de precisão.

5.3 O *middleware* ACU-ROUTER

Um ACU não necessariamente deve ser um dispositivo de *hardware* a ser desenvolvido com base nas premissas do metamodelo SmartLVGrid. Por se basear em uma estratégia de *retrofit*, o processo de adaptação tecnológica pode ocorrer por meio de dispositivos já existentes com as interfaces necessárias para viabilizar a interoperabilidade com outras aplicações do sistema. Nesse sentido, para realizar

a interface com os outros ACUs *operators* e viabilizar a comunicação do sistema, o ACU-ROUTER (*coordinator*) foi selecionado para ser um roteador Wi-Fi nas proximidades do quadro elétrico utilizado para implementar a prova de conceito deste trabalho. O roteador utilizado foi o modelo AP 310 da fabricante Intelbras [99].

O roteador Wi-Fi não implementa funcionalidade de controle ou monitoramento nos circuitos elétricos ou em qualquer sistema legado. Portanto, como ACU, não realiza DRFs no sistema legado. Contudo, através dele, é possível realizar trocas de mensagens e o sincronismo da comunicação com outros *operators*. Desse modo, através de sua porta "*In/Out*", implementada através dos seus transceptores de comunicação *wireless*, é possível realizar ISFs no sistema. Mais do que isso, este dispositivo conta com recursos computacionais para gerenciamento das conexões e para configurações de rede, o que caracteriza suas CSFs. Para futuras implementações baseadas no metamodelo SmartLVGrid, é importante frisar que suas primitivas operacionais (DRFs, CSFs e ISFs) dependem da aplicação dos ACUs nos sistemas futuros. Dessa forma, caso um dispositivo de mercado viabilize uma transição tecnológica não abrupta e atenda as necessidades de interfaces com os sistemas desenvolvidos, este poderá ser utilizado como ACU. Contudo, para soluções customizadas, como o ACU-BREAKER, será necessário desenvolver os recursos de *hardware* e o respectivo *firmware* para interagir com outros ACUs e com a camada legada, preservando-a ao máximo.

5.4 Implementação do centro de supervisão e controle

O centro de supervisão e controle foi implementado por meio de serviços e aplicações de *software*, incluindo bancos de dados e *dashboards*, situados em uma máquina virtual em nuvem no provedor DigitalOcean. Através dele, foi possível visualizar a atualização dos parâmetros elétricos em tempo real e cadastrar os ACUs, a fim de virtualizar o comportamento energético de cada circuito do quadro elétrico.

Para desenvolvimento das telas e *dashboards* utilizou-se o framework Angular na versão 10, uma plataforma de código aberto para desenvolvimento de aplicações Web [100]. Por outro lado, a linguagem Python na versão 3.9 foi utilizada para

desenvolver serviços de *software* para suporte de transporte de dados à interface Web desenvolvida e suporte ao gerenciamento de outros serviços, como armazenamento de dados e cadastro de dispositivos. O protocolo websocket foi utilizado para viabilizar a comunicação em tempo real do *broker* MQTT com a interface Web, pois, através dele, é possível enviar requisições e receber respostas orientadas a eventos, sem ter que consultar um servidor para atualizar a interface [101].

No intuito de viabilizar o armazenamento dos dados monitorados em tempo real, utilizou-se o banco de dados MongoDB. Por outro lado, o histórico de eventos e o cadastro de dispositivos foram armazenados no banco PostgreSQL. A Figura 24 ilustra a concepção do centro de supervisão e controle descrita nesta seção e sua integração com os dispositivos do sistema proposto.

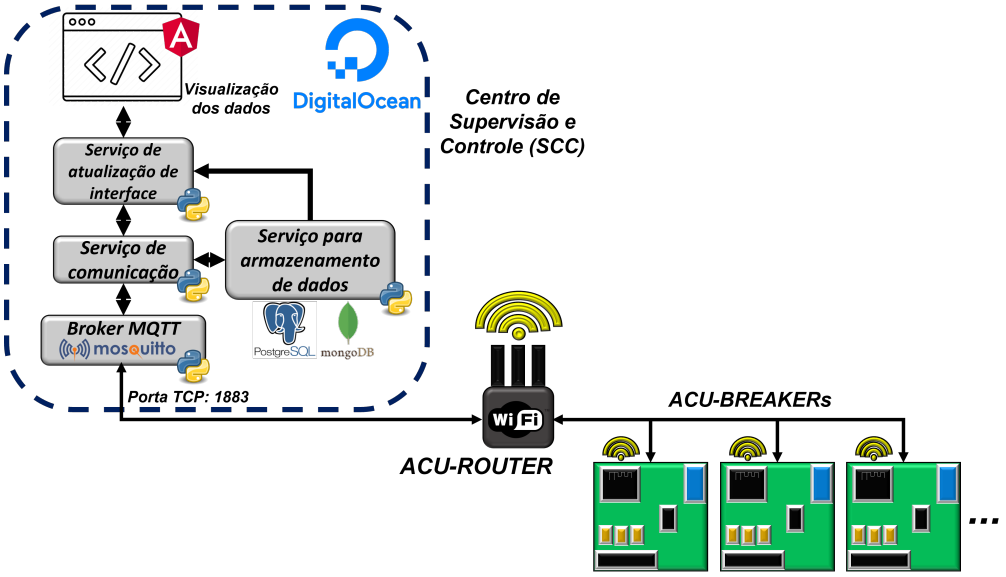


Figura 24: Estrutura do centro de supervisão e controle.

5.5 Instalação do sistema proposto

O sistema de monitoramento proposto foi instalado no quadro de força da policlínica odontológica da Universidade do Estado do Amazonas, localizada no bairro Cachoeirinha, em Manaus. Nesse quadro, a tensão nominal de fase é de 127 V_{rms}, tensão esta para qual os ACU-BREAKERs foram calibrados em bancada. O quadro em questão possui cerca de 47 circuitos e todos foram monitorados por cada ACU individualmente. Cada ACU-BREAKER foi identificado conforme a enumeração

dos circuitos do quadro. Os parâmetros de configuração de rede, contendo o endereço de IP da máquina virtual e a porta TCP para comunicação MQTT, juntamente com a identificação dos ACUs,foram repassados e armazenados para os ACUs após o procedimento de calibração em bancada. Com isso, foi possível montar os painéis com os ACU-BREAKERs, as fontes de alimentação, baterias, placas de suporte e o cabeamento necessário para instalação.

Cada ACU-BREAKER foi conectado ao seu respectivo circuito através dos conectores de tensão e dos transformadores de corrente. O painel, por sua vez, foi posicionado na parte interna do quadro de distribuição. A Figura 25 ilustra o painel de ACUs instalado no referido cenário. Em seguida, ilustrando o *retrofit* dos circuitos do quadro elétrico, a Figura 26 expõe as conexões do ACU-BREAKER que realizam a interface com camada legada do sistema. Após energizados, os ACUs, pré-configurados com os parâmetros de rede, passaram a se comunicar com o *broker* MQTT executado na máquina virtual que hospeda as aplicações do centro de supervisão e controle na nuvem.

