



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALYSON LUCAS FERREIRA SALES

Especificação e simulação de um protótipo de medidor inteligente para monitoramento de
energia elétrica em redes inteligentes

Cabo de Santo Agostinho - PE

2024

ALYSON LUCAS FERREIRA SALES

Especificação e simulação de um protótipo de medidor inteligente para monitoramento de energia elétrica em redes inteligentes

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo.

Cabo de Santo Agostinho - PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S163e Sales, Alyson Lucas Ferreira
Especificação e simulação de um protótipo de medidor inteligente para monitoramento de energia elétrica em redes inteligentes / Alyson Lucas Ferreira Sales. - 2024.
74 f. : il.
- Orientador: Marcel Ayres de Araujo.
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2024.
1. medidor inteligente. 2. rede elétrica inteligente. 3. medição bidirecional. I. Araujo, Marcel Ayres de, orient. II. Título

CDD 621.3

ALYSON LUCAS FERREIRA SALES

Especificação e simulação de um protótipo de medidor inteligente para monitoramento de energia elétrica em redes inteligentes

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 04/03/2024.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo
Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE

Prof. Dr. Fernando Gonçalves de Almeida Neto
Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE

Prof. Dr. Reinel Beltran Aguedo
Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha família, por sonhar junto comigo e proporcionar os meios necessários para tornar esse sonho realidade.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Luciana e ao meu pai Ailson, meus maiores exemplos, pelo esforço e empenho para garantir meu acesso a uma educação de qualidade e por todo apoio, carinho e incentivo.

Aos meus amigos e amigas, que tornaram o período da graduação mais divertido e enriquecedor.

Aos meus professores, que foram fundamentais para meu desenvolvimento pessoal e profissional, destaco especialmente meu orientador, Marcel, cujo apoio foi fundamental ao longo da maior parte da minha jornada acadêmica.

RESUMO

Em decorrência do crescente aumento do consumo de energia elétrica na sociedade moderna, a lacuna entre a oferta e demanda de eletricidade tem sido acentuada, gerando uma sobrecarga nas redes elétricas existentes e o aumento da produção de energia por meio de fontes não-renováveis, que impactam de forma negativa o meio ambiente. Estes e outros desafios emergentes se encontram em foco para adequar os sistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição a demanda deste novo padrão de consumo, tendo a geração de energia por meio de fontes renováveis, a geração distribuída e as tecnologias da informação e comunicação aplicadas aos sistemas de medição como principais meios para fomentar a adaptação do sistema elétrico e abrir caminho para criação das redes elétricas inteligentes. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo principal o desenvolvimento de um protótipo de medidor inteligente de energia elétrica, de forma que um usuário com acesso à internet possa consultar as informações, em tempo real, das medições obtidas pelo equipamento situado no campo. Vale ressaltar que as informações fornecidas pelo protótipo devem possuir bidirecionalidade tanto na medição de potência quanto no fluxo de informações, de modo que o equipamento tenha a capacidade de enviar e receber informações de forma simultânea e de distinguir o fluxo de potência para melhor se adequar a aplicações em redes elétricas inteligentes. Durante o desenvolvimento do trabalho, inicialmente uma revisão bibliográfica foi feita para identificar os pontos cruciais na operação de equipamentos correlatos, como: características operacionais, método de processamento dos sinais, protocolos de comunicação adotados e métodos para coleta, armazenamento e exibição dos dados; com o intuito de desenvolver um protótipo que mantém sua contemporaneidade frente aos crescentes avanços tecnológicos na área, e principalmente, com o foco no custo benefício, visando sua implementação prática decorrente de projetos futuros com versões aprimoradas. Como resultado do trabalho, foram projetadas as partes de *hardware* e *software* do protótipo. O *hardware* inclui a fonte de alimentação, o método de medição, o sistema de condicionamento de sinais de tensão e corrente, o microcontrolador e o protocolo de comunicação. Já a parte de *software* abrange o tipo de banco de dados, o algoritmo de comunicação, uma interface para consulta e disponibilização dos dados medidos e o algoritmo de medição.

Palavras-chave: medidor inteligente; rede elétrica inteligente; medição bidirecional.

ABSTRACT

As a result of the growing consumption of electricity in modern society, the gap between electricity supply and demand has been accentuated, generating an overload in existing electricity grids and an increase in energy production from non-renewable sources, which has a negative impact on the environment. These and other emerging challenges are in focus in order to adapt the generation, transmission and distribution electrical systems to the demands of this new consumption pattern, with renewable energy generation, distributed generation and information and communication technologies applied to metering systems as the main means of promoting the adaptation of the electrical system and paving the way for the creation of smart electrical grids. In this context, the main objective of this research is to develop a prototype smart electricity meter, so that a user with internet access can consult the information, in real time, of the measurements obtained by the equipment located in the field. It is worth noting that the information provided by the prototype must be bidirectional in terms of both power measurement and information flow, so that the equipment can send and receive information simultaneously and to distinguish the power flow to better suit applications in smart grids. During the development of the work, a bibliographical review was initially carried out to identify the crucial points in the operation of related equipment, such as: operational characteristics, signal processing method, communication protocols adopted and methods for collecting, storing and displaying data; in order to develop a prototype that maintains its contemporaneity in the face of growing technological advances in the area, and above all, with a focus on cost-effectiveness, with a view to its practical implementation resulting from future projects with improved versions. As a result of the work, the hardware and software parts of the prototype were designed. The hardware includes the power supply, the measurement method, the voltage and current signal conditioning system, the microcontroller and the communication protocol. The software part includes the type of database, the communication algorithm, an interface for consulting and making measured data available and the measurement algorithm.

Keywords: smart meter; smart grid; bidirectional measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de eletricidade no mundo 1990-2021.....	15
Figura 2 – Geração de eletricidade por fonte no mundo 1990-2021.....	15
Figura 3 – Dinâmica de funcionamento de um SM.....	26
Figura 4 – Princípio de medição em quatro quadrantes	32
Figura 5 – Diagrama de blocos da estrutura do protótipo.	37
Figura 6 – Fonte de alimentação.....	39
Figura 7 – Transformador de potencial adotado.....	40
Figura 8 – Transformador de corrente adotado.	41
Figura 9 – Circuito de condicionamento do sinal de tensão.....	42
Figura 10 – Circuito de condicionamento do sinal de corrente.....	43
Figura 11 – Módulo DS3231.	44
Figura 12 – Placa NodeMCU-32S.....	45
Figura 13 – Pinagem da placa NodeMCU-32S.	45
Figura 14 – Estrutura do bando de dados.	48
Figura 15 – Interface para exibição das medições.....	51
Figura 16 – Interface para pesquisa.....	52
Figura 17 – Filtro passa-baixas e resultados de simulação.....	56
Figura 18 – Simulação do circuito de aquisição e condicionamento de tensão	57
Figura 19 – Resultados de simulação do circuito de aquisição e condicionamento de tensão.....	57
Figura 20 – Simulação do circuito de aquisição e condicionamento de corrente.....	58
Figura 21 – Resultados de simulação do circuito de aquisição e condicionamento de corrente	59
Figura 22 – Circuito para simulação de funcionamento do protótipo	61
Figura 23 – Resultados da simulação do protótipo com carga RL.....	62
Figura 24 – Resultados da simulação do protótipo com carga RC.....	63
Figura 25 – Resultados da simulação do protótipo com carga RLC	64
Figura 26 – Indicação da inversão no fluxo de potência	65
Figura 27 – Gráficos de dispersão das medidas de tensão, corrente e potência ativa	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos transformadores trifásicos de 15kV a seco com 45 kVA de potência nominal.....	39
Tabela 2 – Relação de preços	46
Tabela 3 – Comparação dos resultados das simulações	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AMR	<i>Automatic Meter Reading</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CI	Circuito Integrado
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EmonLib	<i>Energy Monitoring Library</i>
GNU	<i>General Public License</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IP	<i>Internet Protocol</i>
IP ₂ C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
MDSM	<i>Meter Data Management System</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
OIML	<i>Organisation Internationale de Métrologie Légale</i>
PDO	<i>PHP Data Object</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RF	Rádio Frequência
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SG	<i>Smart Grid</i>
SM	<i>Smart Meter</i>
SoC	<i>System-on-a-chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TC	Transformador de Corrente
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
TP	Transformador de Potencial
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ESTADO DA ARTE	17
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	Geral	22
1.4.2	Específicos	22
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E FUNCIONALIDADES	24
2.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	27
2.2.1	Sensores	27
2.2.2	Condicionamento dos sinais	29
2.2.3	Relógio de tempo real.....	29
2.2.4	Microcontrolador	29
2.3	ALGORITMO DE MEDIÇÃO	30
2.4	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	31
2.4.1	Visão geral da AMI	32
2.4.2	Canais de comunicação	33
2.4.2.1	Canais de comunicação com fio	34
2.4.2.2	Canais de comunicação sem fio	34
2.5	ARMAZENAMENTO DE DADOS	36
3	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	37
3.1	FINALIDADE DO PROTÓTIPO	37
3.2	FONTE DE ALIMENTAÇÃO	38
3.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	38

3.3.1	Sensor de tensão.....	40
3.3.2	Sensor de corrente	40
3.3.3	Condicionamento dos sinais	41
3.3.4	Relógio de tempo real.....	43
3.3.5	Microcontrolador	44
3.4	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	44
3.5	ORÇAMENTO.....	46
3.6	BANCO DE DADOS.....	46
3.7	AMBIENTE VIRTUAL.....	47
3.7.1	Preparação da interface para trabalhar com o ESP32	49
3.7.2	Conexão com o WiFi	49
3.7.3	Algoritmo de comunicação	49
3.7.4	Algoritmo para consulta e exibição dos dados.....	50
3.7.5	Algoritmo de medição	53
4	RESULTADOS.....	55
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

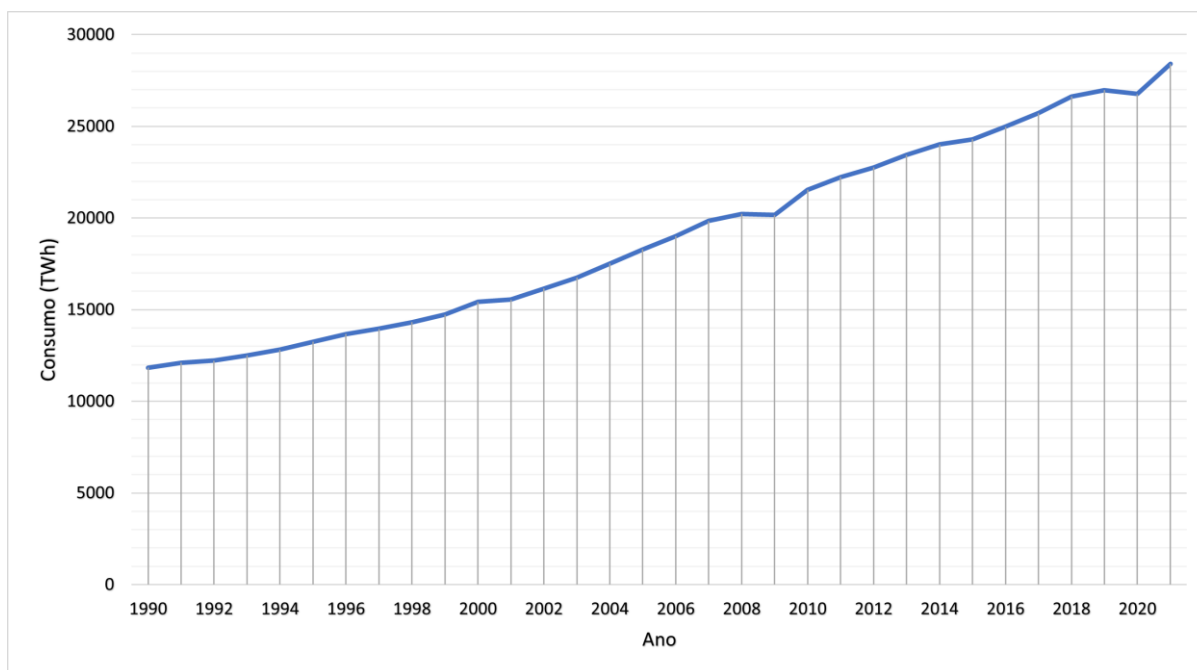
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na atualidade, a energia elétrica se mostra um recurso essencial para a vida em sociedade, operando como a força motriz que permite o pleno funcionamento dos equipamentos e o cumprimento de seus mais diversos propósitos. A crescente inserção de dispositivos eletroeletrônicos na sociedade moderna tem refletido em um crescimento acelerado do consumo de energia elétrica, corroborando com o surgimento de uma lacuna na relação de oferta e demanda de energia, enquanto os métodos convencionais de geração, transmissão e distribuição de energia já foram amplamente explorados e se encontram sobrecarregados.

Dados da *International Energy Agency* (IEA) referentes ao consumo e geração de energia elétrica apontam o comportamento crescente do consumo em todo o mundo, exposto na Figura 1, e o aumento preocupante na geração a partir de fontes não-renováveis, tendo o carvão mineral como principal insumo, como pode ser observado na Figura 2, tornando evidente a necessidade de adequação do sistema elétrico e dos métodos de geração de energia para lidar com este crescente aumento de demanda energética.

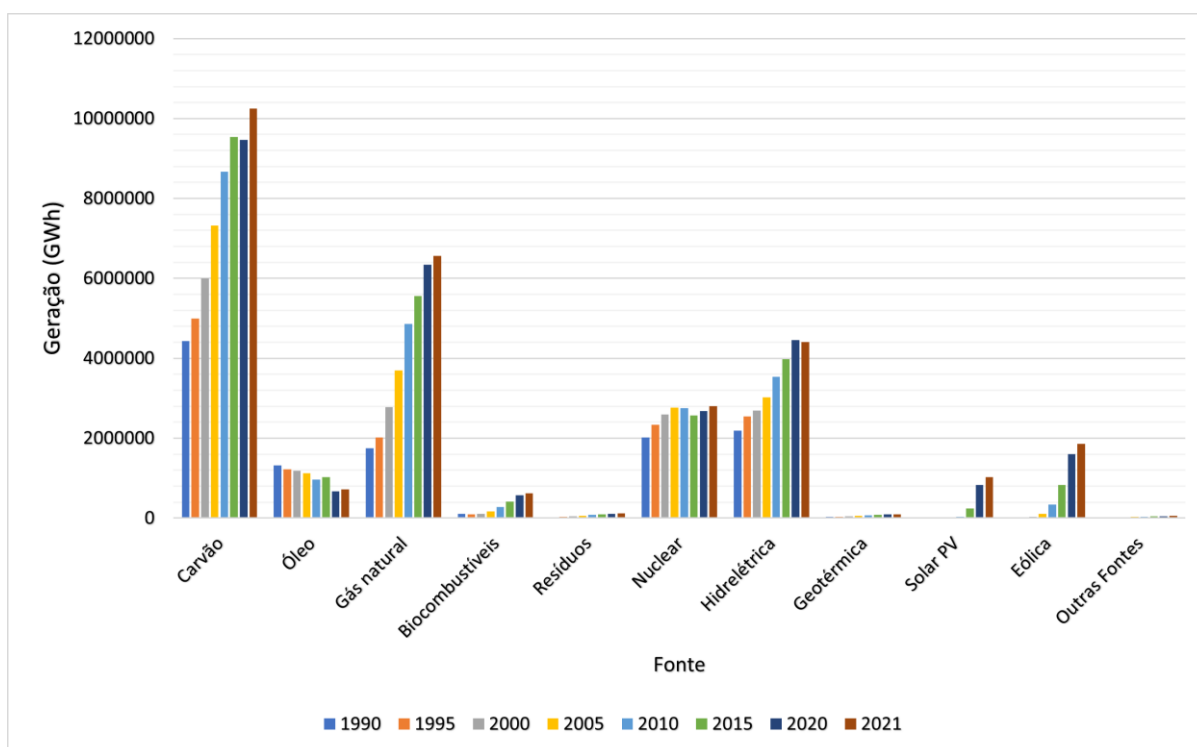
Como resposta ao crescimento excessivo do consumo de energia elétrica, a busca por soluções para lidar com este cenário se encontra em foco e alternativas estão surgindo para modernizar o sistema elétrico atual visando torná-lo mais confiável, responsivo, flexível, sustentável e eficiente. Dentre estas alternativas, destacam-se a geração a partir de fontes renováveis e a geração distribuída, que possuem potencial para contribuir com a diminuição do uso de fontes não-renováveis, impactando diretamente na redução da emissão de gases do efeito estufa. Além disso, a implementação de redes elétricas inteligentes, que se baseia na modernização da infraestrutura atual do sistema elétrico fomentada pela implementação de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), proporcionando um melhor fluxo de informações (em tempo real) de ponta-a-ponta no sistema, permitindo que as concessionárias aprimorem o gerenciamento do sistema elétrico de distribuição, independentemente de sua complexidade, e facilitando o acesso dos clientes às suas informações de consumo (Hashmi, 2011).

Figura 1 – Consumo de eletricidade no mundo 1990-2021.



Fonte: Adaptado de IEA, 2024.

Figura 2 – Geração de eletricidade por fonte no mundo 1990-2021.



Fonte: Adaptado de IEA, 2024.

A rede elétrica inteligente, em inglês *Smart Grid* (SG), tem um papel fundamental para o pleno funcionamento do sistema elétrico no futuro, pois apresenta uma verdadeira revolução

quando comparada com o sistema elétrico convencional, com uma ampla gama de aplicações que podem ser realizadas a partir dos dados coletados da rede, trazendo benefícios tanto para as concessionárias de energia quanto para os consumidores. Com relação a uma definição formal para SG, não há um consenso, pois conceitos foram desenvolvidos por diversas fontes ao redor do mundo. Contudo, sintetizando os principais conceitos referentes a SG, uma definição sucinta pode ser apresentada da seguinte forma:

Uma rede elétrica inteligente é uma rede de eletricidade que usa tecnologias digitais e outras tecnologias avançadas, como tecnologias de comunicação ciber-seguras, sistemas automatizados e de controle de computador, de forma integrada para ser capaz de monitorar e gerenciar de forma inteligente e segura o transporte de eletricidade de todas as fontes de geração para atender economicamente às diversas demandas de eletricidade dos usuários finais (Salman, 2017, p. 5, tradução nossa).

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento e evolução da Infraestrutura de Medição Avançada, em inglês *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), é considerado o principal pilar para a modernização do sistema elétrico convencional e a concretização dos conceitos de SG. Esta infraestrutura é o elo que interliga todo o sistema elétrico moderno, sendo composta por dispositivos e ferramentas de medição, comunicação, análise, armazenamento e processamento de dados, operando como uma ponte entre a concessionária e o consumidor final (Salman, 2017). Com o medidor inteligente de energia, em inglês *Smart Meter* (SM), como uma peça-chave em sua estrutura, pois a análise dos dados fornecidos por equipamentos deste tipo instalados em diversos pontos da rede pode proporcionar o monitoramento preciso do sistema. Atuando de modo a coletar e disponibilizar os dados necessários de forma automatizada. Dada a demanda elevada de dispositivos deste tipo, pesquisas buscando métodos aprimorados e de custo reduzido para seu desenvolvimento foram intensificadas, visto que um custo elevado pode inviabilizar a implementação de uma AMI, e conseqüentemente, das SGs (Bahmanyar et al., 2016).

Neste contexto, o presente trabalho terá como foco o desenvolvimento de um protótipo de medidor inteligente trifásico de energia elétrica, pautando-se na viabilidade econômica, interoperabilidade e grau de contemporaneidade do projeto frente aos avanços tecnológicos. Para tanto, uma revisão da literatura foi feita objetivando a identificação e levantamento de características destes dispositivos, como: funcionalidades, características operacionais necessárias para o funcionamento do SM e para o tratamento das informações provenientes de suas medidas, além de métodos de comunicação e armazenamento de dados.

1.3 ESTADO DA ARTE

Nesta seção são apresentadas referências relevantes para o desenvolvimento do protótipo do medidor inteligente de energia elétrica, visando entender os procedimentos que estão sendo realizados nesta linha de pesquisa para adequar o projeto a ser desenvolvido ao contexto atual.

No trabalho desenvolvido em (Wolaniuk, 2011), o autor propõe um SM para linhas de média tensão (até 34,5 kV), que se destaca por conta de sua portabilidade e praticidade de instalação. A principal motivação do trabalho é minimizar as perdas não-técnicas do sistema elétrico, tendo o medidor como um agente preventivo para identificar possíveis fraudes ou furtos, visando combater estes eventos e melhorar a eficiência de consumo da rede para tornar o sistema elétrico mais sustentável. Os meios para aquisição dos sinais de tensão e corrente, topologias da rede de distribuição e métodos para realizar a medição das grandezas de interesse são discutidos, bem como os padrões exigidos para implementação prática do projeto. Por fim, o autor apresenta a estrutura do medidor desenvolvido, tendo como diferencial seu *design* inovador, formado pelos seguintes componentes: um circuito divisor resistivo (resistores específicos para esta aplicação foram criados) para obter os sinais de tensão, um Transformador de Corrente (TC) para obter os dados de corrente (desenvolvido pelo autor), um MCU MSP430FE427A da *Texas Instruments*, uma bateria não recarregável para sua alimentação, e um módulo de rádio CC1101, da mesma fabricante do MCU, para comunicação com dispositivos externos. O MCU utilizado conta com um ADC Σ - Δ de 16 bits e um módulo integrado de contabilização de energia, dispensando a necessidade da criação de um algoritmo para computação de grandezas como corrente e tensão de RMS, além de admitir valores positivos e negativos em suas entradas analógicas, dispensando a necessidade de um circuito de condicionamento de sinal complexo.

No artigo apresentado em (Rafiei; Eftekhari, 2012), os autores expõem uma abordagem prática da comunicação na medição inteligente utilizando uma combinação de protocolos *Power Line Communication* (PLC) e WiFi, que pode ser usada tanto para a Leitura Automática de Medidores, em inglês *Automatic Meter Reading* (AMR), quanto para a AMI. As vantagens e desvantagens dos métodos de comunicação com e sem fio são discutidas, focando nos protocolos PLC e Wifi, discorrendo sobre as particularidades de cada um deles e, por fim, uma topologia para realizar a comunicação entre os SMs e a AMI foi elaborada utilizando

protocolos de comunicação PLC, WiFi e fibra óptica, que fornecem um canal para comunicação bidirecional seguro e de alta velocidade, garantindo o fluxo contínuo de informações no sistema e evitando atrasos e congestionamentos.

Na revisão realizada em (Barai; Krishnan; Venkatesh, 2015), os autores discorrem sobre o sistema de medição inteligente tendo como foco o levantamento das características e funcionalidades dos SMs e do sistema de gerenciamento de dados do medidor, do inglês *Meter Data Management System* (MDMS), apresentando soluções comerciais para ambos, que se adequam aos padrões da *International Electrotechnical Commission* (IEC) ou do *American National Standards Institute* (ANSI), visando a interoperabilidade ente os sistemas e equipamentos desenvolvidos, tais como os modelos comerciais de SMs de empresas como: GE energy, Landis+Gyr, Sensus; e soluções para o MDMS fornecidas por empresas como: Siemens, Oracle, IBM. Abordam também, a estrutura da SG, apresentando os conceitos e partes que compõem a AMI e o MDMS, seguidos por uma explicação que deixa clara a necessidade por soluções deste tipo para modernizar o sistema elétrico, além de pontuar os efeitos ocasionados por sua implementação. Uma revisão sobre os princípios de funcionamento dos SMs e a infraestrutura de dados necessária para lidar com as informações fornecidas é feita, expondo os pontos cruciais para o funcionamento adequado dos dispositivos, destacando as características que compõem as vertentes analógicas e digitais dos SMs, além disto, os autores ressaltam que os principais parâmetros calculados durante a medição são: corrente e tensão *Root Mean Square* (RMS), potência ativa e reativa, fator de potência e frequência. Por fim, pontuam as principais funcionalidades para os SMs como: leitura remota do medidor, gerenciamento remoto de medidores, conexão/desconexão remota, preço dinâmico e resposta à demanda, detecção e correção de violação e roubo, entre outras; e para o sistema de medição inteligente, como: comunicação bidirecional, detecção de faltas, redução do período de pico, serviço remoto, entre outras.

No trabalho desenvolvido em (Brito, 2016), um protótipo de SM monofásico é proposto, baseando-se no projeto de código aberto *Open Energy Monitor*, que tem como foco fomentar o desenvolvimento de dispositivos e aplicações de código aberto voltadas ao monitoramento da rede elétrica. Neste caso, o autor utilizou para aquisição da corrente o sensor de corrente SCT-013 e para aquisição da tensão um Transformador de Potencial (TP), ambos acompanhados de circuitos para realizar o condicionamento dos sinais, adequando os níveis de tensão de acordo com a referência de tensão do microcontrolador para melhorar a utilização do conversor A/D integrado e obter uma representação fiel do sinal coletado. O Arduino UNO foi adotado para realizar o processamento do sinal, esta plataforma de desenvolvimento se baseia

no microcontrolador, do inglês *Microcontroller Unit* (MCU), ATmega328P de 8 bits, além de contar um conversor analógico-digital, do inglês *Analog-to-Digital Converter* (ADC), de 10 bits integrado. O algoritmo de medição foi estruturado utilizando bibliotecas existentes para aplicações correlatas e desenvolvido no IDE do Arduino. Para compor o sistema de comunicação, foi utilizado o módulo Ethernet Shield W5100 em conjunto com a aplicação *Blynk*, utilizada como interface para armazenamento e exibição dos dados obtidos.

Em (Bahmanyar et al., 2016), o artigo discorre sobre os sistemas de medição inteligente emergentes, expondo a dinâmica destes dispositivos quando inseridos na rede e os desafios encontrados para sua implementação. Aborda também, o processo de modernização nas redes de distribuição italianas, que têm um papel fundamental para a adequação da rede elétrica aos diversos cenários que podem surgir durante seu funcionamento. Além de expor a arquitetura do sistema de gerenciamento dos medidores de baixa tensão implantada na Itália pela Enel denominado “Telegestore”, que se baseia na integração dos equipamentos compõem a AMI para fomentar a melhoria do sistema. Um novo sistema de medição é proposto pelo projeto FLEXMETER, visando desenvolver e implementar uma arquitetura de medição flexível em uma estrutura de *software* distribuída com uma maior interação entre as concessionárias e consumidores mediante a implementação de uma interface amigável para visualização dos dados de consumo. Medidores inteligentes comerciais que estão sendo utilizados nas unidades consumidoras italianas são apresentados, destacando suas características operacionais, como: medição de energia ativa, reativa e de potência, vida útil de 15 anos, taxa de falha inferior a 0,3 %, autoconsumo de potência inferior a 2 W/fase, autodiagnóstico diário dos principais componentes e funções. Além de apresentar o protótipo de medidor fabricado pela STMicroelectronics, o STCOMET, projetado para utilização em rede de baixa tensão e em transformadores de média para baixa tensão, possuindo as seguintes características principais: modem de comunicação via PLC, um painel LCD, um núcleo de alto desempenho e sistema de monitoramento de eletricidade, umidade e temperatura de código aberto.

Já em (Pereira, 2016), o autor propõe um SM para aplicação na rede de distribuição, construído a partir de um conceito modular, que permite a alteração dos sistemas de medição e comunicação, facilitando assim a manutenção e possíveis atualizações que podem ser feitas no dispositivo. Durante a elaboração do trabalho, o autor discute pontos importantes como: conceitos de SG, sistemas de comunicação, enfatizando a importância da segurança no compartilhamento dos dados, onde destacam-se os protocolos PLC e de rádio frequência, e as normas que regem o desenvolvimento dos SM impostas por órgãos como o IEC e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). A estrutura do protótipo

desenvolvido é composta pelos seguintes componentes: fonte de alimentação, circuito divisor resistivo para aquisição da tensão, um TC acompanhado de um resistor *shunt* para aquisição da corrente, ambos contam com um filtro antiserrilhamento para mitigar os ruídos provenientes de componentes harmônicas elevadas, um MCU de baixo custo, e um sistema de comunicação local e remoto. Vale ressaltar que o diferencial deste trabalho foi o desenvolvimento dos algoritmos de medição que proporcionaram a redução da complexidade dos cálculos e, conseqüentemente, o uso de um MCU simples que melhorou a relação custo-benefício do projeto.

Em (Diniz; Evangelista; Alexandria, 2017), um protótipo monofásico é proposto utilizando o mesmo princípio de funcionamento do desenvolvido em (Brito, 2016), porém, com componentes distintos. Neste caso, foram utilizados para aquisição da tensão um TP e para aquisição da corrente o sensor ACS712-30, ambos acompanhados de circuitos para realização do condicionamento dos sinais, o MCU utilizado foi o PIC18F26K80 de 8 bits da Microship que possui um ADC de 12 bits integrado, o algoritmo de medição foi desenvolvido no MPLABX, o sistema de comunicação é composto por um módulo *bluetooth* e um módulo *Real Time Clock* (RTC), utilizando o protocolo I²C como meio de comunicação dos periféricos com o MCU. Por fim, a interface de exibição das medições foi desenvolvida em Java em conjunto com um aplicativo compatível com Android.

Em (Santos, 2018) foi desenvolvido um Dispositivo Eletrônico Inteligente, em inglês *Intelligent Electronic Device* (IED), bastante flexível que pode atuar como um medidor inteligente, sendo capaz de realizar a aquisição de dados de diversas grandezas como: tensão, corrente, temperatura e pressão. Possuindo como componentes principais o Circuito Integrado (CI) *Tiva™ C Series Connected Launchpad* (EK-TM4C1294XL) e o circuito de condicionamento do sinal, desenvolvido pelo autor, que conta com uma grande flexibilidade quanto aos níveis de tensões de saída, frequências de corte e valores de ganho.

No artigo exposto em (Carratú et al., 2018), os autores desenvolveram um protótipo de modo que, além de realizar as medidas da rede elétrica, ele também funciona como um repetidor wM-Bus, ampliando assim a área de comunicação entre os dispositivos que compõem a AMI, já que ele pode se comportar como um componente que faz a intermediação da comunicação entre os SM e a infraestrutura de comunicação da AMI, coletando os dados e os repassando para o concentrador local. Para isto, um protocolo de comunicação baseado em uma modificação do protocolo wM-Bus foi elaborado pelos autores, visando obter um "repetidor inteligente" no contexto de uma SG. O protótipo proposto foi desenvolvido seguindo os padrões da *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML), garantindo canais

de comunicação bidirecionais para possibilitar sua implementação em uma AMI. Ele é baseado em um MCU STM32F205RBT6, da STMicroelectronics, composto por uma unidade de medição de tensão e corrente baseada no CI ADE7913 que conta com três ADCs Σ - Δ , dois dedicados à medição de tensão e um à medição de corrente, e duas interfaces de comunicação: uma sem fio baseada no módulo de rádio WMBUS, modificado pelos autores, a 169 MHz que permite a comunicação com o concentrador de dados como nó escravo ou como repetidor, e uma com fio baseada no protocolo *Controller Area Network* (CAN). A comunicação destes periféricos com o MCU é feita por meio do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI). A amostragem dos sinais é definida em uma frequência de 1024 MHz com o intuito de sobreamostrar os sinais de entrada, resultando no efeito de espalhamento do ruído de quantização, para melhorar a fidelidade do sinal coletado. Para garantir o funcionamento deste protótipo em condições não senoidais, na etapa de processamento dos sinais, os autores escolheram adotar a abordagem de Fryze (Paredes, 2011), processando os dados coletados no domínio do tempo para realizar a medição das grandezas de interesse.

Em (Sousa et al., 2023), os autores desenvolveram um medidor inteligente de baixo custo com medição de qualidade de energia para aplicações de redes inteligentes, capaz de medir potência, fator de potência, frequência e taxas de distorção harmônica. Baseado no microcontrolador ESP32, o medidor incorpora componentes de fácil acesso, oferecendo uma solução econômica e garantindo um desempenho confiável. Ao contrário dos medidores tradicionais que calculam parâmetros elétricos usando circuitos de *hardware* complexos, neste caso os cálculos são realizados diretamente no MCU, simplificando o *design* do *hardware*, abordagem que reduz os custos de produção, reduz o consumo de energia e melhora a precisão dos medidores, ao mesmo tempo que proporciona flexibilidade para atualizações e integração com aplicações de IoT e inteligência artificial. Além de possuir conectividade sem fio integrada, permitindo que os dados coletados sejam transmitidos a sistemas de monitoramento remoto para análise.

No estudo realizado em (Yunus et al., 2023), é proposto um sistema que utiliza ferramentas IoT para automatizar as leituras dos medidores de energia, viabilizando o monitoramento e controle remoto do uso de energia. O dispositivo desenvolvido inclui um MCU Arduino, transformador de potencial, transformador de corrente, retificador, relés, módulo SIM800L GSM/GPRS, alarme, display LCD e fonte de alimentação. Ademais, o medidor permite o monitoramento em tempo real do consumo de energia, independentemente da localização geográfica, usando comunicação de dados sem fio por meio de um módulo GSM. Dessa forma, o sistema proposto oferece um monitoramento econômico de medidores

de energia, gerando relatórios de consumo diários acessíveis via site ou aplicativo Android. Além do pagamento de contas pelo aplicativo, automatiza a leitura dos medidores, eliminando processos manuais e garantindo precisão. O sistema também inclui recursos como controle remoto de aparelhos e detecção segura de adulterações em medidores, contribuindo para a eficiência energética e beneficiando consumidores e distribuidores com uma infraestrutura de rede mais inteligente.

Por fim, em (Orlando et al., 2023), os autores propõem uma infraestrutura de medição distribuída que permite comunicação bidirecional, autoconfiguração e recursos de atualização automática para redes inteligentes. Introduzindo um padrão de design para um medidor inteligente trifásico habilitado para IoT que pode executar vários algoritmos para gerenciamento de rede inteligente, além de discutir os fluxos de comunicação entre os atores identificados na solução e apresentar um estudo de caso e uma análise experimental da infraestrutura de medição. A infraestrutura oferece suporte à interoperabilidade com *software* de terceiros e aproveita a nuvem e a computação de ponta para novos serviços inteligentes. Ao abordar os desafios da tecnologia de redes inteligentes, a infraestrutura proposta visa desbloquear novos serviços e oportunidades de negócios no mercado energético. Projetado para ser altamente escalável, descentralizado e flexível, permitindo melhorias futuras e serviços inovadores na tecnologia de redes inteligentes. A infraestrutura proposta é baseada em uma arquitetura de *software* distribuída e em um medidor inteligente trifásico conectado à internet. O medidor foi projetado para ser altamente flexível, suportando aplicações integradas e remotas, e é capaz de autoconfiguração e atualização automática.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Geral

Especificar e simular um medidor inteligente trifásico de energia elétrica com bidirecionalidade de informações, tanto para diferenciação do fluxo de potência quanto para comunicação, buscando proporcionar ao usuário final a capacidade de monitorar uma variedade de parâmetros essenciais, tais como: corrente, tensão, fator de potência, potência ativa, reativa e aparente, por meio de equipamentos ou dispositivos conectados à internet, tendo em vista as novas ferramentas e tecnologias disponibilizadas pelas *Smart Grids*.