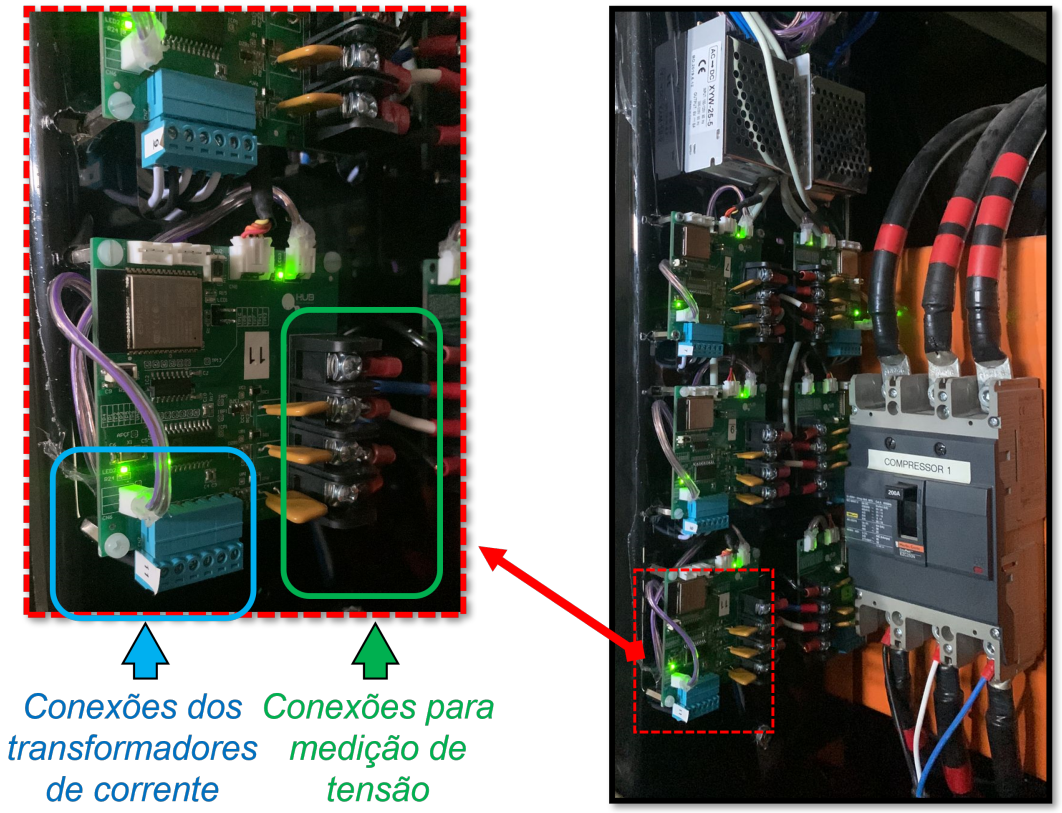


Figura 25: Painel com ACUs instalado no quadro elétrico.

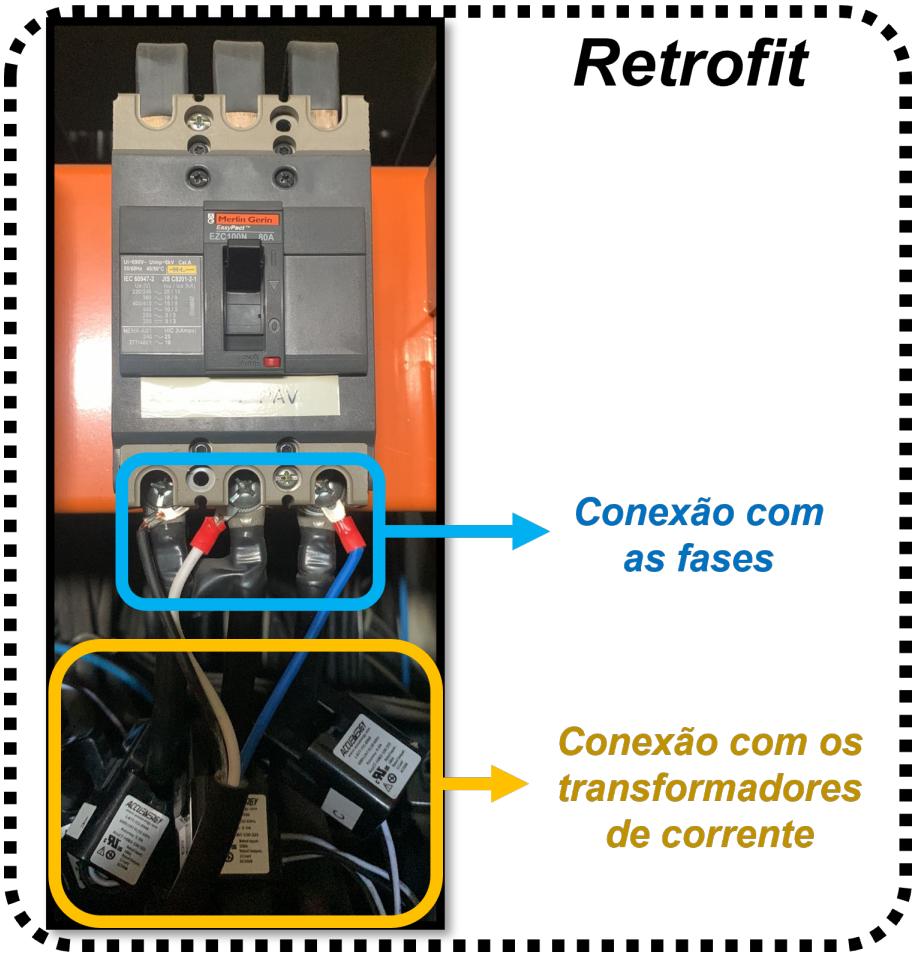


Figura 26: *Retrofit* do circuito elétrico com as conexões do ACU-BREAKER.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com a implementação e instalação do sistema de monitoramento proposto para o quadro de distribuição legado. Inicialmente, os nós de serviço (SNs) foram estabelecidos através da conexão dos ACUs com o centro de supervisão e controle (SCC) por meio dos dados de rede pré-cadastrados. A partir disso, foi possível avaliar a execução das primitivas operacionais (DRFs, ISFs e CSFs) estabelecidas para o ACU-BREAKER e para o ACU-ROUTER, o que valida a adaptação do metamodelo SmartLVGrid e a estratégia de *retrofit* utilizada. Para apresentar os recursos de gestão energética disponibilizados pelo sistema, desenvolveram-se interfaces de *software* que registram e expõem eventos e parâmetros elétricos obtidos do sistema em tempo real.

6.1 Validação das CSFs

As CSFs foram implementadas para gerenciar os serviços de rede e ao armazenar os dados de configuração de rede. Para ilustrar a execução desta primitiva operacional, a Figura 27 expõe alguns dos *logs* das rotinas das CSFs implementadas no ACU-BREAKER, obtidos pela depuração através da interface serial UART. De forma dual, estes *logs* também representam o estabelecimento da conexão de rede realizada através da interface LAN com o ACU-ROUTER, que, por sua vez, estabelece comunicação com o *broker* MQTT por meio da internet.

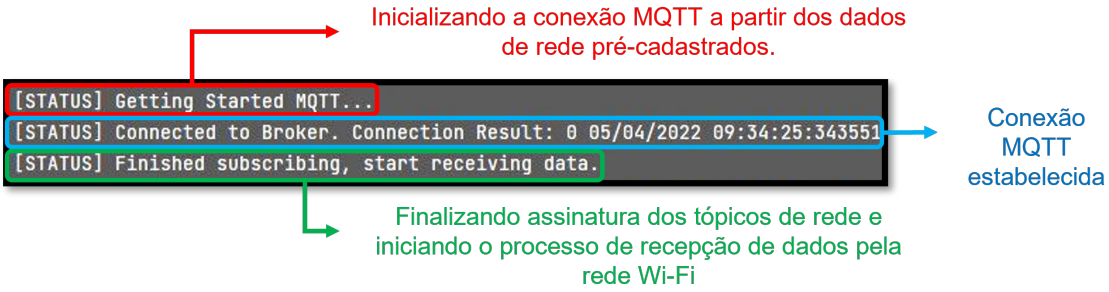


Figura 27: *Logs* referentes às CSFs implementadas no ACU-BREAKER.

6.2 Validação das ISFs e da DRF de monitoramento dos parâmetros elétricos

O processo de trocas de mensagens estabelecido através das ISFs possibilitou o envio de requisições e o recebimento de respostas entre o ACU-BREAKER e o centro de supervisão e controle (SCC). Isso foi realizado através de pacotes encapsulados no formato JSON, transmitidos por meio do protocolo MQTT com QoS 0. Para validar esta primitiva operacional, capturou-se os *logs* de envio e recebimento de dados do serviço de comunicação implementado em linguagem Python no SCC. A partir disso, foi possível configurar os ACUs, calibrá-los e requisitar os parâmetros elétricos medidos de cada circuito, implementação esta que caracteriza a DRF executada pelo ACU-BREAKER.