1.4.2 Específicos

- Pesquisa dos principais dispositivos inteligentes existentes na literatura para monitoramento, medição, e comunicação em aplicações de *Smart Grids*;
- Desenvolvimento do sistema de *hardware* para um medidor inteligente com a capacidade de realizar comunicação e medição bidirecional tendo em vista sua viabilidade técnica e econômica;
- Estruturação de uma plataforma de armazenamento de dados para monitoramento da rede elétrica por meio de medidores inteligentes;
- Desenvolvimento de uma interface de disponibilização dos dados de energia elétrica para o usuário;
- Simulação e testes via *software* do protótipo do medidor inteligente para validação de resultados.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura do trabalho foi dividida em 5 capítulos, dispostos da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizado para elaboração do trabalho, expondo as principais características e funcionalidades de um medidor inteligente, abordando de forma detalhada os aspectos dos sistemas que podem integrar o equipamento, além de expor uma visão geral da infraestrutura de medição avançada vislumbrada para inserção do protótipo, no contexto das SGs, os diferentes tipos de comunicação que podem ser utilizados em aplicações correlatas e os requisitos para o armazenamento e gerenciamento das informações. No Capítulo 3 o desenvolvimento do protótipo é exposto, citando a finalidade de aplicação, o projeto dos componentes de *hardware* dos sistemas de aquisição e processamento de dados, o protocolo de comunicação adotado, o algoritmo de medição e comunicação, e a criação do ambiente virtual para o armazenamento e exibição das informações, especificando os procedimentos necessários para viabilizar o funcionamento. Já no Capítulo 4 são expostos os resultados das simulações realizadas para comprovar o funcionamento dos sistemas projetados para aquisição de dados, além de demonstrar precisão e exatidão do algoritmo de medição desenvolvido, atestando assim a viabilidade técnica do protótipo e viabilizando a etapa de implementação prática. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões feitas a partir do desenvolvimento do presente trabalho e sugestões de trabalhos futuros seguindo a mesma linha de pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O foco desta seção é apresentar os conceitos e componentes fundamentais para o desenvolvimento de um medidor inteligente de energia elétrica, por meio de uma sondagem feita a partir do material disponível na literatura de assuntos correlatos, discutindo pontos como: princípios de funcionamento, aquisição e condicionamento dos sinais, algoritmo de medição, métodos de comunicação e armazenamento de dados.

2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E FUNCIONALIDADES

Existem dois tipos de medidores de energia digitais, o primeiro tipo é o medidor eletrônico, que trabalha coletando e adequando os sinais de tensão e corrente da rede, com o seu funcionamento baseado em circuitos eletrônicos digitais, fornecendo um método eficaz para processar os sinais obtidos pelos sensores e estimar as grandezas de interesse. Este tipo de medidor dispensa todo o aparato mecânico necessário para o funcionamento de dispositivos analógicos com a mesma finalidade, apresentando vantagens significativas, como: melhor visualização dos dados obtidos, melhora da leitura e maior capacidade de armazenamento de dados. O segundo tipo é o medidor inteligente, que possui o mesmo princípio de funcionamento do medidor eletrônico, porém, integra ferramentas de TIC ao dispositivo, possibilitando a leitura e envio de dados de forma facilitada.

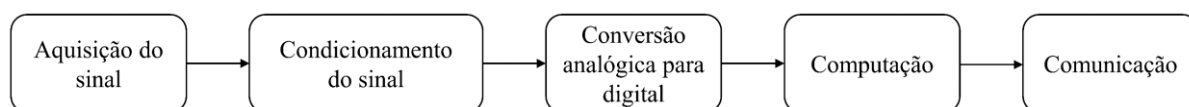
Mediante aos avanços nos campos da engenharia elétrica e eletrônica, e da TIC, por meio da combinação de componentes de *hardware* e *software*, tornou-se possível a criação de tecnologias capazes de fomentar a modernização dos dispositivos elétricos de medição de energia, que são muito importantes para o Sistema Elétrico de Potência (SEP), pois atuam ativamente no monitoramento e no faturamento deste sistema. Os dispositivos de medição estão sendo constantemente aprimorados com passar do tempo, como, por exemplo, na migração de dispositivos analógicos de medição para dispositivos eletrônicos, que trouxeram consigo diversas melhorias tanto para o operador do sistema elétrico quanto para as concessionárias e consumidores, que passaram a contar com medições e armazenamento de informações mais confiáveis. Porém, foi a inserção de ferramentas de TIC nos dispositivos de medição que proporcionou um grande salto para área de monitoramento do SEP, podendo até vislumbrar a concretização do conceito de SG, ao passo que dispositivos deste tipo sejam inseridos na rede. Há quatro pontos cruciais para o funcionamento dos SMs (Barai; Krishnan; Venkatesh, 2015):

- I. **Fonte de alimentação do sistema:** deve ser segura e confiável, fornecendo os níveis de tensão e corrente adequados para o pleno funcionamento de todos os equipamentos eletrônicos que compõem o medidor inteligente, independente de flutuações na tensão da rede ou picos inesperados, podendo contar também com uma reserva própria de energia (bateria).
- II. **Coleta e processamento dos sinais:** é de suma importância determinar um método eficiente para a coleta das amostras de tensão e corrente que serão utilizadas como base para o algoritmo de medição realizar as operações matemáticas e estimar o valor das grandezas a serem medidas, esta coleta deve estar atrelada ao processamento desse sinal, que deve ser condicionado e encaminhado ao MCU, que atua como o cérebro de todo sistema, sendo responsável pela realização de todos os cálculos necessários e por disponibilizar os dados para comunicação externa (com um servidor em nuvem, por exemplo).
- III. **Algoritmo responsável pela medição:** o algoritmo deve ser desenvolvido aliando um poder de processamento mínimo ao melhor grau de exatidão para as grandezas de interesse, visando contribuir na viabilidade econômica do dispositivo, reduzindo os custos com o MCU e melhorando a relação custo-benefício do SM. Além de garantir a capacidade de realizar medições corretas independente do fluxo da corrente e da característica da rede, o que caracteriza a medição bidirecional.
- IV. **Comunicação do medidor com o banco de dados:** este é um ponto chave do funcionamento do medidor inteligente, pois qualquer alteração indevida dos dados no sistema pode causar inúmeros problemas, como o risco eminente de ataques cibernéticos que podem desativar o SEP local, já que estes medidores podem servir de porta de acesso ao SEP global. O desenvolvimento de um canal de comunicação seguro é estritamente necessário para que os SMs não se tornem um elo fraco no sistema. Logo, a definição de um padrão de comunicação criptografado pode ser uma solução para esta vulnerabilidade, para que exista liberdade de comunicação entre os dispositivos da rede, mesmo quando esta comunicação precise ser feita por um canal considerado inseguro.

De modo simplificado, pode-se definir a dinâmica de funcionamento de um SM da seguinte forma: (i) amostras de tensão e corrente da rede são coletadas por meio de sensores, transdutores ou instrumentos adequados para reduzir a amplitude do sinal de entrada; (ii) um

circuito para realizar o condicionamento do sinal é utilizado para mitigar ruídos e adequar os sinais coletados aos níveis de tensão para trabalhar com os circuitos digitais; (iii) um ADC é usado para converter os sinais analógicos em digitais; (iv) os sinais do ADC são enviados para o MCU, que realiza o processamento dos dados e os disponibiliza para comunicação com a AMI (Weranga; Kumarawadu; Chandima, 2014). Para facilitar o entendimento, um diagrama de blocos da dinâmica de funcionamento do SM é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Dinâmica de funcionamento de um SM.



Fonte: Adaptado de Weranga; Kumarawadu; Chandima, 2014.

A principal função dos SM é obter os valores de grandezas elétricas da rede, que podem ser: potência ativa, potência aparente, potência reativa, fator de potência, distorções harmônicas, tensão, corrente, frequência e parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), e enviar as informações obtidas para que elas possam ser tratadas de forma adequada.

Graças a integração das novas ferramentas de processamento e comunicação, o SM ganha uma ampla gama de funcionalidades, deixando de ser um componente passivo, que apenas realiza a medição no sistema, passando a ser um componente ativo, que pode interagir com outros dispositivos sem nenhuma intervenção humana. Dentre as principais funcionalidades desejáveis para os SMs expostas em (Barai; Krishnan; Venkatesh, 2015), vale ressaltar as seguintes:

- Leitura remota do medidor;
- Carregar dados de perfil do usuário;
- Acesso a dados medidos sob demanda para clientes e terceiros autorizados;
- Opção de tarifas variáveis de tempo de uso;
- Gerenciamento remoto de medidores;
- Conexão / desconexão remota;
- Preço dinâmico e resposta à demanda;
- Detecção e correção de violação e roubo;

Por fim, vale ressaltar que, de acordo com a legislação vigente na localidade em que o

dispositivo pode ser implementado, as funcionalidades mínimas para os SMs podem variar. No Brasil, por exemplo, existem critérios impostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do documento que estipula os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 5, que definem os requisitos mínimos para os componentes que integram os sistemas de medição, como: medidores, TP, TC, e canais de comunicação, conforme sua finalidade.

2.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Conforme apresentado em (Lima, 2015), “O sistema de aquisição de dados compreende todas as etapas envolvidas no processo de aquisição, condicionamento, processamento e monitoramento dos sinais de tensão e corrente elétrica de uma carga monofásica”. Também é possível expandir esta abordagem para cargas polifásicas, uma vez que o princípio de medição é similar, necessitando de uma adequação na quantidade de componentes que integram o sistema de aquisição de dados, e no método de processamento dos dados, de acordo com o tipo de alimentação da carga.

Como já foi comentado, os processos de aquisição e condicionamento são necessários para realizar o tratamento dos sinais, possibilitando que o processamento das informações por meio dos circuitos digitais ocorra de maneira correta e otimizada. Nesta seção serão discutidos os componentes primordiais que compõem o sistema de aquisição de dados, e servem como base para o funcionamento de diversos circuitos integrados dedicados a medição de grandezas específicas.

2.2.1 Sensores

Há três tipos principais de sensores que podem ser utilizados para coleta de amostras de tensão e corrente da rede, que são os seguintes:

- Transformadores

Os transformadores são dispositivos essenciais para realizar a aquisição de dados de tensão e corrente no SEP, visto que sua utilização torna possível a redução da amplitude do sinal de entrada dos dispositivos de medição. Podendo ser utilizado tanto para coletar amostras de tensão e corrente da rede, quanto para integrar o sistema de alimentação do medidor, além de proporcionar uma isolamento galvânica entre o medidor e a rede elétrica. Os transformadores são dispositivos elétricos que funcionam baseados nos princípios

do eletromagnetismo, em que dois enrolamentos de fios sem contato físico entre si interagem por meio de um circuito magnético. Os transformadores de potencial (TPs) e transformadores de corrente (TCs) são projetados de modo a ter um comportamento mais próximo possível do ideal, para que o rebaixamento de tensão ou corrente ocorra de forma condizente com o número de espiras presentes nos enrolamentos, com as mesmas características e sem defasagem entre os sinais, atuando apenas na redução da amplitude do sinal. Desta forma, possibilitando uma análise precisa da rede elétrica a partir dos dados coletados pelos TPs e TCs, e por este motivo eles também são conhecidos como transformadores de instrumentação (Umans, 2014).

- Sensores de efeito hall

Os sensores de efeito hall, cujos dispositivos são sensíveis a variações de campo magnético, característica que os tornam adequados para aquisição de sinais de corrente, podendo ser utilizados para medir sinais de correntes contínuas e alternadas. Explorando o princípio da força de Lorentz, os sensores de efeito hall utilizam o campo magnético gerado pela passagem da corrente no circuito para gerar um sinal de saída proporcional. Sensores deste tipo apresentam vantagens como: versatilidade, isolamento galvânica, confiabilidade e baixo custo; tendo como principal desvantagem sua sensibilidade com relação a temperatura de operação (Balbiot; Brusamarello, 2019).

- Sensores resistivos

Os sensores resistivos, que podem ser utilizados tanto para aquisição de sinais de tensão, utilizando o método divisor de tensão, quanto para sinais de corrente, utilizando um resistor do tipo *shunt*, responsável por converter um sinal de corrente em um sinal de tensão proporcional baseando-se no princípio da Lei de Ohm. A simplicidade para implementação de sensores deste tipo é um ponto forte, porém há algumas desvantagens que limitam sua utilização em aplicações nos sistemas de medição, tais como: perdas por efeito Joule, capacitâncias e indutâncias parasitas, e ausência de isolamento galvânico (Balbiot; Brusamarello, 2019).

2.2.2 Condicionamento dos sinais

O condicionamento dos sinais de tensão e corrente se faz necessário para melhorar a conversão dos sinais analógicos em digitais, mostrando-se bastante pertinente para manter a qualidade e confiabilidade das medidas fornecidas pelo SM. Este processo ocorre após a coleta das amostras realizada pelos sensores, atuando de forma a adequar o intervalo de variação dos sinais, por meio da utilização de circuitos que possibilitam sua amplificação ou redução, de acordo com a faixa de operação do ADC utilizado, que comumente varia entre 0 e 5 V ou 0 e 3,3 V, visando reduzir o ruído e aproveitar a resolução máxima que o conversor pode proporcionar. Após passar por esta etapa de adequação, uma filtragem é realizada nos sinais com o objetivo de prevenir interferências causadas por conta de ruídos indesejados. Por fim, o sinal condicionado e pronto para digitalização é enviado para o ADC, que realiza a conversão por meio da amostragem do sinal analógico, e posteriormente envia o sinal digital ao MCU para que ele possa processá-lo.

2.2.3 Relógio de tempo real

O relógio de tempo real, do inglês *Real Time Clock (RTC)*, é um componente fundamental para os SMs, visto que ele é responsável por fornecer informações precisas de data e hora, possibilitando que os instantes de tempo sejam relacionados aos valores obtidos a partir do processamento dos sinais coletados da rede. Sua utilização proporciona um armazenamento preciso das informações fornecidas pelo medidor e a sincronização dos dispositivos, melhorando o monitoramento da rede. Alguns CIs possuem uma estrutura de *hardware* nativa que realiza esta função, porém, em grande parte dos SM, um periférico externo capaz de se comunicar com o MCU do dispositivo é utilizado para realizar esta função (Weranga; Kumarawadu; Chandima, 2014).

2.2.4 Microcontrolador

O MCU é um tipo especial de dispositivo eletrônico, prático e flexível, que tem componentes/ferramentas de *hardware* e *software* em um único circuito integrado, possuindo um baixo custo, baixo consumo e um maior enfoque na portabilidade do sistema como um todo. Estas características tornam-no um dispositivo ideal para ser utilizado na realização de atividades específicas que não demandam uma capacidade de processamento elevada, nas

quais, ao implementar tipos de programações diferentes é possível realizar várias aplicações com apenas um MCU. Existe uma grande variedade de dispositivos deste tipo atualmente, com uma ampla gama de funcionalidades, integrando componentes de *hardware* como, por exemplo: RTC, ADC, *Digital-to-Analog Converter (DAC)*, *Digital Signal Processor (DSP)*, barramentos para comunicação, entre outros. No mercado é possível encontrar diversas placas de desenvolvimento, que integram funções relevantes e podem ser utilizadas para aplicações como a do tema central desta pesquisa. Como já foi comentado anteriormente, o MCU é um componente indispensável para o funcionamento do SM, tido como o cérebro do dispositivo, pois sua utilização torna possível a introdução do algoritmo de medição, além de possibilitar a integração de periféricos ao dispositivo, logo, a determinação de um componente adequado é primordial.

2.3 ALGORITMO DE MEDIÇÃO

Frente o aumento da inserção de dispositivos não lineares que produzem componentes harmônicos elevados na rede, o padrão IEEE 1459-2000 foi introduzido para normalizar as medições de grandezas elétricas, possibilitando o levantamento do consumo por meio de uma restrição nas componentes do sinal consideradas para fins de faturamento, de modo que apenas a frequência fundamental do sinal é considerada na tarifação do consumo de clientes convencionais. Ademais, a potência ativa e a reativa também devem ser medidas para que o consumidor seja cobrado pela energia que consome, e penalizado pelo consumo elevado de potência reativa, tornando necessário que o algoritmo de medição de potência seja capaz de medir a potência ativa e reativa, e distinguir o fluxo de potência na rede (Li et al., 2018). Elaborar um método para realizar a medição destas grandezas é um ponto chave para obter dados confiáveis e possibilitar o diagnóstico adequado da rede elétrica. Nesta seção serão apresentados os conceitos que possibilitam a medição bidirecional e os conceitos teóricos das principais abordagens que podem ser utilizadas para o cálculo das grandezas de interesse.

Existem dois tipos de abordagens que permitem estimar a potência a partir dos sinais de tensão e corrente do sistema, sendo a primeira introduzida por Constantin Budeanu, baseando-se na análise dos sinais no domínio da frequência, utilizando a representação em Séries de Fourier dos sinais de tensão e corrente como meio para estimar os valores de potência. Esta abordagem é tida como o método mais utilizado para o cálculo de potências na engenharia elétrica, pois possibilita diversas aplicações como, por exemplo, a simplificação de problemas complexos e a análise detalhada de grandezas que estão de alguma forma relacionadas com o

espectro de frequência dos sinais (Belchior, 2014; Li et al., 2018; Paredes, 2011). A segunda abordagem foi introduzida por Fryze, baseando-se na análise dos sinais no domínio do tempo, dispensando a necessidade da mudança no domínio do sinal, o que reduz a complexidade dos cálculos e colabora para facilitar aplicações práticas, utilizando a aproximação das integrais que definem os sinais para estimar os valores de potência. Vale ressaltar que este método leva em consideração dois tipos de correntes, denominadas corrente ativa e não ativa, que são ortogonais entre si, gerando dois termos de potência, um correspondente a potência ativa, e outro a potência não ativa (ou aparente) (Belchior, 2014; Carratú et al., 2018; Paredes, 2011).

Nada impede que abordagens baseadas em relações descritas no tempo e na frequência sejam utilizadas em conjunto com o intuito de melhorar o método de medição do dispositivo, conforme o protótipo proposto em (Carratú et al., 2018), o qual é uma prova disto, porém cabe a utilização da criatividade e discernimento para desenvolver novos projetos a partir das abordagens apresentadas.

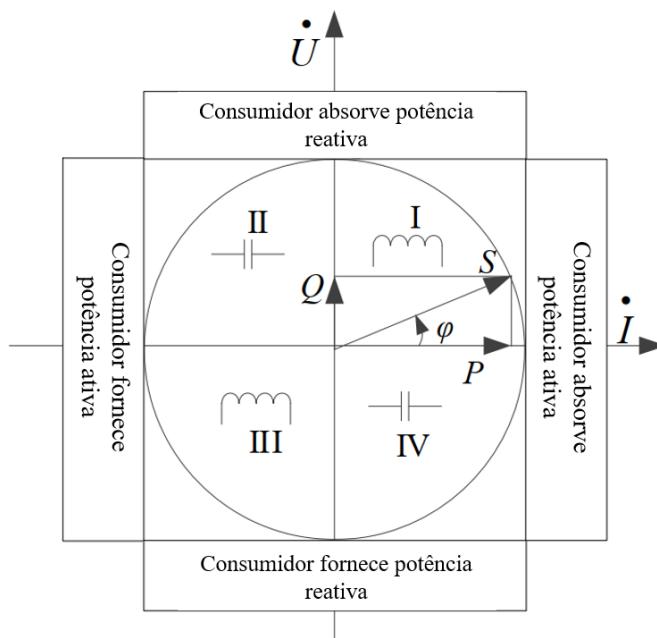
Após a determinação do método a ser utilizado para medição de potência, um ponto crítico para aplicações em SG é a capacidade de medição bidirecional, que pode ser obtida por meio do algoritmo implementado. A medição bidirecional se baseia no princípio de medição em quatro quadrantes, definido de forma que a potência ativa (P) e reativa (Q) são calculadas a partir de vetores contento as informações dos sinais de tensão e corrente e o vetor da potência aparente (S) é determinado a partir dos valores de P e Q . Conhecendo o quadrante que o vetor S está localizado é possível determinar o fluxo de potência na rede, ou seja, avaliar se o cliente está consumindo ou fornecendo energia para rede elétrica, conforme exposto na Figura 4. Além disso, usando este método é possível realizar a diferenciação de características de impedância complexa da rede, fornecendo dados para compensação e melhoria da qualidade de energia (Li et al., 2018).

2.4 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Como os dispositivos de medição ficam situados distantes dos centros de operação, a utilização de uma infraestrutura de comunicação se faz necessária para realizar a coleta dos dados fornecidos pelos equipamentos. Vale ressaltar que, no contexto das SGs o sistema de comunicação deve suportar um fluxo bidirecional de informações para possibilitar a leitura e o gerenciamento remoto dos dispositivos. Nesta seção uma breve revisão sobre a AMI é feita visando proporcionar um melhor entendimento do sistema global em que o medidor inteligente

está inserido, acompanhada da exposição dos principais esquemas de comunicação utilizados em aplicações deste tipo.

Figura 4 – Princípio de medição em quatro quadrantes



Fonte: Adaptado de Li et al., 2018.

2.4.1 Visão geral da AMI

A AMI pode ser definida como a união de diversas tecnologias que estreitam as relações entre concessionárias e consumidores, englobando desde os componentes responsáveis por coletar as informações da rede, até as ferramentas e interfaces utilizadas para análise, armazenamento e disponibilização das informações. De acordo com (Bian et al., 2014), a estrutura da AMI pode ser dividida em três componentes principais:

- O medidor inteligente, que é a base de todo o sistema, sendo responsável por coletar informações da rede e disponibilizá-las de forma remota, além de auxiliar no gerenciamento do sistema a partir dos comandos recebidos;
- O sistema de gerenciamento de dados de medição, do inglês *Meter Data Management System* (MDMS), é indispensável para realização de funções da AMI, sendo responsável por receber os dados fornecidos pelos SM, e realizar a análise, armazenamento e disponibilização das informações, visando a melhoria de todo o processo;

- A rede de comunicação, responsável por fornecer um canal seguro para comunicação entre os dispositivos situados na rede elétrica e o sistema de gerenciamento da concessionária, dotada de meios de comunicação bidirecionais, com o intuito de melhorar o monitoramento da rede e a relação entre as concessionárias e clientes. Assim, as concessionárias podem monitorar o consumo e comportamento da rede, ao mesmo tempo em que os clientes têm a possibilidade de participar ativamente da operação da rede elétrica a partir dos dados recebidos do MDMS.

Esta infraestrutura revoluciona a relação tradicional entre as concessionárias e consumidores, facilitando a troca de informações no SEP, além de proporcionar a realização e melhoria de serviços que antes eram bastante difíceis, ou até mesmo impossíveis de se realizar, como por exemplo, o diagnóstico da QEE, a detecção automatizada de faltas na rede e a melhoria do monitoramento do fluxo de potência no sistema de distribuição (Ghosal; Conti, 2019).

2.4.2 Canais de comunicação

O compartilhamento das informações na AMI traz à tona diversos questionamentos a respeito da confiabilidade do sistema, pois abre uma brecha para possíveis ações mal-intencionadas que podem afetar drasticamente a rede elétrica, tornando necessário que a AMI obedeça a protocolos de segurança, confidencialidade, integridade e disponibilidade das informações para poder atuar de forma correta (Ghosal; Conti, 2019). A criptografia dos dados que trafegam na rede de comunicação surge como uma solução para tornar a AMI mais segura e auxiliar no cumprimento de todos os protocolos citados anteriormente. Vale salientar que o método para realizar esta criptografia de forma adequada é muito importante para a integridade da AMI.

Explorando mais a fundo a rede de comunicação presente na AMI, especificamente a comunicação local entre dispositivos que compõem a infraestrutura, que é o foco desta pesquisa, alguns protocolos de comunicação se destacam como potenciais alternativas para integrar os medidores inteligentes e possibilitar sua inserção na AMI. Dentre estes protocolos, de acordo com (Bian et al., 2014) e (Santos et al., 2016), a seguir são apresentados os mais populares.

2.4.2.1 Canais de comunicação com fio

- **Ethernet:** o padrão IEEE 802.3, mais conhecido como Ethernet foi bastante difundido por conta de sua simplicidade e praticidade. Existem dois tipos de cabos que são utilizados para comunicação utilizando este padrão, que são eles: o de par trançado, que suporta taxas de transmissão de até 1 Gbps, podendo ser utilizados em distâncias de até 100 m, cuja manutenção e custo de cabos deste tipo são seu ponto forte; e os de fibra ótica, que apresentam vantagens como a taxa de transmissão de até 10 Gbps e possibilidade de utilização em distâncias de até 2000 m, cujos custos com instalação e manutenção acabam limitando sua utilização.
- **Power Line Communication (PLC):** a comunicação via PLC utiliza as linhas da rede para transmitir os dados, apresentando como principal vantagem o seu custo-benefício, pois utiliza a infraestrutura já existente como canal para o tráfego de informações, porém, enfrenta vários desafios técnicos, como: canal ruidoso, largura de banda estreita e falta de segurança.

2.4.2.2 Canais de comunicação sem fio

- **LoRaWAN:** o LoRaWAN, do inglês *Long Range Wide Area Network*, é um protocolo de comunicação mantido pela LoRa Alliance, baseado na tecnologia LoRa, que utiliza Rádio Frequência (RF) para transmissão de informações, atuando principalmente nas faixas de frequência não licenciadas de 109, 433, 866 e 915 MHz. Apresenta como vantagens o seu baixo custo, baixo consumo de energia, popularidade e alcance (podendo alcançar distâncias de até 45 km), porém, sua taxa de transmissão de dados varia entre 300 bps e 50 kbps, o que pode se tornar um gargalo para algumas aplicações.
- **WiFi:** a *Wireless Local Area Network* (WLAN), mais conhecida como WiFi, é uma rede local sem fio baseada na série de padrões IEEE 802.11, que opera nas bandas de 2.4, 3.6 e 5 GHz de frequência, possuindo taxas de transmissão de até 1300 Mbps. Este tipo de canal apresenta como vantagem sua segurança, confiabilidade e alta velocidade, no entanto, tem como desvantagem seu custo de implementação, consumo de energia e o alcance de até 100 m.
- **WiMax:** o WiMAX é uma rede similar ao WiFi, porém se baseada na série de padrões IEEE 802.16, possuindo uma taxa de transmissão pode chegar até 75 Mbps com um

diferencial na sua distância de cobertura, que pode chegar até 50 km, apresentando uma ótima estabilidade do sinal.

- **Zigbee:** o Zigbee é um protocolo baseado no padrão IEEE 802.15.4, que possui como pontos fortes seu alcance, baixo consumo de energia e baixo custo de implementação, porém sua taxa de transmissão de dados varia entre 20 e 250 kbps, o que acaba limitando sua utilização, além de apresentar problemas de instabilidade.
- **Rádio frequência 900 MHz:** a banda de 900 MHz é uma banda não licenciada de RF utilizada geralmente para aplicações industriais, científicas e hospitalares. O seu alcance é um ponto forte, quando comparado com outros padrões de comunicação sem fio que operam em 2.4 GHz, porém peca na ocupação da largura de banda e pela falta de flexibilidade para atuar em conjunto com outros padrões de comunicação, o que atrapalha a interoperabilidade do sistema.
- **3G/4G:** as redes celulares já existentes podem se tornar uma alternativa interessante para aplicações em AMIs, pois dispensam os custos com a instalação do sistema, utilizando a infraestrutura já existente. Contam com taxas de transmissão de 1 Mbps (3G) e 10 Mbps (4G), atuando nas faixas de 1900 ou 2100 MHz (3G) e 2500 MHz (4G) em território nacional. Apresentam como vantagens sua segurança e confiabilidade, porém possuem desvantagens como o alto consumo de energia, falta de continuidade na cobertura da rede, custo de implantação, perda de informações durante o transporte dos dados, pouca flexibilidade e maior susceptibilidade a falhas em situações climáticas anormais.

2.5 ARMAZENAMENTO DE DADOS

O grande volume de dados enviados da rede elétrica para o MDMS representa um verdadeiro desafio para o armazenamento e análise das informações. É nesta etapa que a aplicação de ferramentas de tecnologias da informação prevalece, possibilitando a análise dos dados por meio de algoritmos sofisticados e o armazenamento de forma segura. Os conceitos de *Big Data* e computação em nuvem aplicados à análise de dados das SGs são essenciais para proporcionar um meio prático para estruturação do MDMS, dependendo fortemente da estrutura adotada na elaboração do banco de dados utilizado para armazenar as informações, e dos métodos de consulta utilizados pelas ferramentas de análise de dados (Munshi; Yasser, 2017).

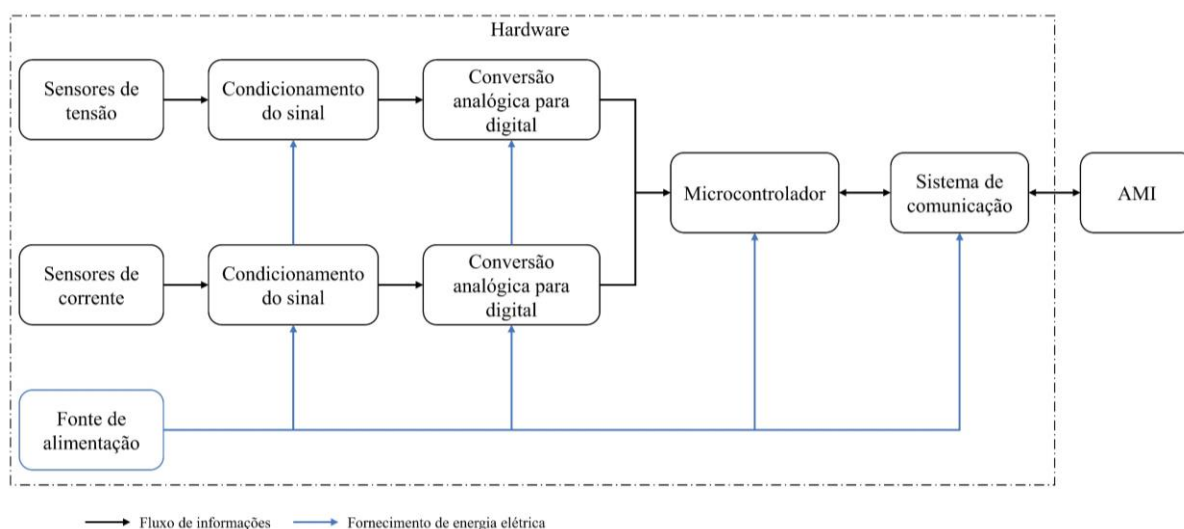
O método de armazenamento dos dados é muito importante para o funcionamento da AMI, pois possibilita o monitoramento da rede elétrica, visando entender o seu comportamento a fim de obter perfis de consumo, detectar fraudes e furtos de energia, além de possibilitar o gerenciamento da demanda, com o objetivo de melhorar o serviço prestado. Vale ressaltar que garantir a integridade, sigilo e segurança destas informações é uma prioridade, visto que qualquer vazamento pode acarretar sérios problemas, já que a base de dados contém informações sensíveis a respeito do funcionamento da rede (Ghosal; Conti, 2019).

Neste contexto, a computação em nuvem surge como uma solução para o desafio de manter o funcionamento de servidores locais, atualmente, diversas empresas trabalham neste mercado, fornecendo sua infraestrutura como opções em nuvem para o armazenamento de dados por meio da internet (Meng, 2018), ficando a critério das concessionárias a adoção de aplicações deste tipo, ou a criação de um servidor próprio.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Esta seção é destinada a apresentar os dispositivos e circuitos selecionados para compor o protótipo, pautando-se na viabilidade técnica e econômica do mesmo, o diagrama de blocos apresentado na Figura 5 fornece uma visão geral da estrutura do protótipo. Todos os componentes são alimentados pela fonte de alimentação, os sensores de tensão e corrente são responsáveis por coletar amostras dos sinais da rede, reduzindo a amplitude dos sinais de entrada do dispositivo, que são encaminhados para os circuitos de condicionamento dos sinais, responsáveis por adequar o intervalo de variação e realizar a filtragem dos sinais, logo após são enviados para o ADC para que seja feita a conversão dos sinais analógicos em digitais. Depois de tratados, os sinais são enviados ao MCU para realização do processamento das informações, por fim, o MCU envia as informações para o sistema de comunicação possibilitando a troca de informações com a AMI. Ressalta-se que o bloco denominado AMI será o banco de dados no presente trabalho, porém em uma aplicação real pode ser um concentrador de dados local e/ou a comunicação com outros dispositivos inteligentes conectados na rede.

Figura 5 – Diagrama de blocos da estrutura do protótipo.



Fonte: O autor, 2024.

3.1 FINALIDADE DO PROTÓTIPO

O protótipo foi idealizado para trabalhar em conjunto com outros SM inseridos na rede, de modo que, os SM estariam situados nas unidades consumidoras, responsáveis por coletar os

dados de forma individualizada, e o protótipo estaria situado próximo ao nó de conexão que alimenta uma área do sistema de distribuição, ou seja, próximo do transformador responsável pelo fornecimento de energia, com o intuito de obter dados de uma forma mais generalizada, porém, nada impede sua implementação para medições locais. Desta forma, o protótipo pode colaborar na melhoria do monitoramento e gerenciamento da rede de distribuição, visto que ele pode atuar em uma dinâmica de funcionamento mestre-escravo em conjunto com os SM locais, auxiliando na coordenação do sistema ao mesmo tempo que coleta os dados. Além de proporcionar uma solução para detectar fraudes e furtos de energia por meio da comparação do conjunto de dados obtidos pelos SM locais e pelo protótipo, além de facilitar a localização de faltas na rede.

3.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

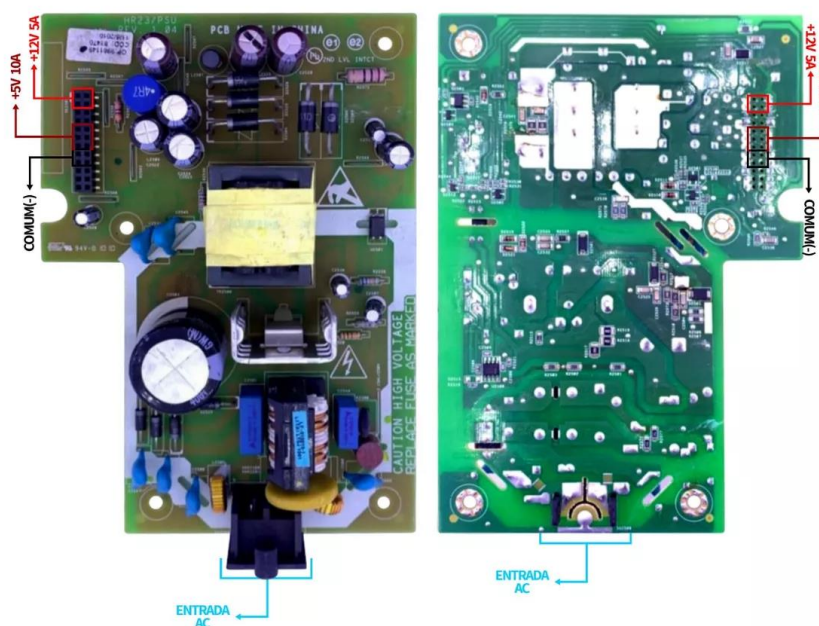
Optou-se por utilizar um modelo comercial de fonte de alimentação para fornecer os níveis de tensão e corrente necessários ao pleno funcionamento de todos os componentes do protótipo, buscando simplificar o desenvolvimento do projeto. Na Figura 6 é possível observar a placa de circuito impresso e os componentes que integram a fonte, com destaque para os locais de entrada e saída. Esta fonte possui a capacidade de operar com uma entrada de 100 a 220 Vac, proporcionando duas saídas distintas de tensão: 5 Vdc e 12 Vdc, níveis essenciais para alimentar o MCU, o RTC e os amplificadores operacionais que fazem parte do circuito de aquisição dos sinais.