Os parâmetros elétricos obtidos em uma resposta do ACU-BREAKER estão descritos no Apêndice B deste trabalho, na Figura 35. Desse modo, a Figura 28 ilustra os *logs* das respostas das requisições de parâmetros elétricos feitas para os ACUs conectados aos diferentes circuitos do quadro de distribuição de energia. Nota-se no campo "*datetime*" que os parâmetros elétricos foram coletados praticamente no mesmo *timestamp*, o que caracteriza o sincronismo do sistema de tempo real proposto. No circuito 35, as tensões mensuradas apresentam-se muito abaixo da tensão nominal (127 V_{rms}), indicando um evento de subtensão. Ainda, nota-se que as tensões das fases A e B dos outros circuitos estão abaixo das tensões nominais.



Figura 28: *Logs* de recebimento dos parâmetros dos circuitos do quadro elétrico.

6.3 Interfaces de *software* desenvolvidas para o SCC

O SCC proposto tem a premissa de viabilizar a gestão energética em tempo real com recursos para análise da qualidade de energia e da eficiência energética, sendo essa uma das contribuições deste trabalho. Seu acesso foi realizado através do credenciamento de usuários a partir de um login e chave de segurança após o acesso ao endereço e a porta TCP da máquina virtual em nuvem onde a aplicação estava instalada. Com os serviços de *software* em operação, foi necessário desenvolver interfaces que indicassem alterações dos parâmetros de qualidade do serviço, do fator de potência, da demanda energética ou das grandezas elétricas monitoradas.

A Figura 29 ilustra a interface desenvolvida para identificar os ACUs em operação associados a cada circuito do quadro, incluindo um *dashboard* para visualizar as grandezas elétricas em tempo real e os eventos relacionados com a qualidade do produto e com eficiência energética. No campo ”Informações do Dispositivo”, observa-se a identificação única do ACU na rede (ID). A unidade consumidora (UC) também recebe uma identificação única. Existe um indicador para saber se o ACU está conectado ou não e também um *combo box* para selecionar outro ACU a partir da interface ilustrada. Também é possível visualizar um campo para as tensões e correntes instantâneas, que também informam a ocorrência de eventos referentes a esses parâmetros. O campo que expõe os eventos ocorridos apresenta o horário (*timestamp*) de ocorrência e qual evento ocorrido. O gráfico temporal ilustrado exibe

até duas grandezas elétricas monitoradas por fase ou os gráficos das três fases de um único parâmetro. Ressalta-se que o histórico de visualização pode ser selecionado através do ícone *Time gap* e que abaixo do gráfico são exibidos os valores instantâneos das grandezas a medida em que o cursor é posicionado na tela.



Figura 29: *Dashboard* de visualização dos dados de monitoramento e do dispositivo.

6.4 Análises de eficiência energética com o sistema proposto

O sistema possibilita a analise individual por circuito ou mesmo a situação geral do quadro geral da policlínica odontológica da UEA, cuja demanda contratada é de 60 kW. Assim, é possível possível comparar, em tempo real, a demanda contratada com a demanda medida. Na Figura 30, podemos observar o fator de potência e a potência ativa (kW) da fase B do circuito 10 do quadro monitorado, um circuito relacionado a um quadro de tomadas gerais, entre 09 e 12 de fevereiro de 2022.

Durante o mesmo período, na mesma fase de alimentação (B), a Figura 31 ilustra o fator de potência com relação a todos os circuitos monitorados e a potência ativa resultante dos circuitos do quadro. Nota-se que tanto a carga presente no circuito 10 quanto a instalação apresentam um fator de potência abaixo do especificado pelo PRODIST (0,92) em grande parte do período mostrado. Isso implica em multas por parte da concessionária, além do uso não eficiente da energia total consumida.

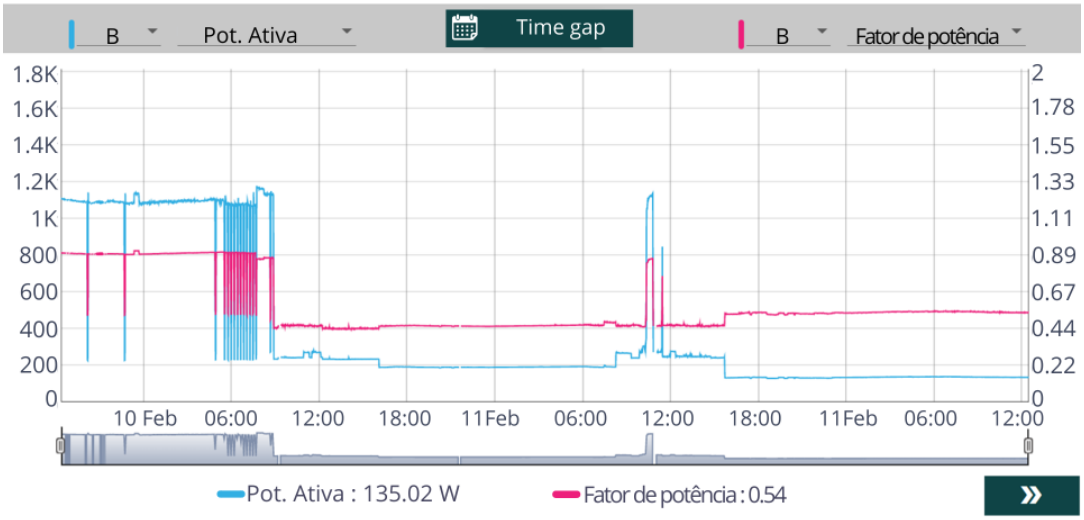


Figura 30: Fator de potência e potência ativa da fase B do circuito 10.

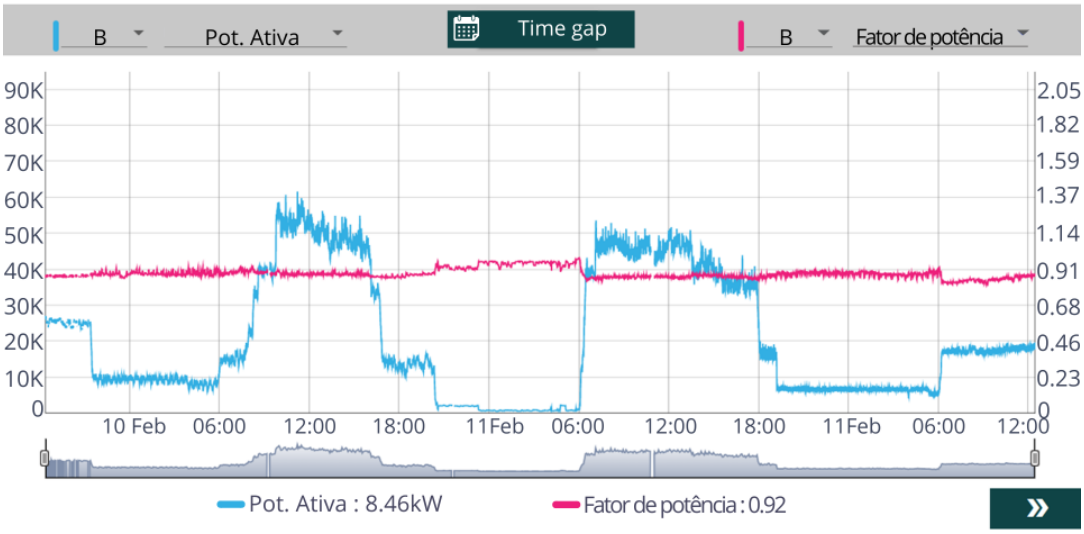


Figura 31: Fator de potência e potência ativa da fase B do quadro monitorado.

Na Figura 31, nota-se que a demanda da instalação esteve próxima da de-

manda contratada. Porém, em 13 de abril do mesmo ano, a demanda contratada foi ultrapassada por um período superior aos 15 minutos de análise da concessionária [68]. Este evento pode ser visualizado na Figura 32. Isso enfatiza a necessidade de avaliar dados históricos, onde ultrapassagens de demanda podem levar a necessidade de rever a demanda contratada ou a estratégias para controle de demanda.