3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Nesta seção serão apresentados os componentes e esquemas dimensionados para compor o sistema de aquisição de dados do protótipo. Vale ressaltar que, para a aplicação se faz necessário a instalação do protótipo próximo ao transformador na rede de distribuição, desta forma, foi necessário estimar os valores de tensão e corrente que circulam neste ponto para definir a faixa de medição que o dispositivo será capaz de trabalhar. Com o intuito de adequar o projeto a região do estado de Pernambuco, uma consulta foi realizada a um engenheiro da Neoenergia Pernambuco para identificar os principais tipos de transformadores utilizados na rede de distribuição, suas potências nominais e faixas de operação. A partir desta consulta as seguintes informações foram constatadas: os transformadores trifásicos de 45 e 112,5 kVA estão presentes em maior número na rede, que mesmo com um número expressivo

de transformadores com isolamento à óleo, os novos equipamentos que estão sendo adotados pela companhia possuem isolamento a seco, e que o limite de corrente para um transformador é de 150% da corrente nominal. De posse destas informações, tendo em mente a tendência de migração de transformadores a óleo para transformadores a seco, optou-se por adotar os parâmetros de funcionamento dos transformadores de 45 kVA a seco, expostos na Tabela 1, como base para definir as faixas de operação do protótipo desenvolvido.

Figura 6 – Fonte de alimentação.



Fonte: Sim Eng¹.

Tabela 1 – Dados dos transformadores trifásicos de 15kV a seco com 45 kVA de potência nominal.

Corrente primária (A)	Corrente secundária (A)		Perda em vazio (W)	Perdas totais (W)
	220/127 V	380/220 V		
1,88	118,09	68,37	240	1190

Fonte: Adaptado de Neoenergia, 2020.

O protótipo deve ser capaz de realizar a medição de potência nesse sistema trifásico, para simplificar as medições de potência o método dos dois wattímetros surge como uma boa opção, porém, como informações de uma das fases são perdidas utilizando-o, optou-se por

¹ SIM ENG. Placa Para Fonte De Alimentação 5v 10a / 12v 5a. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1153967281-placa-para-fonte-de-alimentaco-5v-10a-12v-5a- JM>.

utilizar sensores para coletar dados de tensão e corrente em todas as fases. Além disto, visto que o limite de corrente no transformador é de 150 % de seu valor nominal, conclui-se que para um transformador que possui tensões de 380 V entre fase-fase e 220 V entre fase-neutro em seu lado secundário, a corrente máxima que poderá fluir na rede, em condições normais, é de aproximadamente 102 A.

3.3.1 Sensor de tensão

Visto que será necessário coletar amostras das tensões entre fase-neutro das saídas do transformador, serão utilizados transformadores de potencial (TPs) que admitem tensões de entrada de 220 V, em conjunto com o circuito de condicionamento dos sinais. Este tipo de sensor foi escolhido pois proporciona uma isolação galvânica entre o medidor e a rede de distribuição, fornecendo mais segurança para os componentes que compõem o protótipo. Para fins de prototipagem inicial, o componente escolhido foi o transformador que possui entrada para tensões de 127 ou 220 V e saída de 12 V e 250 mA da empresa Gilsom, apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Transformador de potencial adotado.



Fonte: O autor, 2024.

3.3.2 Sensor de corrente

Para coletar as amostras de corrente é necessário adotar um sensor que se adeque a faixa de variação de corrente na rede, a qual possui um valor limite de aproximadamente 102 A, no entanto, é importante enfatizar que esse limite raramente é alcançado. Com o intuito de facilitar a instalação do protótipo, serão utilizados transformadores de corrente (TCs) de núcleo

dividido que se adequem a faixa de medição, visto que, por meio destes componentes a coleta das informações pode ser realizada de forma facilitada, uma vez que dispensa a necessidade de seccionar o condutor e todos os procedimentos de segurança que estão envolvidos no processo. Sendo assim, para fins de prototipagem o sensor SCT013, exposto na Figura 8, foi selecionado para compor o projeto por conta de seu custo-benefício e especificações que se adequam a aplicação, suportando uma corrente máxima de 100 A, e fornecendo 50 mA em sua saída, com uma relação de 1:2000.

Figura 8 – Transformador de corrente adotado.



Fonte: O autor, 2024.

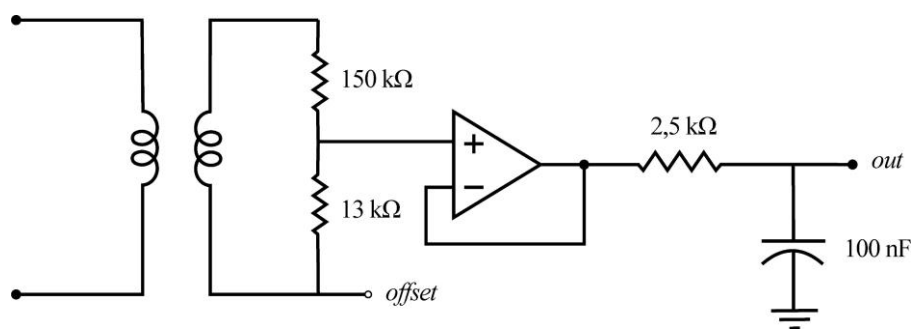
3.3.3 Condicionamento dos sinais

Para adequar as amostras de sinais analógicos obtidos pelos sensores e possibilitar sua conversão em sinais digitais, levando em consideração um ADC com tensão de referência de 3,3 V, os seguintes circuitos de condicionamento foram desenvolvidos.

- Condicionamento do sinal de tensão: o circuito responsável pelo condicionamento do sinal de tensão é implementado logo após o TP, sua estrutura pode ser dividida em duas etapas principais. Na primeira etapa ocorre a adequação da faixa de variação do sinal para corresponder ao intervalo de 0 a 3,3 V. Esta adequação é possível graças ao uso de circuitos divisores tensão, onde num primeiro momento a tensão de pico na saída do transformador ($12 V_{rms}$) é reduzida de 16,9 V para aproximadamente 1,35 V, garantindo que não haja perda de informações, em seguida uma tensão de *offset* é introduzida no circuito, utilizando a fonte de alimentação DC de 3,3 V do próprio

ESP32, em conjunto com um potenciômetro que permite variar a tensão *offset* para metade da referência de 3,3 V, possibilitando o deslocamento do sinal no eixo vertical e fazendo com que ele varie na faixa de tensão desejada. Na segunda etapa ocorre a filtragem do sinal por meio de um filtro passa-baixas passivo de primeira ordem, projetado com uma frequência de corte de aproximadamente 630 Hz para evitar a atenuação do sinal de interesse (60 Hz) e prevenir interferências de ruídos de alta frequência no sinal. Estas duas etapas são acopladas por meio de um amplificador operacional utilizado como *buffer*, agindo no circuito de modo a prevenir possíveis alterações de tensão por conta de carregamento ocasionado pela interligação dos componentes utilizados. Na Figura 9 um esboço da estrutura do circuito é exposto para facilitar o entendimento.

Figura 9 – Circuito de condicionamento do sinal de tensão

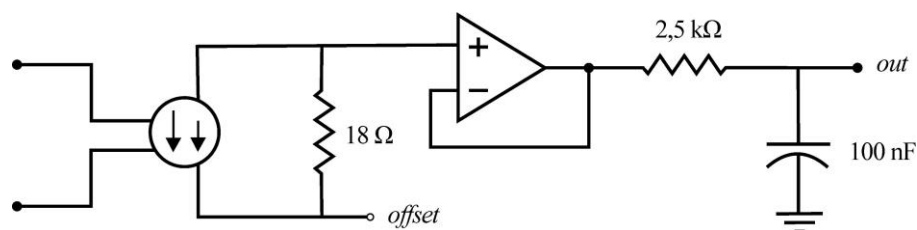


Fonte: O autor, 2024.

- Condicionamento do sinal de corrente: o circuito para aquisição dos sinais de corrente segue o mesmo princípio apresentado no condicionamento da tensão, diferindo na forma de adequação nos níveis de tensão. Novamente o circuito é dividido em duas etapas, acopladas por meio de um amplificador operacional utilizado como *buffer*. Primeiramente é feita a adequação da faixa de variação dos sinais, em seguida o filtro passa-baixas é utilizado com a mesma finalidade citada anteriormente. Neste caso, tomando 100 A como o valor máximo que pode chegar até o sensor, como a corrente em seu lado secundário é conhecida (50 mA), um resistor de 18 Ω pode ser utilizado para converter o valor para forma de tensão com um valor de pico de aproximadamente 1,3 V. Por fim, feita a adição da tensão de *offset* a adequação do sinal é finalizada. O restante do circuito é análogo do caso de condicionamento da tensão, conforme exposto na Figura 10. Após o condicionamento, os sinais ficam prontos para serem digitalizados pelo ADC, porém vale ressaltar que estes circuitos foram elaborados para encaminhar

os dados a um ADC que possui uma referência de 3,3 V, caso seja necessário utilizar um ADC com um valor diferente de referência os circuitos deverão ser ajustados.

Figura 10 – Circuito de condicionamento do sinal de corrente



Fonte: O autor, 2024.

3.3.4 Relógio de tempo real

O componente escolhido para atuar como RTC do protótipo foi o módulo DS3231, baseado no circuito integrado DS3231 (Integrated, 2015), pois oferece precisão para a computação dos dados de data e hora, contando com um cristal oscilador para garantir a operação correta do dispositivo, pode ser alimentado em 3,3 ou 5 V, possui uma bateria para prevenir a perda de dados caso ocorra algum problema em sua alimentação, e realiza a comunicação com o microcontrolador por meio do protocolo I²C. Para sincronizar os dados de data e hora do módulo RTC o protocolo *Network Time Protocol* (NTP), que é específico para esta finalidade, pode ser utilizado por se tratar de um método confiável para garantir que o relógio trabalhe com as informações corretas. Este módulo possui 6 pinos para conexão, como apresentado na Figura 11, os pinos VCC e GND são responsáveis pela alimentação do módulo; os pinos SDA e SQW são destinados a comunicação externa por meio do protocolo I²C; o pino SQW se comporta como uma saída programável que pode ser utilizada para diversas finalidades graças aos seus sinais de *clock* em frequências variadas; e o pino 32K é uma saída direta do oscilador interno do módulo, fornecendo um sinal de *clock* com frequência de 32768 kHz, que pode ser utilizado como referência para sincronização de circuitos mais elaborados contendo mais relógios.

Figura 11 – Módulo DS3231.



Fonte: Great It².

3.3.5 Microcontrolador

A escolha do hardware para integrar o projeto foi o *System-on-a-chip* (SoC) ESP32, desenvolvido pela empresa Espressif. Este SoC é baseado no MCU dual core Xtensa LX6 de 32 bits e oferece uma ampla gama de funcionalidades, incluindo conectividade WiFi e Bluetooth, 36 pinos de entrada/saída, dois ADCs de 12 bits, uma antena RF, saídas *Pulse Width Modulation* (PWM), 16 Mb de memória FLASH, e diversas interfaces de comunicação, como *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Controller Area Network* (CAN), *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART), I²C, entre outras. Sua versatilidade se estende à eficiência energética e ao custo-benefício, pois a documentação aberta permite que diversas empresas desenvolvam placas baseadas neste SoC, reduzindo seu custo. Por conta desta flexibilidade e o baixo custo, o ESP32, especificamente a placa de desenvolvimento NodeMCU-32S se mostrou ser a melhor opção quando comparado a outras placas de desenvolvimento como as da plataforma Arduino, Raspberry Pi e STM32. Espera-se que por meio de sua utilização seja possível implementar todas as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento de um SM. Para uma melhor visualização, a placa é exposta na Figura 12 e a sua pinagem completa pode ser observada na Figura 13.

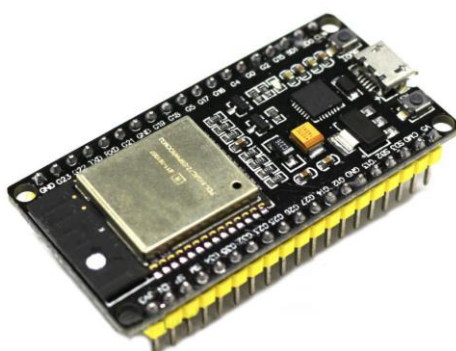
3.4 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

O protocolo de comunicação escolhido para integrar o protótipo foi o WiFi, por proporcionar um canal de comunicação seguro e confiável, contando com um alcance de até 100 metros, garantindo uma cobertura eficaz com velocidades de transmissão de dados de até 1300 Mbps, atendendo às exigências de transferência rápida de informações. Além de se tratar

²GREAT IT: electronic components co., LTD. MÓDULO DS3231. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/store/2138141?spm=a2g0o.detail.1000007.1.c6622802K3SuEb>.

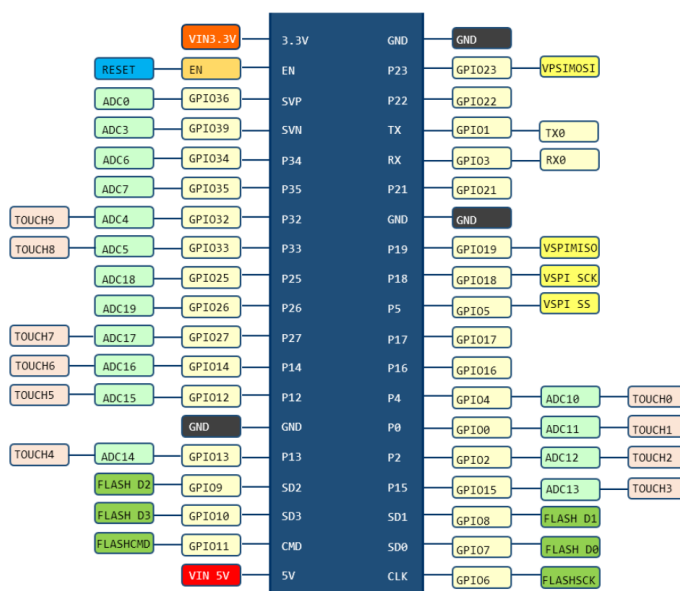
de um padrão bastante disseminado na sociedade moderna, facilitando a questão da interoperabilidade do dispositivo. Esta escolha também foi pensada para contribuir no custo-benefício e desenvolvimento do protótipo, pois dispensa a necessidade da integração de outro periférico para realização da comunicação, visto que um dos núcleos do ESP32 pode ficar dedicado a comunicação operando em paralelo ao núcleo que realiza as medições, fornecendo um canal para o acesso à internet e possibilitando o envio das informações para o banco de dados desenvolvido.

Figura 12 – Placa NodeMCU-32S.



Fonte: Aguhajsu³.

Figura 13 – Pinagem da placa NodeMCU-32S.



Fonte: (Oliveira, 2017).

³ AGUHAJSU: Global purchase store. NodeMCU-32S ESP32. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/store/2212057?spm=a2g0o.detail.1000007.1.7b69228f9wxOEB>.

3.5 ORÇAMENTO

Foi realizado um levantamento de custos para determinar o investimento necessário na aquisição dos principais componentes dimensionados no trabalho, visando assegurar uma relação custo-benefício favorável. Para isso, o orçamento foi elaborado com base em preços de diferentes revendedores nacionais, dentre eles: Baú da eletrônica, MakerHero e Eletrogate. Buscando encontrar um equilíbrio entre os custos de implementação e os benefícios proporcionados pelo projeto.

Tabela 2 – Relação de preços

Componente	Quantidade	Baú da eletrônica		MakerHero		Eletrogate	
		Valor da unidade (R\$)	Total (R\$)	Valor da unidade (R\$)	Total (R\$)	Valor da unidade (R\$)	Total (R\$)
ESP-32	1	47,88	47,88	40,90	40,90	64,90	64,90
Transformador de potencial	3	28,79	86,37	28,79	86,37	28,79	86,37
Transformador de corrente	3	72,00	216,00	52,90	158,7	64,90	194,7
Módulo RTC	1	27,00	27,00	25,90	25,90	36,90	36,90
Fonte de Alimentação	1	26,98	26,98	26,98	26,98	26,98	26,98
VALOR TOTAL (R\$)			404,23		338,85		409,85

Fonte: O autor, 2024.

Analisando os componentes que mais influenciam no custo final do protótipo, constata-se que seu preço médio gira em torno de R\$ 384,31, reforçando sua característica de ser uma solução de baixo custo.

3.6 BANCO DE DADOS

O banco de dados utilizado no projeto foi criado com o auxílio do *software* WAMP, sigla formada a partir das iniciais de Windows, Apache, MySQL, PHP – Perl – Python. O WAMP instala todas estas ferramentas citadas anteriormente no Windows, dando uma base sólida para o desenvolvimento de aplicações web em computadores que utilizam este sistema operacional.

A partir da instalação do WAMP é possível emular um servidor local no dispositivo, podendo usufruir de todas as ferramentas e contando com uma interface bastante intuitiva, além

de estar disponível gratuitamente, se tratando de um *software* de código aberto que possui licença *General Public License* (GNU), garantindo atualizações frequentes para manter o *software* operacional.

Para realizar a criação do banco de dados o phpMyAdmin foi utilizado por se tratar de uma aplicação web que dispensa a instalação de qualquer programa, podendo ser utilizada exclusivamente pelo navegador, e se trata de um *software* de código aberto. A partir da aplicação phpMyAdmin é possível se comunicar com o servidor MySQL instalado na máquina, tornando possível a criação do banco de dados e das tabelas que o compõem, permitindo a inserção de dados, a alteração da estrutura das tabelas, entre outras aplicações.

A estrutura do banco de dados é composta por uma tabela com 20 colunas criadas para receber os seguintes dados: identificação do SM (id), armazenando-o como um número inteiro de no máximo 11 dígitos; data e hora (data), armazenando o valor no formato *datetime* que possibilita um descrição precisa da data e hora indexadas as medidas; os dados correspondentes às correntes (c), tensões (t), potência ativa (p), potência reativa (q), potência aparente (s) e fator de potência (fp) de cada uma das três fases do sistema, armazenando-os no formato *double*, que permite a obtenção de aproximações para valores decimais. A Figura 14 fornece a visualização da estrutura do banco de dados desenvolvido na aplicação phpMyAdmin, por meio da qual é possível observar as colunas criadas para receber os valores em cada fase das grandezas citadas.

3.7 AMBIENTE VIRTUAL

Esta seção é destinada para apresentar a parte de *software* envolvida no desenvolvimento do ambiente virtual do trabalho, abordando desde a preparação da interface para criar e implementar os programas até os algoritmos utilizados para realizar a medição das grandezas de interesse e a comunicação com o banco de dados.

Antes de começar a falar sobre o desenvolvimento dos programas é importante ressaltar a importância dos *softwares* de código aberto, do inglês *Open Source*, por meio dos quais os usuários tem a oportunidade de acessar o código fonte dos *softwares*, possibilitando o desenvolvimento de aplicações gratuitas que impulsionam a pesquisa e desenvolvimento de soluções que utilizam ferramentas de TIC, e criando comunidades que contribuem para o crescimento de aplicações com a utilização de dispositivos inteligentes, fomentando esta grande área do conhecimento.

Figura 14 – Estrutura do bando de dados.

localhost / MySQL / banco de da x +

localhost/phpmyadmin/tbl_structure.php?db=banco+de+dados+sm&table=sm

Outros favoritos

Servidor: MySQL:3306 » Base de Dados: banco de dados sm » Tabela: sm

Procurar Estrutura SQL Pesquisar Inserir Exportar Importar Privilégios Operações Acionadores

[Editar em linha] [Edita] [Criar código PHP]

#	Nome	Tipo	Agrupamento (Collation)	Atributos	Nulo	Predefinido	Comentários	Extra	Acções
<input type="checkbox"/>	1	id			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	2	data			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	3	c1			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	4	c2			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	5	c3			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	6	t1			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	7	t2			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	8	t3			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	9	p1			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	10	p2			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	11	p3			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	12	q1			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	13	q2			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	14	q3			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	15	s1			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	16	s2			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	17	s3			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	18	fp1			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	19	fp2			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	20	fp3			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais

Marcar todos Com os seleccionados: Procurar Muda Elimina Primária Único Índice Texto Completo Texto Completo

Consola

Fonte: O autor, 2024.

3.7.1 Preparação da interface para trabalhar com o ESP32

Para realizar a programação da placa de desenvolvimento baseada no SoC ESP32 o ambiente de desenvolvimento integrado, do inglês *Integrated Development Environment* (IDE), que se baseia na linguagem de programação C e possui código aberto mantido pela plataforma Arduino, foi escolhido por conta de sua interface amigável e a presença de um compilador integrado, além de contar com uma comunidade bastante ativa, tendo diversas bibliotecas que contribuem para o desenvolvimento de novas aplicações. Para possibilitar a utilização deste ambiente na programação do ESP32 foi necessário instalar uma biblioteca de código aberto que adequa o IDE para trabalhar com a placa desenvolvimento por meio do gerenciador de bibliotecas.

3.7.2 Conexão com o WiFi

Para conectar o ESP32 com a rede WiFi a biblioteca “WiFi” disponível na documentação da plataforma Arduino foi utilizada como um facilitador na elaboração do código que realiza esta conexão. Vale ressaltar que o ESP32 tem outras funções que envolvem a conexão WiFi, podendo atuar como um ponto de acesso remoto ou funcionar emulando um servidor web, possibilitando diversas aplicações para comunicação com outros dispositivos. Ademais, esta conexão com a internet também permite realizar a sincronização do módulo RTC do protótipo por meio do servidor NTP local.

3.7.3 Algoritmo de comunicação

A linguagem de programação PHP foi utilizada para realizar a elaboração do algoritmo de comunicação, estando presente desde a parte de conexão e envio de informações para o banco de dados local até a extração e exibição de informações oriundas da base de dados. Inicialmente foi necessário estudar um pouco mais a fundo o *software* WAMP para identificar o local correto para criação do arquivo com o código responsável por realizar a conexão e o envio das informações para o banco de dados. Encontrado o local correto, o arquivo contendo o código de conexão e envio de dados foi criado e nomeado como “enviar.php”, cujo código realiza a conexão com o banco de dados por meio de um *PHP Data Object* (PDO) que é uma ferramenta específica para esta finalidade. Vale ressaltar que, como o WAMP emula um

servidor local na máquina em que está instalado, o endereço de IP do servidor é igual ao endereço da máquina e ele deve ser utilizado como parâmetro no algoritmo de conexão. Para o envio de informações a função GET da linguagem PHP é utilizada para concatenar as medições e criar uma *Uniform Resource Locator* (URL) com os dados de interesse, e por meio deste endereço inserir as informações no banco de dados utilizando funções SQL, já que no contexto deste trabalho o banco de dados adotado foi o MySQL.

Finalizada a criação desta parte estrutural da comunicação com o banco de dados, tomando como base o algoritmo presente nas notas de aplicação do Arduino, especificamente o WiFi *client*, foi desenvolvido o algoritmo de comunicação a ser implementado no microcontrolador.

3.7.4 Algoritmo para consulta e exibição dos dados

Visando facilitar o entendimento da função e do propósito deste algoritmo se faz necessário comentar um pouco sobre onde ele deve ficar localizado no WAMP. Para a parte da criação de interações com o banco de dados por meio de uma interface web, o WAMP possui um diretório específico chamado “www”. Para o desenvolvimento do código de exibição e consulta de dados no escopo deste trabalho, como o PHP foi utilizado, é necessário criar um novo diretório, dentro do “www”, que foi chamado de “comunicacao” e dentro deste os arquivos com os códigos responsáveis pela parte de comunicação do projeto devem ficar armazenados (enviar.php e index.php). Por padrão, o primeiro arquivo que a ser consultado quando se realiza uma requisição no diretório “comunicação” sem fornecer nenhum parâmetro (localhost/comunicacao) é o “index.php”, sendo assim, desenvolveu-se um código para apresentação e consulta de dados em um arquivo com esta nomenclatura. No desenvolvimento deste código foram utilizadas as linguagens PHP, para realizar a comunicação com o banco de dados, SQL para consultar as informações contidas no banco, e HTML5/CSS para criar uma interface amigável para exibição dos dados, em forma de tabela. A consulta se encontra estruturada de tal forma que apenas os dados mensais são exibidos na tabela, porém com alguns ajustes no código e na interface é possível alterar esta configuração para exibir dados em diferentes intervalos de tempo e de diferentes formas. As Figuras 15 e 16 expõem o resultado do código desenvolvido, sendo possível observar alguns valores hipotéticos e a ferramenta de busca no início da página.

Figura 15 – Interface para exibição das medições

Data/hora	Tensão L1 (V)	Tensão L2 (V)	Tensão L3 (V)	Corrente L1 (A)	Corrente L2 (A)	Corrente L3 (A)	Potência Ativa L1 (W)	Potência Ativa L2 (W)	Potência Ativa L3 (W)	Potência Reativa L1 (VAr)	Potência Reativa L2 (VAr)	Potência Reativa L3 (VAr)	Potência Aparente L1 (VA)	Potência Aparente L2 (VA)	Potência Aparente L3 (VA)	Fator de Potência L1	Fator de Potência L2	Fator de Potência L3
2021-05-25 21:49:08	219.78	223.23	220.34	12.09	14.4	15.32	1256	1323	1247	261	364	167	1525	1474	1356	0.9	0.84	0.65
2021-05-25 21:49:19	221.78	225.23	222.34	14.09	16.4	17.32	1258	1325	1249	263	366	169	1527	1476	1358	0.9	0.84	0.65
2021-05-25 21:49:30	223.78	227.23	224.34	16.09	18.4	19.32	1260	1327	1251	265	368	171	1529	1478	1360	0.9	0.84	0.65
2021-05-25 21:49:41	225.78	229.23	226.34	18.09	20.4	21.32	1262	1329	1253	267	370	173	1531	1480	1362	0.9	0.84	0.65
2021-05-25 21:49:52	227.78	231.23	228.34	20.09	22.4	23.32	1264	1331	1255	269	372	175	1533	1482	1364	0.9	0.84	0.65
2021-05-25 21:50:03	229.78	233.23	230.34	22.09	24.4	25.32	1266	1333	1257	271	374	177	1535	1484	1366	0.91	0.85	0.66
2021-05-25 21:50:14	231.78	235.23	232.34	24.09	26.4	27.32	1268	1335	1259	273	376	179	1537	1486	1368	0.91	0.85	0.66
2021-05-25 21:50:26	233.78	237.23	234.34	26.09	28.4	29.32	1270	1337	1261	275	378	181	1539	1488	1370	0.91	0.85	0.66
2021-05-25 21:50:38	235.78	239.23	236.34	28.09	30.4	31.32	1272	1339	1263	277	380	183	1541	1490	1372	0.91	0.85	0.66
2021-05-25 21:50:40	237.78	241.23	238.34	30.09	32.4	33.32	1274	1341	1265	279	382	185	1543	1492	1374	0.91	0.85	0.66

Fonte: O autor, 2024.

Figura 16 – Interface para pesquisa

The screenshot shows a web browser window with the URL `localhost/comunicacao/`. The page displays a search interface for smart meter measurements. At the top, there is a search bar with the text "30/04/2021" and a "Buscar" button. Below the search bar is a calendar for April 2021, with the 30th highlighted. The main content is a table with 16 columns and multiple rows of data.

	Corrente L1 (A)	Corrente L2 (A)	Corrente L3 (A)	Potência Ativa L1 (W)	Potência Ativa L2 (W)	Potência Ativa L3 (W)	Potência Reativa L1 (VAr)	Potência Reativa L2 (VAr)	Potência Reativa L3 (VAr)	Potência Aparente L1 (VA)	Potência Aparente L2 (VA)	Potência Aparente L3 (VA)	Fator de Potência L1	Fator de Potência L2	Fator de Potência L3			
28 21:49:41	12.09	14.4	15.32	1256	1323	1247	261	364	167	1525	1474	1356	0.9	0.84	0.65			
29 21:49:52	14.09	16.4	17.32	1258	1325	1249	263	366	169	1527	1476	1358	0.9	0.84	0.65			
30 Hoje 21:50:03	16.09	18.4	19.32	1260	1327	1251	265	368	171	1529	1478	1360	0.9	0.84	0.65			
2021-05-25 21:50:14	18.09	20.4	21.32	1262	1329	1253	267	370	173	1531	1480	1362	0.9	0.84	0.65			
2021-05-25 21:50:26	20.09	22.4	23.32	1264	1331	1255	269	372	175	1533	1482	1364	0.9	0.84	0.65			
2021-05-25 21:50:38	22.09	24.4	25.32	1266	1333	1257	271	374	177	1535	1484	1366	0.91	0.85	0.66			
2021-05-25 21:50:40	231.78	235.23	232.34	24.09	26.4	27.32	1268	1335	1259	273	376	179	1537	1486	1368	0.91	0.85	0.66
	233.78	237.23	234.34	26.09	28.4	29.32	1270	1337	1261	275	378	181	1539	1488	1370	0.91	0.85	0.66
	235.78	239.23	236.34	28.09	30.4	31.32	1272	1339	1263	277	380	183	1541	1490	1372	0.91	0.85	0.66
	237.78	241.23	238.34	30.09	32.4	33.32	1274	1341	1265	279	382	185	1543	1492	1374	0.91	0.85	0.66

Fonte: O autor, 2024.

3.7.5 Algoritmo de medição

O método de medição utilizado é uma parte fundamental para o projeto, visto que ele viabiliza a medição e garante a capacidade de medição bidirecional. No presente trabalho, foi escolhida uma abordagem baseada no domínio do tempo para estimar as grandezas de interesse. Essa escolha se deve à análise com menor complexidade computacional em comparação com abordagens no domínio da frequência, as quais demandam uma manipulação complexa dos sinais utilizando ferramentas como a Transformada de Fourier para mudança de domínio, contribuindo assim para a diminuição de custos com o microprocessador.

Como o microcontrolador selecionado suporta as bibliotecas da plataforma Arduino, a biblioteca *Energy Monitoring Library* (EmonLib) mantida pelo *Open Energy Monitor* foi escolhida para compor o trabalho por possibilitar a leitura dos valores instantâneos de tensão e corrente da rede a partir dos sinais obtidos pelo sistema de aquisição de dados, viabilizando os cálculos matemáticos para obtenção dos valores da potência ativa, do valor eficaz da tensão e da corrente, da potência aparente e do fator de potência.

A potência ativa é calculada por meio da potência instantânea média, que consiste na multiplicação da tensão instantânea pela corrente instantânea, seguida do somatório das potências instantâneas, por fim, para determinar o valor da potência ativa é necessário dividir o valor do somatório das potências instantâneas pelo número de amostras coletadas, como pode ser observado na Equação 1.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} V_{inst,k} I_{inst,k} \quad (1)$$

É importante destacar que a distinção do fluxo de potência é facilitada por meio desta estimativa no cálculo de potência, pois se houver uma alteração na direção do fluxo da corrente elétrica, a multiplicação entre tensão e corrente resultará em um valor negativo, tornando possível a medição bidirecional.

Para o cálculo da tensão e da corrente eficaz, que são obtidos por meio da raiz quadrada do somatório dos valores elevados ao quadrado dividido pelo número de amostras, como exposto nas Equações 2 e 3.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} V_{inst,k}^2} \quad (2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_{inst,k}^2} \quad (3)$$

A potência aparente é a relação da potência total entregue a carga, que combina as potências ativa e reativa. Nesta aplicação, seguindo a referência utilizada na biblioteca, o cálculo será feito por meio da multiplicação dos valores RMS de tensão e corrente, conforme a Equação 4.

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (4)$$

O cálculo da potência reativa é feito a partir dos valores obtidos da potência ativa e aparente, como exposto na Equação 5.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5)$$

Já o fator de potência é definido como a relação entre a potência entregue a carga e a potência que é convertida em trabalho (potência ativa), de modo que seu cálculo pode ser realizado de diferentes formas. Nesta biblioteca o cálculo é feito de forma simplificada, por meio da divisão da potência ativa pela aparente, como pode ser observado na Equação 6.

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

Os códigos utilizados como referência para elaborar o algoritmo de medição do protótipo, possibilitando a implementação prática dos métodos supracitados estão disponíveis em (Open energy monitor, 2024).

4 RESULTADOS

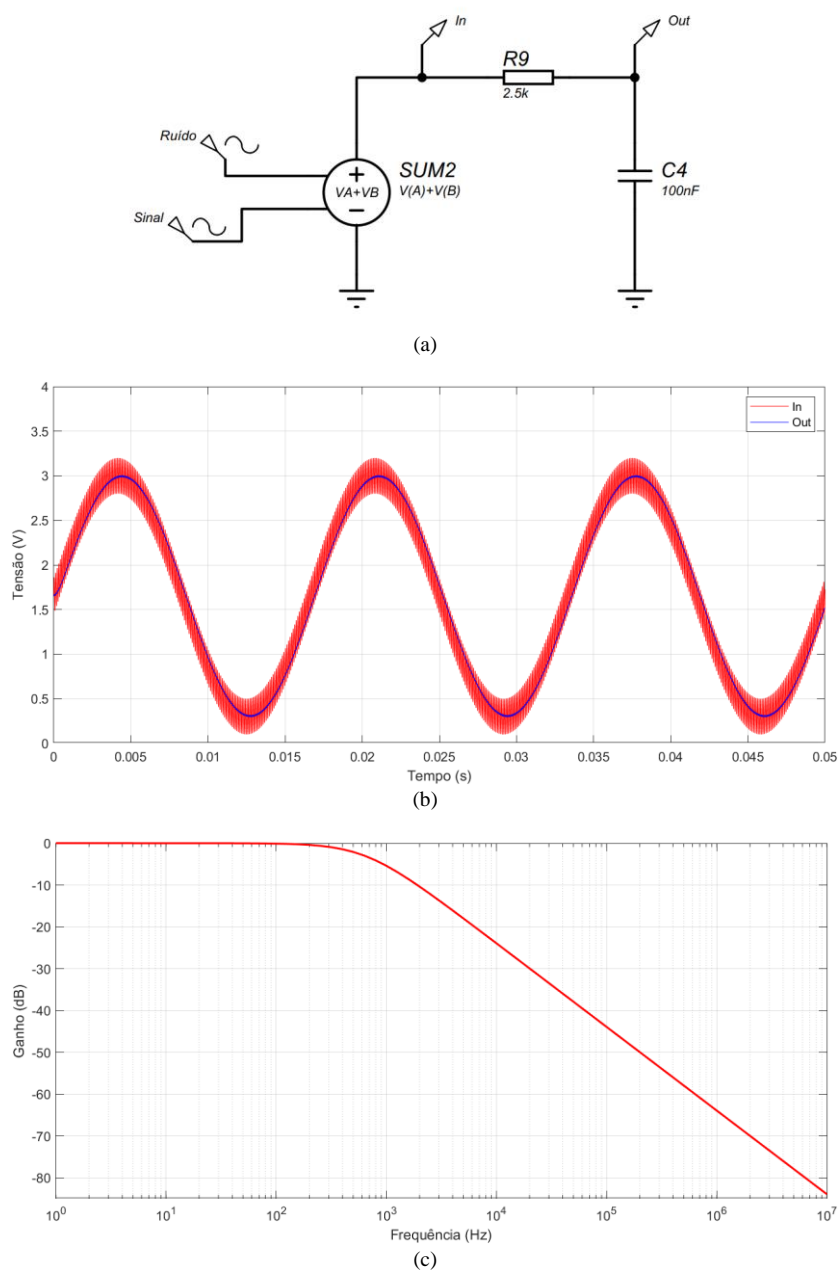
O *software* utilizado para a realização das simulações foi o Proteus 8, da *Labcenter Electronics*, por conta da disponibilidade de diversos dispositivos modelados a partir de componentes eletrônicos reais, e da vasta gama de aplicações e bibliotecas disponíveis para integração ao *software*, possibilitando a simulação do funcionamento do MCU para comprovar o desempenho do código de medição desenvolvido, além de contar com ferramentas para o projeto de placas de circuito impresso.