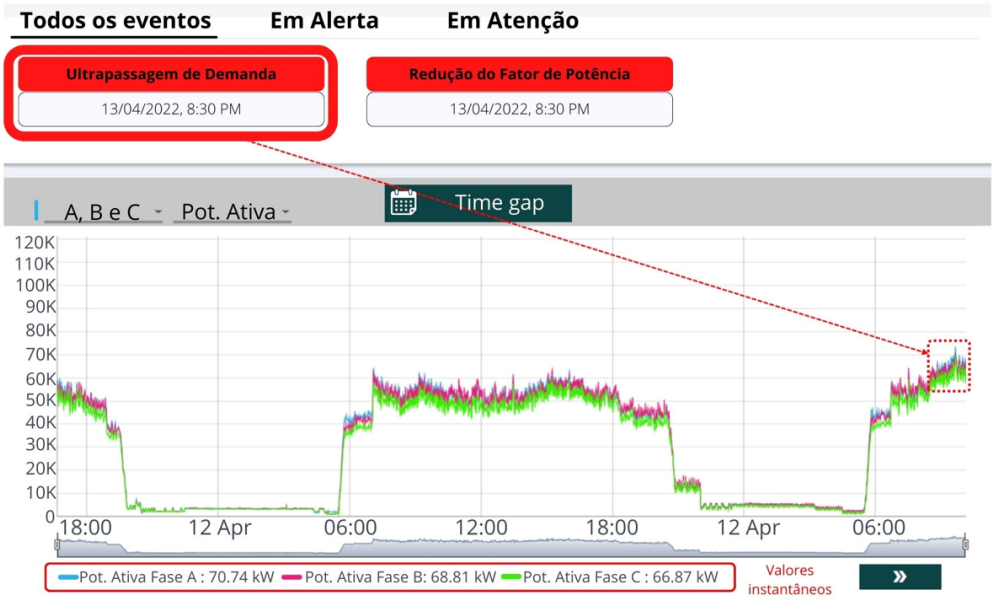


Figura 32: Evento de ultrapassagem de demanda.

Com base nesses resultados, infere-se que o sistema apresenta-se como uma ferramenta aliada da eficiência energética do local, pois viabiliza a gestão dos recursos energéticos e processos de auditoria energética, através da identificação de eventos e da quantificação parâmetros que possam implicar no aumento de custos ao consumidor ou que representem o uso ineficiente de energia elétrica.

6.5 Análises de qualidade de energia com o sistema proposto

O sistema desenvolvido também viabilizou a análise de eventos associados a qualidade de energia elétrica, dentro do contexto da qualidade do produto. Nesse sentido, conforme ilustrado nas Figuras 33 e 34, respectivamente, foi possível identificar eventos de subtensão e desiquilíbrios de tensão e corrente no circuito 10 do quadro. Esses eventos na rede elétrica podem causar avarias ou mal funcionamento

nos dispositivos presentes na rede elétrica. Dentro do contexto de uma policlínica odontológica, onde o sistema foi instalado, eventos de interrupção ou de mal funcionamento nos equipamentos presentes podem ocasionar sérios problemas em procedimentos clínicos e cirúrgicos realizados aos pacientes. Desse modo, os resultados apresentados através da interface desenvolvida mostram uma alternativa para mitigar esses eventos nos circuitos presentes na instalação.

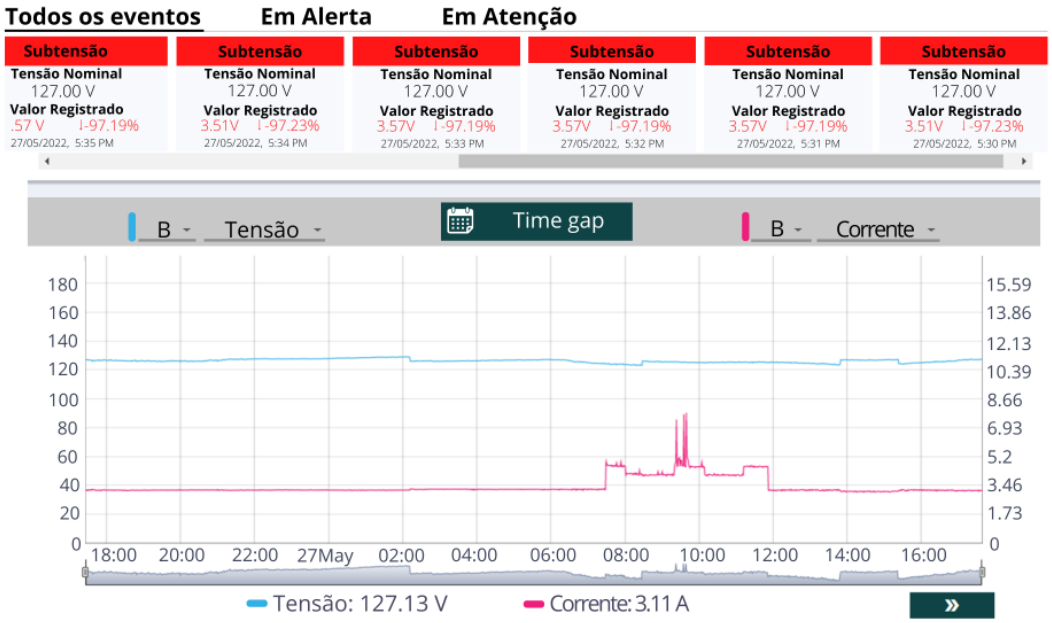


Figura 33: Eventos de subtensão no circuito 10.

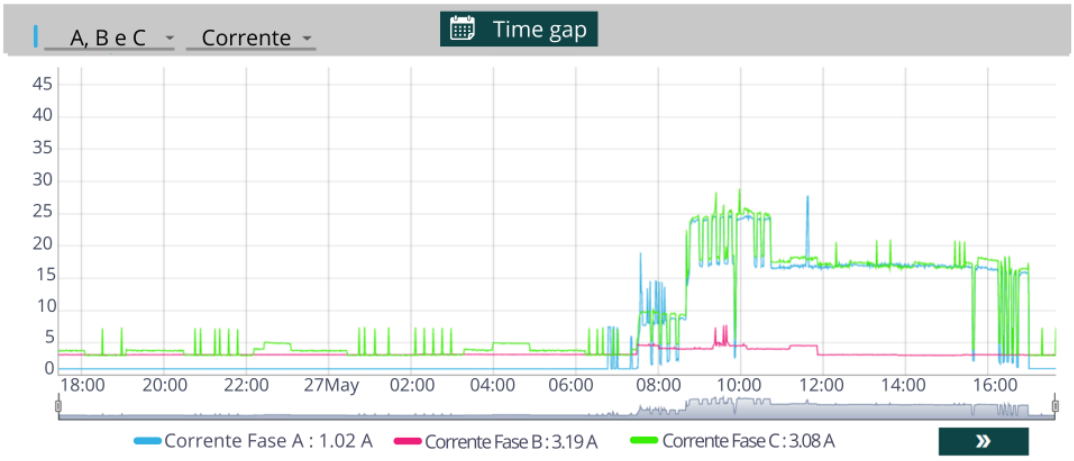


Figura 34: Desiquilíbrio das correntes trifásicas do circuito 10.

6.6 Discussão dos resultados

Com base nos testes e análises para validação das funções de *retrofit* e primitivas operacionais dos módulos de medição, notou-se a conformidade dos resultados com relação a arquitetura proposta. Dessa forma, infere-se que houve sucesso na adaptação do metamodelo SmartLVGrid para viabilizar as interfaces de monitoramento dos circuitos elétricos de uma instalação predial legada. Ressalta-se que ambos os ACUs viabilizaram a inserção de recursos de monitoramento remoto em uma rede de dispositivos a partir do *retrofit* realizado, com destaque ao ACU-BREAKER que possibilitou a obtenção dos parâmetros elétricos de cada circuito do quadro, seu domínio. Outra validação importante foi a troca de mensagens realizadas desde o centro supervisório (SCC) e cada ACU-BREAKER, conforme estabelecido nas premissas da camada de interoperabilidade.

Os parâmetros monitorados pelo sistema proposto são de suma importância para estudos de qualidade de energia e eficiência energética, uma vez que eles viabilizam a implantação de processos de auditoria energética para otimizar o uso da energia elétrica e reduzir custos ao consumidor final. Exemplos disso foram apresentados na verificação da ultrapassagem de demanda e no baixo fator de potência dos circuitos da instalação. Além disso, o sistema promove a mitigação e análise de anomalias relacionadas com distúrbios nos parâmetros elétricos no contexto da qualidade do produto.