Inicialmente o circuito que implementa o filtro passa-baixas foi montado no *software*, conforme exposto na Figura 17 em conjunto com os gráficos de comparação entre os sinais de entrada e saída, e de resposta em frequência. O sinal de entrada consiste na soma de uma fonte parametrizada para simular o comportamento do sinal após a adequação para a faixa de leitura do ADC, e uma fonte parametrizada para simular um ruído com amplitude de 200 mV e frequência de 10 kHz. Desta forma é possível observar a partir das curvas que o filtro está funcionando conforme dimensionado, com uma frequência de corte de aproximadamente 630 Hz, provocando uma pequena defasagem e sem atenuar o sinal de entrada.

Em seguida, o circuito de aquisição e condicionamento de tensão foi montado utilizando um amplificador operacional de referência LM358 para o acoplamento dos sinais, que dispensa uma alimentação simétrica, possibilitando a utilização de uma fonte de alimentação mais simples. Na Figura 18 é possível observar o circuito completo de aquisição e condicionamento do sinal de tensão. A fonte senoidal neste caso simula a entrada de um sinal com valor RMS de 12 V proveniente da saída do transformador, que corresponde a medição de um valor RMS de 220 V entre fase e neutro, somada a um sinal de ruído análogo ao utilizado na simulação do filtro passa-baixas. O circuito é composto por um divisor resistivo para redução da tensão de pico de entrada acompanhado por um circuito que faz um *offset* de metade da tensão de referência de 3,3 Vdc utilizando um capacitor de acoplamento, seguido pelo LM358 que interliga o filtro projetado ao sistema de adequação do sinal.

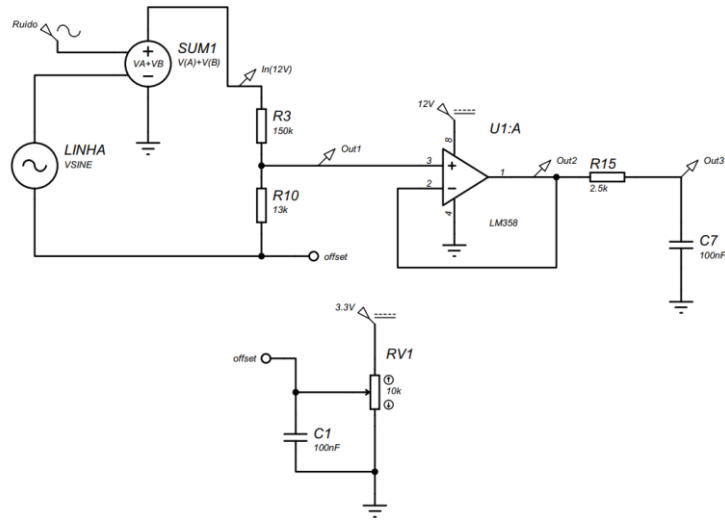
Na análise do circuito os *probes* de tensão do Proteus foram usados para viabilizar a comparação entre os sinais da seguinte forma: Int(12V) corresponde a entrada do sistema, Out1 corresponde a saída do circuito divisor de tensão, Out2 corresponde a saída do *buffer* e Out3 corresponde a saída final do sistema, após a adequação e filtragem do sinal. Desta forma, comparando os gráficos expostos na Figura 19 é possível atestar o funcionamento do circuito, que opera conforme projetado, sem atenuar o sinal nem gerar uma defasagem significativa.

Figura 17 – Filtro passa-baixas e resultados de simulação



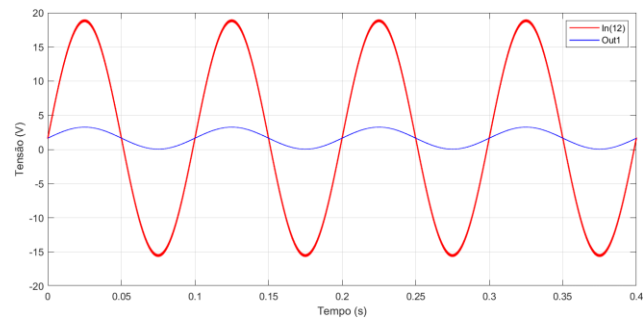
Fonte: O autor, 2024.

Figura 18 – Simulação do circuito de aquisição e condicionamento de tensão

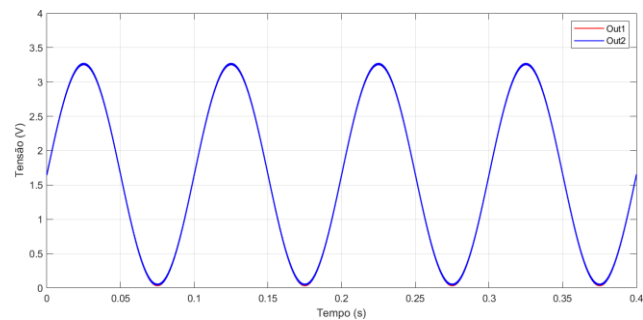


Fonte: O autor, 2024.

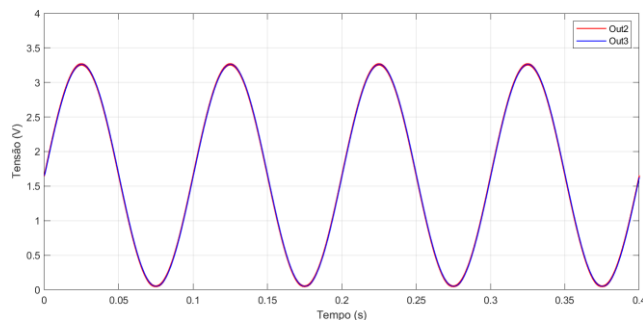
Figura 19 – Resultados de simulação do circuito de aquisição e condicionamento de tensão



(a)



(b)

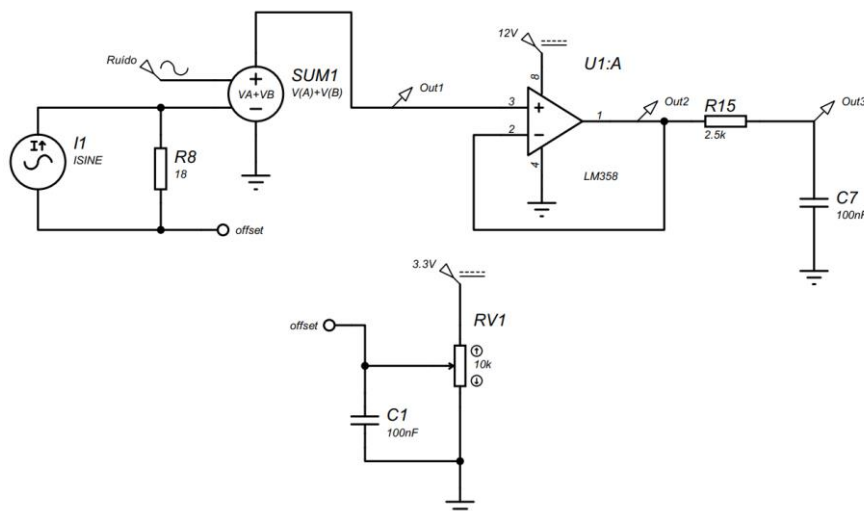


(c)

Fonte: O autor, 2024.

No caso da simulação do circuito de aquisição e condicionamento do sinal de corrente um circuito análogo foi montado, como pode ser observado na Figura 20, diferindo apenas na adequação do sinal de corrente, que foi feita utilizando um resistor *shunt*. Para simular a corrente de saída máxima do TC utilizado no protótipo, conforme exposto na Figura 8, uma fonte de corrente foi utilizada replicando um valor RMS de 50 mA.

Figura 20 – Simulação do circuito de aquisição e condicionamento de corrente



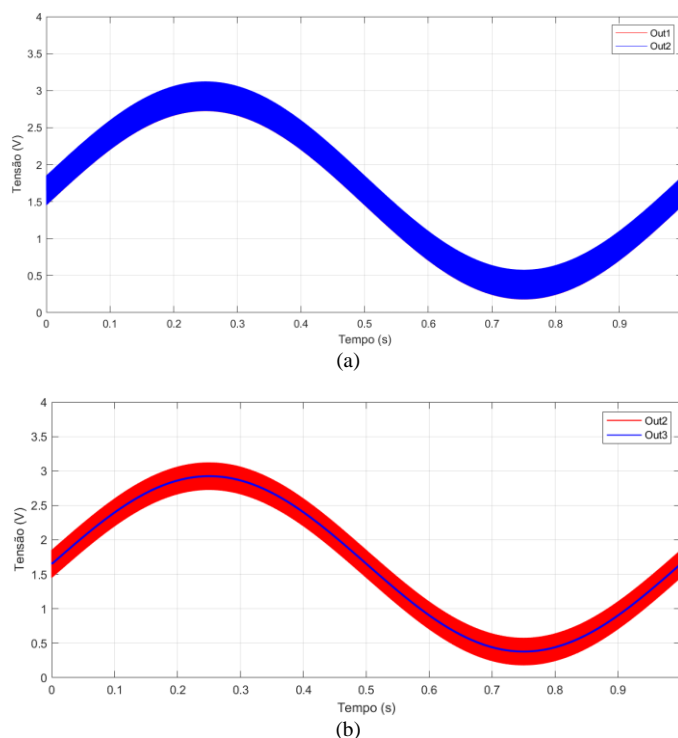
Fonte: O autor, 2024.

Para possibilitar a análise do circuito os *probes* de tensão do Proteus foram usados novamente para comparar os sinais, neste caso: Out1 corresponde a entrada do *buffer*, Out2 corresponde a saída do *buffer* e Out3 corresponde a saída final do sistema, após a adequação e filtragem do sinal. Analisando os gráficos expostos na Figura 21, é possível constatar que o circuito funciona em conformidade com o projeto.

Apesar da vasta gama de vantagens quando comparada com outras placas de desenvolvimento, o ESP32 carece de modelos e bibliotecas em *softwares* de simulação, por outro lado, placas de desenvolvimento da plataforma Arduino possuem inúmeras bibliotecas de fácil acesso. Para viabilizar os testes do algoritmo de medição por meio da simulação, optou-se pela substituição da placa ESP32 pelo Arduino Uno R3, visto que, apesar do Arduino Uno R3 possuir especificações menos robustas, ele oferece um poder de processamento adequado para os testes do algoritmo de medição, excluindo a parte de comunicação da simulação, e é compatível com os modelos disponíveis no Proteus.

Desta forma, foi necessário alterar a tensão de referência do circuito responsável por fazer o offset de 3,3 para 5 V, garantindo o ajuste no sistema de aquisição de dados centralizando a variação dos sinais dentro da faixa de 0 a 5 V do ADC disponível no Arduino.

Figura 21 – Resultados de simulação do circuito de aquisição e condicionamento de corrente



Fonte: O autor, 2024.

Para simular os TPs o modelo de transformador do Proteus foi parametrizado com a relação de transformação adequada. Já para simular os TCs, como não existe um modelo específico no *software*, uma fonte de corrente controlada por corrente com um coeficiente igual a relação de transformação foi utilizada. Para simular a alimentação do sistema uma fonte trifásica foi configurada para fornecer uma tensão de fase com valor RMS de 220 V, cargas diversas foram utilizadas para simular o comportamento da rede e instrumentos de medição ideais foram acoplados ao sistema, possibilitando a comparação com os valores obtidos pelo protótipo que são exibidas no terminal virtual. O circuito completo implementado no Proteus pode ser observado em detalhes na Figura 22.

Os resultados da simulação do protótipo com uma carga RL estão apresentados na Figura 23. Vale destacar que as cargas foram configuradas para consumir correntes em diferentes valores dentro do intervalo de medição projetada, além de possuir fatores de potência distintos para comprovar o funcionamento do algoritmo frente a diferentes ângulos de

defasagem entre a tensão e a corrente. Comparando os resultados obtidos no terminal de saída do MCU com as leituras dos voltímetros, amperímetros e wattímetros é possível concluir que o circuito desenvolvido em conjunto com o algoritmo de medição possui a capacidade de medir os diversos valores com exatidão, de modo suas medições correspondem às indicações dos instrumentos do Proteus, contendo uma pequena margem de erro.

Com o intuito de verificar o desempenho do protótipo frente a diferentes tipos de cargas, os resultados das simulações com cargas RC e RLC estão apresentados nas Figuras 24 e 25, respectivamente. Ao comparar os resultados obtidos pelo protótipo, exibidos no terminal de saída do MCU, com os valores obtidos nos instrumentos de medição do Proteus, torna-se evidente a consistência na obtenção das grandezas, que não é afetada significativamente pelas variações nas características da carga.

Ademais, ao simular um cenário de inversão do fluxo de potência no sistema, na Figura 26, os terminais de entrada do sensor de corrente da fase B foram invertidos. Como pode ser observado no terminal de saída do MCU, tanto o valor da potência ativa quanto o fator de potência tornam-se negativos, indicando a inversão. Dessa forma, é possível validar a bidirecionalidade da medição do protótipo.