A estratégia de retrofit utilizada viabilizou o aproveitamento de toda a infraestruturas legada, desde a rede de dados disponível aos materiais elétricos presentes na instalação. Apesar de se mostrar como um processo tecnológico gradual e não abrupto, a estratégia proposta agregou novos recursos para gestão energética predial. Haja vista a implantação de *clusters* a partir da arquitetura proposta, a estratégia proposta viabiliza a escalabilidade do sistema de monitoramento bem como o processamento distribuído dos parâmetros elétricos.

Os trabalhos encontrados na literatura, apresentados no Capítulo 2, não abordam o uso de metamodelos baseados na estratégia de *retrofit* para viabilizar a gestão energética. Além disso, grande parte desses trabalhos apresentam soluções específicas para casos pré-estabelecidos, sem o uso de modelos arquiteturais que viabilizem o aproveitamento da infraestrutura legada, de forma escalável, a fim de realizar o

monitoramento energético. Ainda, muitos deles tampouco abordam sobre o reaproveitamento dos recursos legados. Contudo, o sistema proposto neste trabalho distingue-se por apresentar um método, baseado no metamodelo SmartLVGrid, dedicado à gestão energética a partir do *retrofit* de circuitos elétricos legados de baixa tensão de um quadro de distribuição. Mais do que isso, a proposta apresenta um centro supervisório em nuvem, garantindo a segurança e o acesso aos dados independente da localidade, com recursos de *dashboards* para visualização do histórico dos parâmetros elétricos e de eventos associados a qualidade de energia elétrica e eficiência energética. Dessa forma, esta abordagem preenche uma lacuna observada no estado da arte e da técnica para monitoramento energético, de forma sistêmica e hierarquicamente bem definida.

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho, o metamodelo SmartLVGrid foi utilizado para viabilizar a gestão energética através do monitoramento de parâmetros elétricos em tempo real a partir do *retrofit* dos circuitos de um quadro de distribuição legado. Para isso, propôs-se uma arquitetura baseada na adaptação das interfaces físicas e lógicas do metamodelo original para que este novo perfil de carga, os circuitos de uma instalação predial, pudessem receber novas funcionalidades tecnológicas aproveitando ao máximo os elementos pré-existentes. Para validar a estratégia apresentada, foi necessário desenvolver o *hardware* e o respectivo *firmware* de um módulo de *retrofit* para monitoramento de grandezas elétricas, denominado de ACU-BREAKER. A este dispositivo foram atribuídas primitivas operacionais (DRFs, CSFs e ISFs), com base no metamodelo SmartLVGrid, para execução de suas funcionalidades. A fim de viabilizar a interconexão de cada ACU-BREAKER em uma rede de dados sem fio, utilizou-se um roteador Wi-Fi como concentrador do sistema, denominado de ACU-ROUTER na arquitetura proposta. O ACU-BREAKER e o ACU-ROUTER implementam, respectivamente, o papel de *operator* e *coordinator* do sistema. Além disso, foi desenvolvido um sistema supervisório (SCC) em nuvem para armazenamento dos parâmetros monitorados e disponibilização dos mesmos em *dashboards* interativos para análise da qualidade do produto e da eficiência energética. Os parâmetros monitorados foram as potências reativas, ativas e aparentes, o fator de potência, a corrente e a tensão eficaz nas três fases de cada circuito do quadro. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a proposta viabiliza a gestão energética por meio de um processo transparente de transição tecnológica, permitindo apro-

veitar ao máximo os a infraestrutura disponível dos circuitos legados pré-existentes. A arquitetura proposta é customizável às necessidades da instalação, uma vez que o *retrofit* pode-se aplicar conforme as interfaces físicas e lógicas disponíveis. Além disso, as camadas de *middleware* e de interoperabilidade do sistema possibilitam o desenvolvimento de forma sistêmica e viabilizam o processamento distribuído e a escalabilidade, para casos de expansão do monitoramento energético da instalação. Ressalta-se que, através dos resultados apresentados, é possível mitigar possíveis ultrapassagens de demanda, a redução do fator de potência e a conformidade dos parâmetros elétricos da instalação a partir da análise individual de cada circuito. Desse modo, executa-se um primeiro passo para implementação de um processo de auditoria energética. Para trabalhos futuros, sugere-se a implementação de outros *clusters* baseados na arquitetura proposta, incluindo análises de harmônicos presentes no sistema. Além disso, com os dados coletados, sugere-se a rotulação e tratamento dos dados para efetuar a previsão da demanda energética e de outras grandezas elétricas com o intuito de realizar o controle de demanda da instalação, utilizando dispositivos de acionamento elétrico para isso.

Referências Bibliográficas

[1] FERNANDES, R. A., GOMES, R. C. S., DIAS, O., CARVALHO, C., "A Novel Strategy for Smart Building Convergence Based on the SmartLVGrid Metamodel", *Energies*, v. 15, n. 3, 2022.

[2] MICELI, R., FAVUZZA, S., GENDUSO, F., "A perspective on the future of distribution: Smart grids, state of the art, benefits and research plans", *Energy and Power Engineering*, v. 5, 2013.

[3] GOMES, R. C. S., DA COSTA, C. T., SILVA, J. R., DA SILVA, P. R. N., "Automation meta-system applied to smart grid convergence of low voltage distribution legacy grids". In: *2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, pp. 400–413, 2017.

[4] GOMES, R. C. S., COSTA, C., SILVA, J., SICCHAR, J., "SmartLVGrid Platform—Convergence of Legacy Low-Voltage Circuits toward the Smart Grid Paradigm", *Energies*, v. 12, n. 13, pp. 2590, 2019.

[5] ROUTRAY, S. K., SHARMILA, K. P., JAVALI, A., GHOSH, A. D., SARANGI, S., "An Outlook of Narrowband IoT for Industry 4.0". In: *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, pp. 923–926, 2020.

[6] METALLIDOU, C. K., PSANNIS, K. E., EGYPTIADOU, E. A., "Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches", *IEEE Access*, v. 8, pp. 63679–63699, 2020.

[7] HÖGLUND, J., ILIC, D., KARNOUSKOS, S., SAUTER, R., GONCALVES DA SILVA, P., "Using a 6LoWPAN smart meter mesh network for event-driven monitoring of power quality". In: *2012 IEEE Third International*

Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 448–453, 2012.

[8] HOY, M. B., "Smart buildings: an introduction to the library of the future", *Medical reference services quarterly*, v. 35, n. 3, pp. 326–331, 2016.

[9] KARIMI, R., FARAHZADI, L., SEPASGOZAR, S. M., SARGOLZAEI, S., SEPASGOZAR, S. M. E., ZAREIAN, M., NASROLAHI, A., "Smart Built Environment Including Smart Home, Smart Building and Smart City: Definitions and Applied Technologies", *Advances and Technologies in Building Construction and Structural Analysis*, pp. 1–36, 2021.

[10] CAMPAGNA, N., CARUSO, M., CASTIGLIA, V., MICELI, R., VIOLA, F., "Energy Management Concepts for the Evolution of Smart Grids". In: *2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, pp. 208–213, 2020.

[11] SERI, F., ARNESANO, M., KEANE, M. M., REVEL, G. M., "Temperature Sensing Optimization for Home Thermostat Retrofit", *Sensors*, v. 21, n. 11, pp. 3685, 2021.

[12] AL-TURJMAN, F., ALTRJMAN, C., DIN, S., PAUL, A., "Energy monitoring in IoT-based ad hoc networks: An overview", *Computers Electrical Engineering*, v. 76, pp. 133–142, 2019.

[13] HOSSEIN MOTLAGH, N., MOHAMMADREZAEI, M., HUNT, J., ZAKERI, B., "Internet of Things (IoT) and the Energy Sector", *Energies*, v. 13, n. 2, 2020.

[14] SULTANIA, A. K., MAHFOUDHI, F., FAMAEY, J., "Real-Time Demand Response Using NB-IoT", *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, n. 12, pp. 11863–11872, 2020.

[15] ALAUDIN, A. H. B., ZAN, M. M. M., MAHMUD, A. R., YAHAYA, C. K. H. C. K., YUSOF, M. I., YUSSOFF, Y. M., "Real-Time Residential Energy Monitoring Device using Internet of Things". In: *2018 IEEE 8th Interna-*

tional Conference on System Engineering and Technology (ICSET), pp. 97–101, 2018.

[16] MURALIDHARA, S., HEGDE, N., PM, R., "An internet of things-based smart energy meter for monitoring device-level consumption of energy", *Computers Electrical Engineering*, v. 87, pp. 106772, 2020.

[17] MUDALIAR, M. D., SIVAKUMAR, N., "IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi", *Internet of Things*, v. 12, pp. 100292, 2020.

[18] GOVINDARAJAN, R., MEIKANDASIVAM, S., VIJAYAKUMAR, D., "Performance Analysis of Smart Energy Monitoring Systems in Real-time", *Engineering, Technology amp; Applied Science Research*, v. 10, n. 3, pp. 5808–5813, Jun. 2020.

[19] SHIVARAMAN, N., SAKI, S., LIU, Z., RAMANATHAN, S., EASWARAN, A., STEINHORST, S., "Real-Time Energy Monitoring in IoT-enabled Mobile Devices". In: *2020 Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE)*, pp. 991–994, 2020.

[20] AGYEMAN, M. O., AL-WAISI, Z., HOXHA, I., "Design and Implementation of an IoT-Based Energy Monitoring System for Managing Smart Homes". In: *2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, pp. 253–258, 2019.

[21] PROUZEAU, A., M.B., D., BALASUBRAMANIAM, M., HENRY, J., HOANG, N., DWYER, T., "Visual Analytics for Energy Monitoring in the Context of Building Management". In: *2018 International Symposium on Big Data Visual and Immersive Analytics (BDVA)*, pp. 1–9, 2018.

[22] AHMAD, T., ZHANG, D., "Using the internet of things in smart energy systems and networks", *Sustainable Cities and Society*, v. 68, pp. 102783, 2021.

[23] MOURA, P., MORENO, J. I., LÓPEZ LÓPEZ, G., ALVAREZ-CAMPANA, M., "IoT Platform for Energy Sustainability in University Campuses", *Sensors*, v. 21, n. 2, 2021.

[24] ZUNNURAIN, I., MARUF, M. N. I., RAHMAN, M. M., SHAFIULLAH, G., "Implementation of Advanced Demand Side Management for Microgrid Incorporating Demand Response and Home Energy Management System", *Infrastructures*, v. 3, n. 4, 2018.

[25] REDDY, V., RABBANI, M., ARIF, M. T., OO, A. M., "IoT for Energy Efficiency and Demand Management". In: *2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1–6, 2019.

[26] MADHU, G. M., VYJAYANTHI, C., MODI, C. N., "Design and Development of a Novel IoT based Smart Meter for Power Quality Monitoring in Smart Grid Infrastructure". In: *TENCON 2019 - 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pp. 2204–2209, 2019.

[27] ALONSO-ROSA, M., GIL-DE CASTRO, A., MEDINA-GRACIA, R., MORENO-MUNOZ, A., CAÑETE-CARMONA, E., "Novel Internet of Things Platform for In-Building Power Quality Submetering", *Applied Sciences*, v. 8, n. 8, 2018.

[28] VICIANA, E., ALCAYDE, A., MONTOYA, F. G., BAÑOS, R., ARRABAL-CAMPOS, F. M., MANZANO-AGUGLIARO, F., "An Open Hardware Design for Internet of Things Power Quality and Energy Saving Solutions", *Sensors*, v. 19, n. 3, 2019.

[29] KUMAR, L. A., INDRAGANDHI, V., SELVAMATHI, R., VIJAYAKUMAR, V., RAVI, L., SUBRAMANIYASWAMY, V., "Design, power quality analysis, and implementation of smart energy meter using internet of things", *Computers Electrical Engineering*, v. 93, pp. 107203, 2021.

[30] SINGH, R. R., S.M., Y., S.C., S., V., I., V., V., P., S., V., S., "IoT embedded cloud-based intelligent power quality monitoring system for industrial drive application", *Future Generation Computer Systems*, v. 112, pp. 884–898, 2020.

[31] ANAND, A., VASUDEVAN, R., BHATTACHARYA, S., ARUN, R., SIVANANTHAM, A., "Retrofit control solutions for old buildings using WSN".

In: *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, pp. 59–63, 2015.

[32] MEDINA, B. E., MANERA, L. T., "Retrofit of air conditioning systems through an Wireless Sensor and Actuator Network: An IoT-based application for smart buildings". In: *2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pp. 49–53, 2017.

[33] MARTÍN-GARÍN, A., MILLÁN-GARCÍA, J., BAÏRI, A., MILLÁN-MEDEL, J., SALA-LIZARRAGA, J., "Environmental monitoring system based on an Open Source Platform and the Internet of Things for a building energy retrofit", *Automation in Construction*, v. 87, pp. 201–214, 2018.

[34] IBASETA, D., GARCÍA, A., ÁLVAREZ, M., GARZÓN, B., DÍEZ, F., COCA, P., DEL PERO, C., MOLLEDA, J., "Monitoring and control of energy consumption in buildings using WoT: A novel approach for smart retrofit", *Sustainable Cities and Society*, v. 65, pp. 102637, 2021.

[35] ZHANG, J., MA, M., WANG, P., SUN, X.-D., "Middleware for the Internet of Things: A survey on requirements, enabling technologies, and solutions", *Journal of Systems Architecture*, v. 117, pp. 102098, 2021.

[36] MISHRA, L., VARMA, S., OTHERS, "Middleware technologies for smart wireless sensor networks towards internet of things: a comparative review", *Wireless Personal Communications*, v. 116, n. 3, pp. 1539–1574, 2021.

[37] LEE, E., SEO, Y.-D., OH, S.-R., KIM, Y.-G., "A Survey on Standards for Interoperability and Security in the Internet of Things", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 23, n. 2, pp. 1020–1047, 2021.

[38] RAHMAN, H., HUSSAIN, M. I., "A comprehensive survey on semantic interoperability for Internet of Things: State-of-the-art and research challenges", *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, v. 31, n. 12, pp. e3902, 2020.

[39] GIVEHCHI, O., LANDSDORF, K., SIMOENS, P., COLOMBO, A. W., "Interoperability for industrial cyber-physical systems: An approach for le-

gacy systems", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 13, n. 6, pp. 3370–3378, 2017.

[40] FORTES, S., SANTOYO-RAMÓN, J. A., PALACIOS, D., BAENA, E., MORA-GARCÍA, R., MEDINA, M., MORA, P., BARCO, R., "The Campus as a Smart City: University of Málaga Environmental, Learning, and Research Approaches", *Sensors*, v. 19, n. 6, 2019.

[41] ROALTER, L., KRANZ, M., MÖLLER, A., "A middleware for intelligent environments and the internet of things". In: *International conference on ubiquitous intelligence and computing*, pp. 267–281, 2010.

[42] ARAÚJO, P. R. C., FILHO, R. H., RODRIGUES, J. J., OLIVEIRA, J. P., BRAGA, S. A., "Middleware for integration of legacy electrical equipment into smart grid infrastructure using wireless sensor networks", *International Journal of Communication Systems*, v. 31, n. 1, pp. e3380, 2018.

[43] DE ARAÚJO, P. R. C., RODRIGUES, J. J., OLIVEIRA, J. P., BRAGA, S. A., OTHERS, "Infrastructure for integration of legacy electrical equipment into a smart-grid using wireless sensor networks", *Sensors*, v. 18, n. 5, pp. 1312, 2018.

[44] JEUSFELD, M. A., *Metamodel*. Springer US: Boston, MA, 2009.

[45] MOHANTY, S. P., *Nanoelectronic mixed-signal system design*. McGraw-Hill Education, 2015.

[46] ABDELOUAHID, R. A., MARZAK, A., SAE, N., "Towards to a New Metamodel of IoTs Interoperability". In: *2018 IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt)*, pp. 54–63, 2018.

[47] HASSINE, T. B., KHAYATI, O., GHEZALA, H. B., "An IoT domain metamodel and an approach to software development of IoT solutions". In: *2017 International Conference on Internet of Things, Embedded Systems and Communications (IINTEC)*, pp. 32–37, 2017.

[48] CICIRELLI, F., FORTINO, G., GUERRIERI, A., SPEZZANO, G., VINCI, A., "A meta-model framework for the design and analysis of smart cyber-physical environments". In: *2016 IEEE 20th International conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD)*, pp. 687–692, 2016.

[49] KUHN, V. N., GONZATTI, F., MIOTTO, M., FRANCHI, D., FARRET, F. A., "AVALIAÇÃO DO REAPROVEITAMENTO DE CALOR EM ELETROLISADORES ALCALINOS". In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, v. 1, pp. 1–8, 2019.

[50] MALFATTI, M. L. L., SANTOS, L., BELATI, E., MELO, J., "Mercado potencial de serviços ancilares de potência reativa providos pelas usinas de açúcar e álcool". In: *Simpósio Brasileiro de Automação Intelinte-SBAI*, pp. 1869–1876, 01 2019.

[51] OF ELECTRICAL, I., ENGINEERS, E., "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions", *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, pp. 1–50, 2010.

[52] TANG, Y., TEN, C.-W., WANG, C., PARKER, G., "Extraction of energy information from analog meters using image processing", *IEEE transactions on smart grid*, v. 6, n. 4, pp. 2032–2040, 2015.

[53] GUL, M., TAI, N., MAHAR, M. A., HUANG, W., LARIK, A. S., "Performance evaluation of energy meters under nonlinear loads", *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, v. 22, n. 2, pp. 133–138, 2017.

[54] CROTTI, G., GIORDANO, D., DELLE FERNINC, A., GALLO, D., LANDI, C., LUISO, M., "A testbed for static and dynamic characterization of DC voltage and current transducers". In: *2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, pp. 1–6, 2018.

[55] KABALCI, Y., KABALCI, E., "The low cost voltage and current measurement device design for power converters". In: *2016 8th International Conference*

on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), pp. 1–6, 2016.

[56] LOCCI, N., MUSCAS, C., SULIS, S., "Experimental comparison of MV voltage transducers for power quality applications". In: *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 92–97, 2009.

[57] ALEXANDER, C. K., SADIKU, M. N., *Fundamentos de circuitos elétricos*. AMGH Editora, 2013.

[58] CHAPMAN, S. J., *Fundamentos de máquinas elétricas*. AMGH Editora, 2013.

[59] MCNEILL, N., GUPTA, N., ARMSTRONG, W., "Active current transformer circuits for low distortion sensing in switched mode power converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 4, pp. 908–917, 2004.

[60] SALMAN, S., XIN, A., MASOOD, A., IQBAL, S., HANAN, M., JAN, M. U., KHAN, S., "Design and Implementation of Surge Protective Device for Solar Panels". In: *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 1–6, 2018.

[61] BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L., *Electronic Devices and Circuit Theory 11th ed.*. Pearson Education Inc., 2018.

[62] RIMON, K., SULAIMAN, S., OMAR, A., "System protection for lithium-ion batteries management system: A review", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJEECS)*, v. 13, 2019.

[63] MCCREARY, C. A., LAIL, B. A., "Choosing the appropriate Gas Discharge Tubes (GDT) for avionics lightning protection", *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, v. 2, n. 3, pp. 57–59, 2013.

[64] KAERIYAMA, S., UCHIDA, S., FURUMIYA, M., OKADA, M., MAEDA, T., MIZUNO, M., "A 2.5 kV Isolation 35 kV/us CMR 250 Mbps Digital Isolator in Standard CMOS With a Small Transformer Driving Technique", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 47, n. 2, pp. 435–443, 2012.

[65] EMILIO, M., *Data Acquisition Systems*. Springer, 2013.

[66] JÚNIOR, M. M. B., OTHERS, *Analisador de Potência para Aplicações em Eletrônica de Potência*. Florianópolis, SC, 2018.

[67] GODOI, J. M. A., *Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade*, Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, 2011.

[68] VIANA, A. N. C., BORTONI, E. D. C., NOGUEIRA, F. J. H., HADDAD, J., NOGUEIRA, L. A. H., VENTURINI, O. J., YAMACHITA, R. A., "Eficiência energética: fundamentos e aplicações", *Elektro, Universidade Federal de Itajubá, Excen, Fupai*, v. 1, 2012.

[69] ANEEL, "RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021", 2021.

[70] BORGES, R. C., RAMOS, K. Y., DE ARAUJO, N. C. C., DE ABREU, R. O., "Análise da estrutura tarifária de energia elétrica de uma unidade consumidora utilizando modelo de otimização para demanda contratada", *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 3, pp. 10060–10071, 2020.

[71] DE BARROS, B. F., *Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica*. Saraiva Educação SA, 2014.

[72] DECKMANN, S. M., POMILIO, J. A., "Avaliação da qualidade da energia elétrica", *available in http://www. dsce. fee. unicamp. br/antenor/pdffiles/qualidade/b5. pdf* , 2017.

[73] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8-Qualidade da Energia Elétrica", *Resolução Normativa*, v. 469, 2012.

[74] OF ELECTRICAL, I., ENGINEERS, E., "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)*, pp. 1–98, 2019.

[75] KAGAN, N., ROBBA, E. J., SCHMIDT, H. P., *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. Editora Blucher, 2009.

[76] GUEDES, A. R., DE ANDRADE, D. N., CAMARGO, E., "Estudo dos impactos da falta de investimento na qualidade de energia elétrica no Brasil", *X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação–Universidade do Vale do Paraíba*, 2006.

[77] OF ELECTRICAL, I., ENGINEERS, E., "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators", *IEEE Std 112-2017 (Revision of IEEE Std 112-2004)*, pp. 1–115, 2018.

[78] CARVALHO, L., CAMPOS, R., RICARDO, M., "Context-aware low-energy Wi-Fi sensor networks for e-health". In: *2013 IEEE 15th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom 2013)*, pp. 361–365, 2013.

[79] BIANCHI, V., BONI, A., FORTUNATI, S., GIANNETTO, M., CARERI, M., DE MUNARI, I., "A Wi-Fi cloud-based portable potentiostat for electrochemical biosensors", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 69, n. 6, pp. 3232–3240, 2019.

[80] OHNO, S., TERADA, K., YOKOTANI, T., ISHIBASHI, K., "Distributed MQTT broker architecture using ring topology and its prototype", *IEICE Communications Express*, v. 10, n. 8, pp. 582–586, 2021.

[81] TOLDINAS, J., LOZINSKIS, B., BARANAUSKAS, E., DOBROVOLSKIS, A., "MQTT Quality of Service versus Energy Consumption". In: *2019 23rd International Conference Electronics*, pp. 1–4, 2019.

[82] GAROUSI, V., FELDERER, M., KARAPIÇAK, Ç. M., YILMAZ, U., "Testing embedded software: A survey of the literature", *Information and Software Technology*, v. 104, pp. 14–45, 2018.

[83] ALI, A., MING, Y., CHAKRABORTY, S., IRAM, S., "A comprehensive survey on real-time applications of WSN", *Future internet*, v. 9, n. 4, pp. 77, 2017.

[84] DENARDIN, G. W., BARRIQUELLO, C. H., *Sistemas operacionais de tempo real e sua aplicação em sistemas embarcados*. Editora Blucher, 2019.

[85] BARRY, R., "Mastering the freertos real time kernel", *Real Time Engineers Ltd*, 2016.

[86] LABROSSE, J., *MicroC/OS-II: The Real Time Kernel*. CRC Press, 2002.

[87] HUANG, S., LI, W., "A method of cross-platform network data exchange". In: *2016 International Conference On Communication Problem-Solving (ICCP)*, pp. 1–2, 2016.

[88] ESPRESSIF, "ESP32 Series Datasheet", 2022.

[89] ESPRESSIF, "ESP32-WROOM-32E and ESP32-WROOM-32UE Datasheet", 2022.

[90] DEVICES, A., "Datasheet ADE7758 - Poly Phase Multifunction Energy Metering IC with Per Phase Information", 2011.

[91] GUIMARÃES, A., FREITAS, T., GRINER, H., DE ALMEIDA, T., "Smart energy monitoring system with ADE7758 IC". In: *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, pp. 1–5, 2015.

[92] ACCUENERGY, "AcuCT Hinged Series Datasheet", 2021.

[93] INCORPORATED, D., "AZ23C2V7 - AZ23C51 - 300mW DUAL SURFACE MOUNT ZENER DIODE", 2018.

[94] BOURNS, "2035-xx-SM Precision Gas Discharge Tube Surge Protector", 2015.

[95] BOURNS, "MF-RM Series - Line Voltage PTC Resettable Fuses", 2015.

[96] SKYWORKS, "Si8660/61/62/63 Data Sheet", 2021.

[97] MAIER, A., SHARP, A., VAGAPOV, Y., "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things". In: *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, pp. 143–148, 2017.

[98] EQUIPMENT, M. M. T., "PPS 400.3: Three-phase Portable Power Source (12 A or 120 A / 300 V)", 2004.

[99] INTELBRAS, “Ficha Técnica: AP 310”, 2021.

[100] TRIPON, T.-D., ADELA GABOR, G., VALENTINA MOISI, E., “Angular and Svelte Frameworks: a Comparative Analysis”. In: *2021 16th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, pp. 1–4, 2021.

[101] PIMENTEL, V., NICKERSON, B. G., “Communicating and displaying real-time data with websocket”, *IEEE Internet Computing*, v. 16, n. 4, pp. 45–53, 2012.

Apêndice A

Artigos Publicados

A.1 Artigos Publicados em Revista

1. FERNANDES, Rubens A., GOMES, R. C. S., DIAS, O., CARVALHO, C. "A Novel Strategy for Smart Building Convergence Based on the SmartLVGrid Metamodel". Energies, v. 15, n. 3, p. 1016, 2022.

A.2 Artigos Aceitos em Eventos Científicos

1. FERNANDES, Rubens A., GOMES, R. C. S., DIAS, O., CARVALHO, C. TORNÉ, I. G., COSTA, K. S., SILVA, H. L. N., ROCHA, G. S. "Uma estratégia de *retrofit* para monitoramento energético em sistemas prediais legados". Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE. Santa Maria, 2022.

Apêndice B

Mensagens utilizadas em formato JSON

Pacote de requisição dos parâmetros elétricos (a)

```
{
  "cmd":"get_measurements"
}
```

Pacote de resposta com os parâmetros elétricos (b)

```
{
  "cmd":"get_measurements",  "datetime": string, /*timestamp da amostra/*
  "avrms": float, /*tensão eficaz da fase A*/  "bvrms": float, /*tensão eficaz da fase B*/
  "cvrms": float, /*tensão eficaz da fase C*/   "airms": float, /*corrente eficaz da fase A*/
  "birms": float, /*corrente eficaz da fase B*/  "cirms": float, /*corrente eficaz da fase C*/
  "apf": float, /*fator de potência da fase A*/  "bpf": float, /*fator de potência da fase B*/
  "cpf": float, /*fator de potência da fase C*/  "awatt": float, /*potência útil da fase A*/
  "bwatt": float, /*potência útil da fase B*/   "cwatt": float, /*potência útil da fase C*/
  "ava": float, /*potência aparente da fase A*/  "bva": float, /*potência aparente da fase B*/
  "cva": float, /*potência aparente da fase C*/  "avar": float, /*potência reativa da fase A*/
  "bvar": float, /*potência reativa da fase B*/  "cvar": float, /*potência reativa da fase C*/
  "awatth": float, /*energia útil da fase A*/  "bwatth": float, /*energia útil da fase B*/
  "cwatth": float, /*energia útil da fase C*/  "avah": float, /*energia aparente da fase A*/
  "bvah": float, /*energia aparente da fase B*/  "cvah": float, /*energia aparente da fase C*/
  "avarh": float, /*energia reativa da fase A*/  "bvarh": float, /*energia reativa da fase B*/
  "cvarh": float, /*energia reativa da fase C*/  “freq.”: float, /*frequência da rede*/
}
```

Figura 35: Mensagens de requisição (a) e resposta (b) com os parâmetros elétricos.

Pacote de requisição com os parâmetros de calibração (a)

```
{
  "cmd":"set_calibration_ref",
  "fullScaleVoltage": float, /*fundo de escala de tensão*/
  "fullScaleCurrent": float, /*fundo de escala de corrente*/
  "timePowerGain": float, /*tempo de acúmulo da energia (1 segundo)*/
  "vn": float, /*tensão nominal do circuito*/
  "vref": float, /*tensão medida do circuito*/
  "in": float, /*corrente nominal do circuito*/
  "iref": float /*corrente medida do circuito*/
  “whn": float, /*energia ativa fornecida*/
  “whref": float, /*energia ativa obtida*/
  “varhn": float, /*energia reativa fornecida*/
  "varhref": float, /*energia reativa obtida*/
  "vahn": float, /*energia aparente fornecida */
  "vahref": float, /*energia aparente obtida */
}
```

Pacote de resposta à requisição de calibração (b)

```
{
  "cmd":"set_calibration_ref"
}
```

Figura 36: Mensagens de requisição (a) e resposta (b) para ajustes dos parâmetros de calibração.

Pacote de requisição para ajustes de configuração (a)

```
{
  "cmd":"set_register",
  "unique_id": string, /*identificação do ACU*/
  "broker_address": string, /*endereço de IP do broker MQTT*/
  "publish_topic": string, /*tópico de publicação dos dados*/
  "subscribe_topic": string, /*tópico de assinatura dos dados*/
  "ssid_name": string, /*SSID da rede Wi-Fi*/
  "ssid_key": string, /*chave de segurança da rede Wi-Fi*/
}
```

Pacote de resposta dos ajustes de configuração (b)

```
{
 "cmd":"set_register“
}
```

Figura 37: Mensagens de requisição (a) e resposta (b) para ajustes dos parâmetros de configuração.

Apêndice C

Layout do ACU-BREAKER

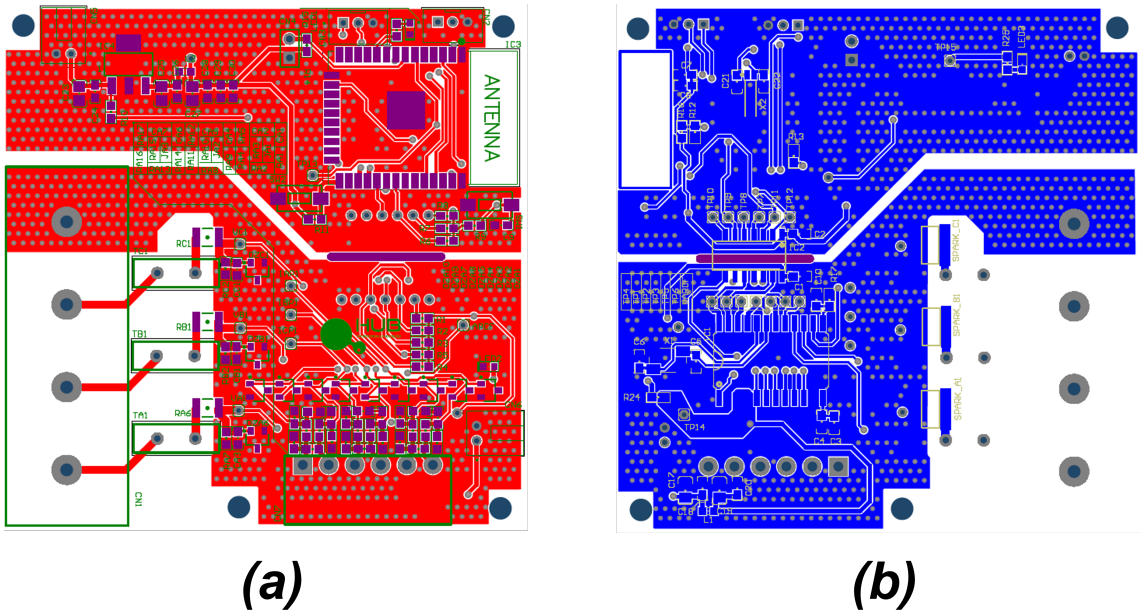


Figura 38: *Top view* (a) e *botton view* (b) do *layout* do ACU-BREAKER.