Figura 22 – Circuito para simulação de funcionamento do protótipo

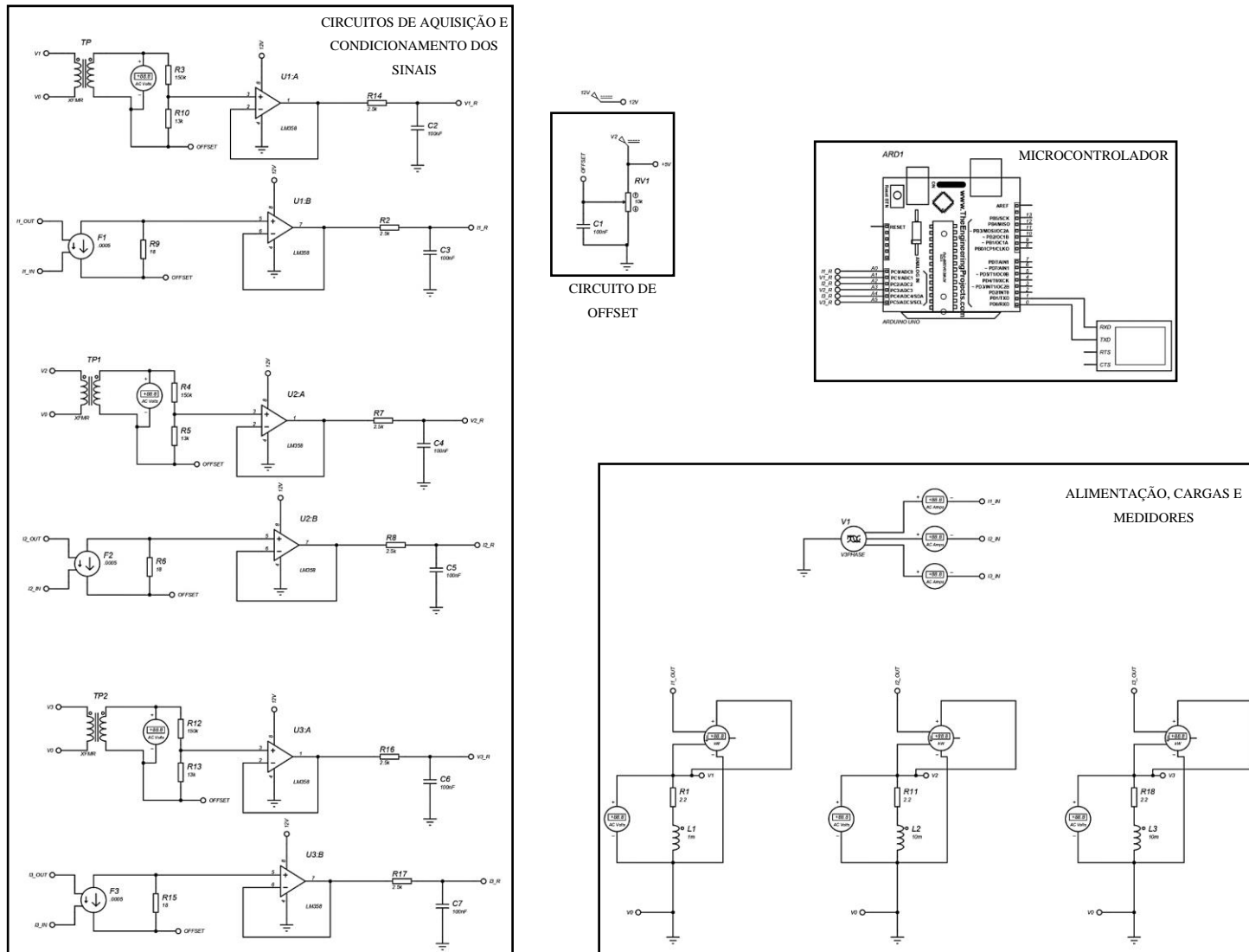
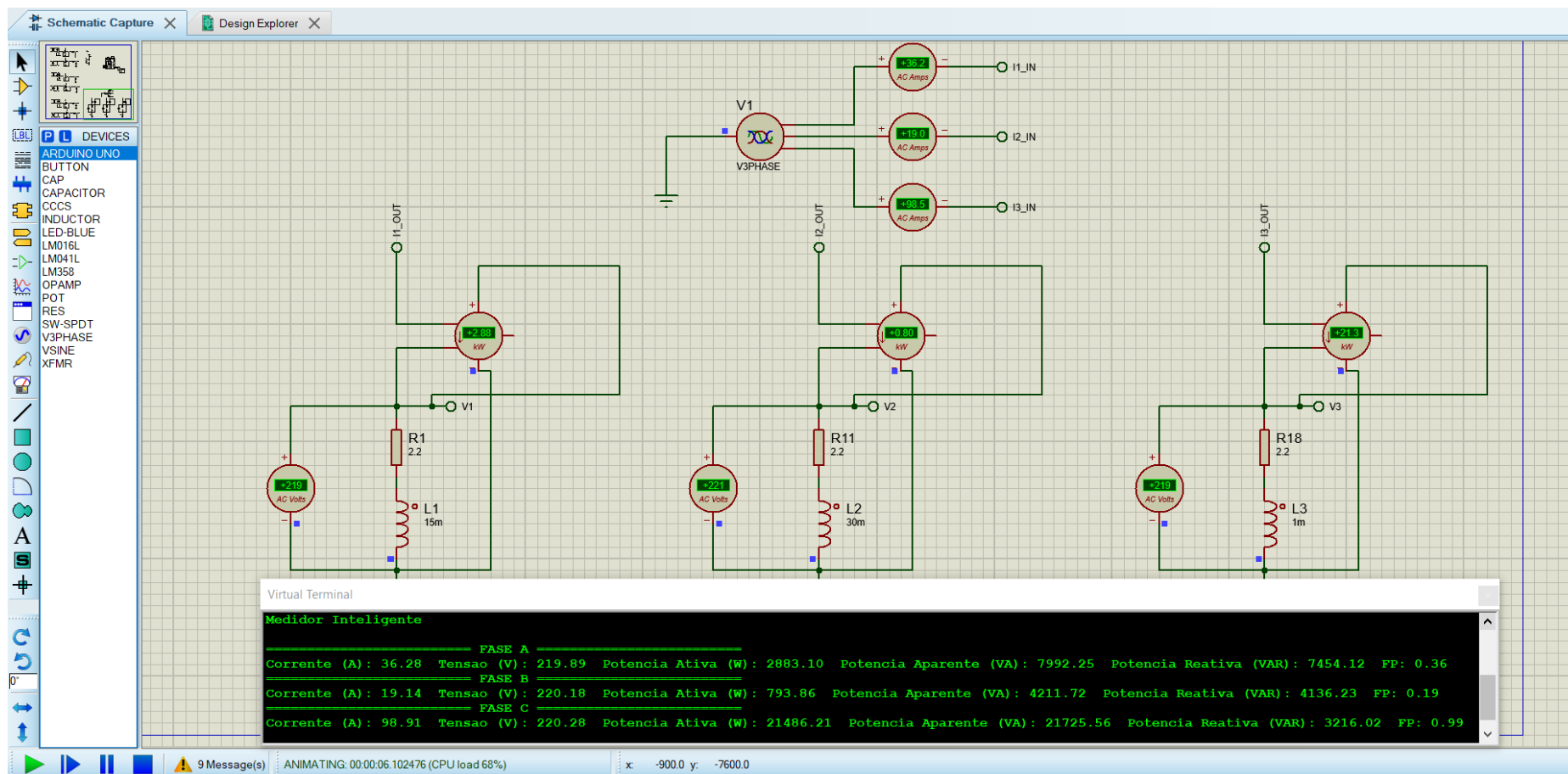
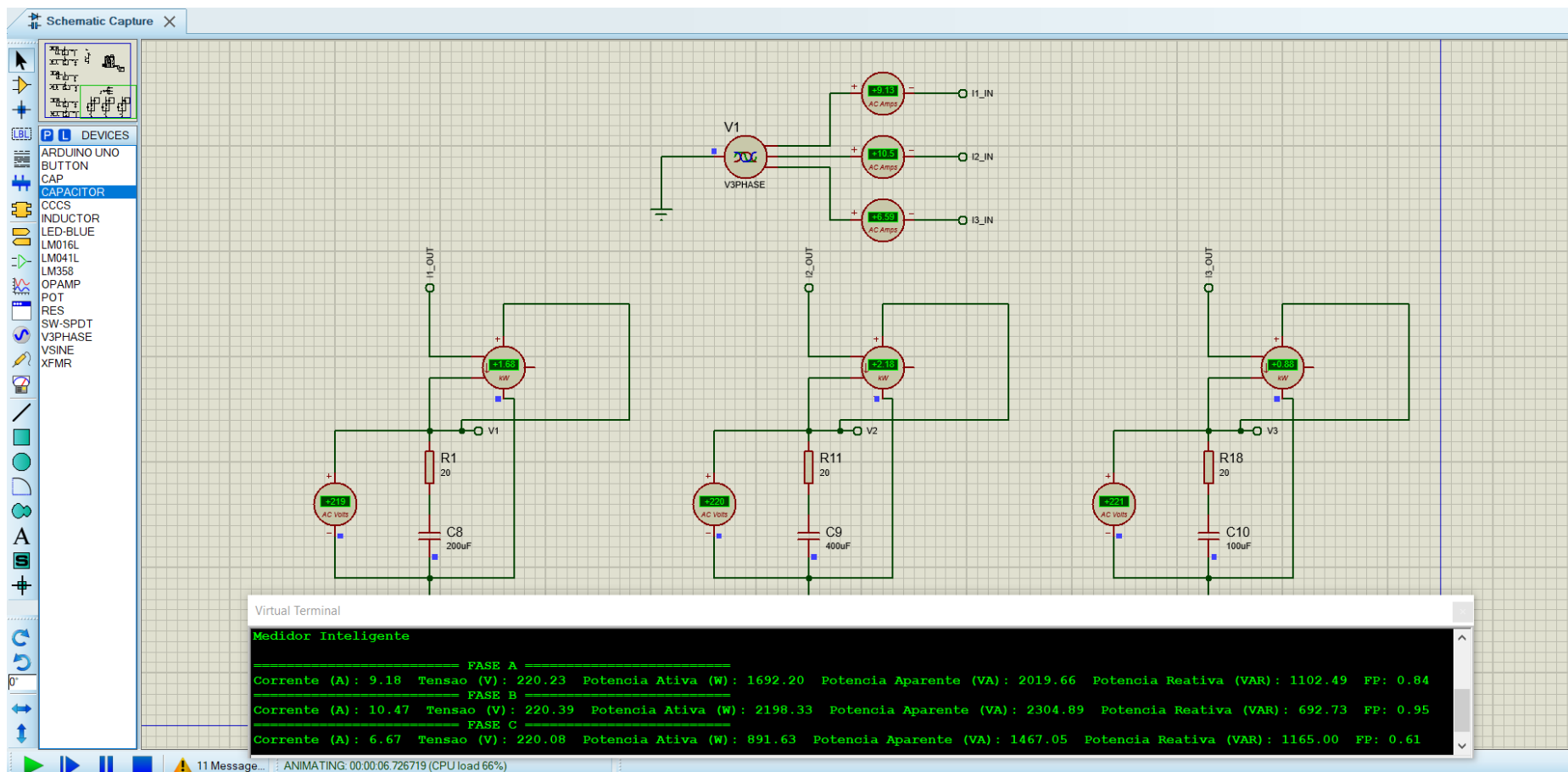


Figura 23 – Resultados da simulação do protótipo com carga RL



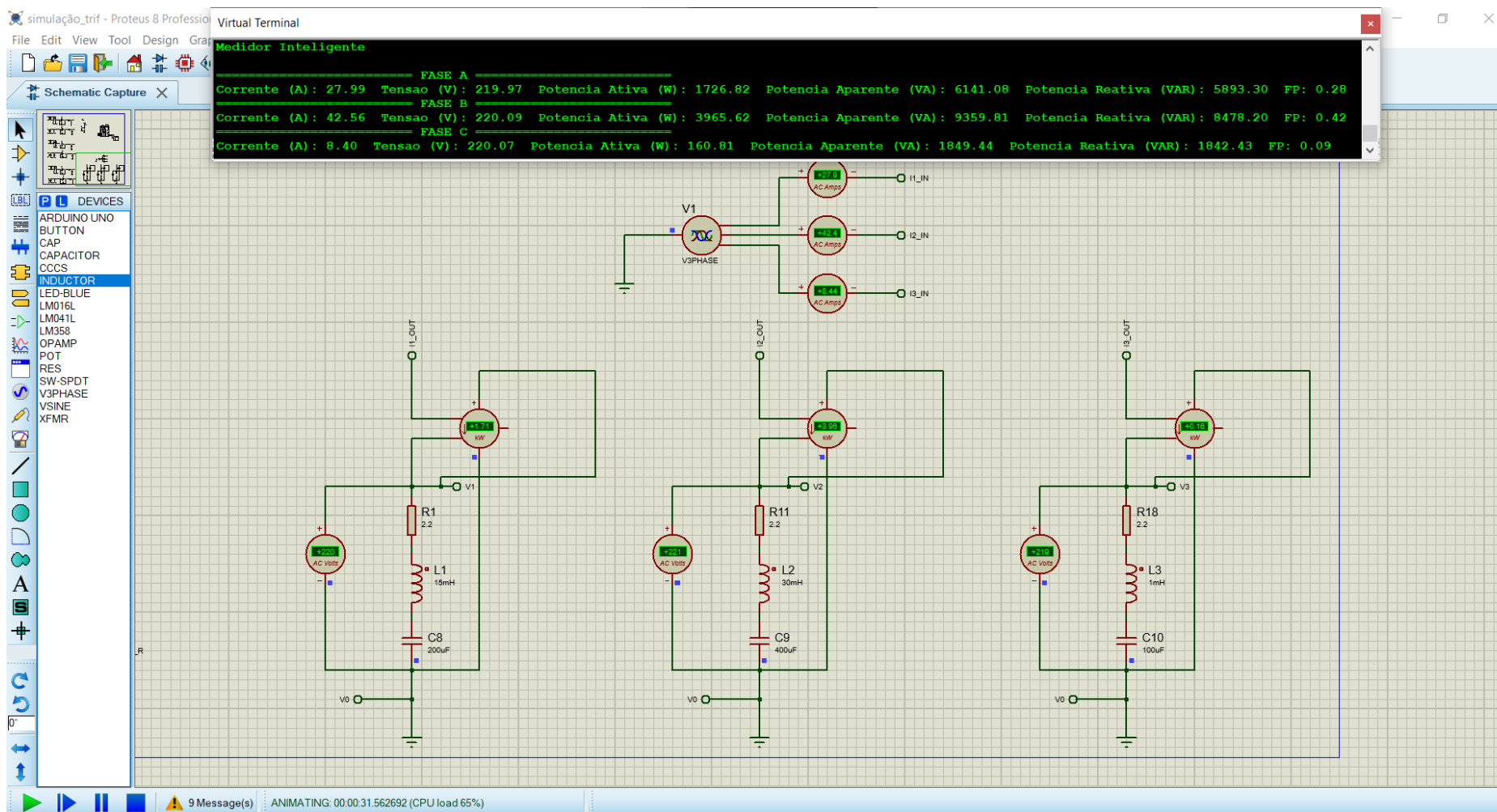
Fonte: O autor, 2024.

Figura 24 – Resultados da simulação do protótipo com carga RC



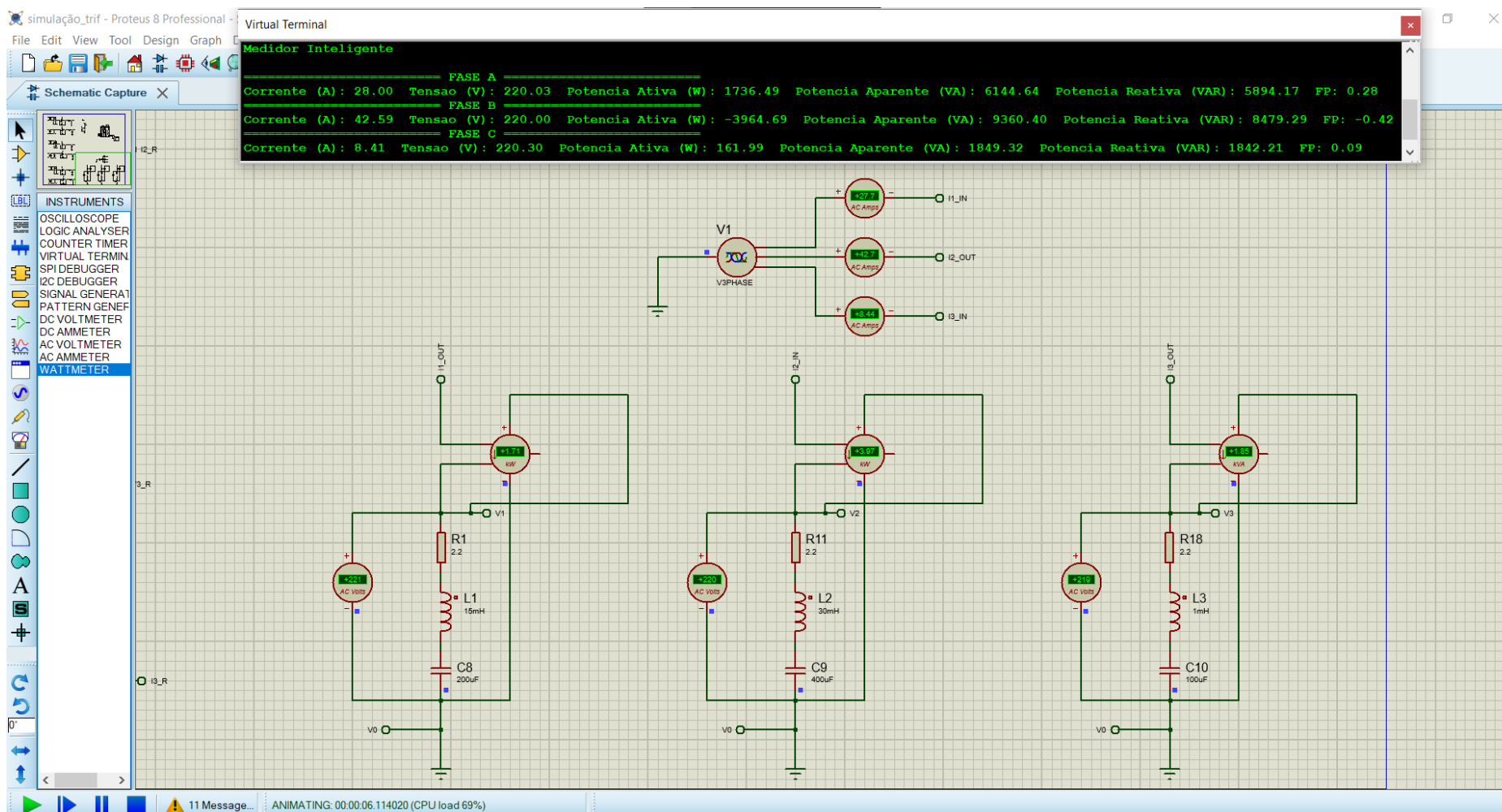
Fonte: O autor, 2024.

Figura 25 – Resultados da simulação do protótipo com carga RLC



Fonte: O autor, 2024.

Figura 26 – Indicação da inversão no fluxo de potência



Fonte: O autor, 2024.

Para facilitar a visualização dos resultados, a Tabela 2 apresenta a comparação dos valores numéricos e seus respectivos erros associados para cada caso apresentado, tomando como referência a tensão fornecida pela fonte, a corrente e a potência ativa exibidas nos instrumentos do Proteus.

Tabela 3 – Comparação dos resultados das simulações

Fase	Tipo de carga	Grandeza	Valor de referência	Valor medido	Erro	Erro (%)
A	RL	Tensão (V)	220	219,89	0,11	0,05
		Corrente (A)	36,2	36,28	-0,08	0,22
		Potência Ativa (kW)	2,88	2,88	0	0
	RC	Tensão (V)	220	220,23	-0,23	0,1
		Corrente (A)	9,13	9,18	-0,05	0,55
		Potência Ativa (kW)	1,68	1,69	-0,01	0,6
	RLC	Tensão (V)	220	219,97	0,03	0,01
		Corrente (A)	27,9	27,99	-0,09	0,32
		Potência Ativa (kW)	1,71	1,72	-0,01	0,58
B	RL	Tensão (V)	220	220,18	-0,18	0,08
		Corrente (A)	19	19,14	-0,14	0,74
		Potência Ativa (kW)	0,8	0,79	0,01	1,25
	RC	Tensão (V)	220	220,39	-0,39	0,18
		Corrente (A)	10,5	10,47	0,03	0,29
		Potência Ativa (kW)	2,18	2,19	-0,01	0,46
	RLC	Tensão (V)	220	220,09	-0,09	0,04
		Corrente (A)	42,4	42,56	-0,16	0,38
		Potência Ativa (kW)	3,96	3,96	0	0
C	RL	Tensão (V)	220	220,28	-0,28	0,13
		Corrente (A)	98,5	98,91	-0,41	0,42
		Potência Ativa (kW)	21,3	21,4	-0,1	0,47
	RC	Tensão (V)	220	220,08	-0,08	0,04
		Corrente (A)	6,59	6,67	-0,08	1,21
		Potência Ativa (kW)	0,88	0,89	-0,01	1,14
	RLC	Tensão (V)	220	220,07	-0,07	0,03
		Corrente (A)	8,44	8,40	0,04	0,45
		Potência Ativa (kW)	0,16	0,16	0	0

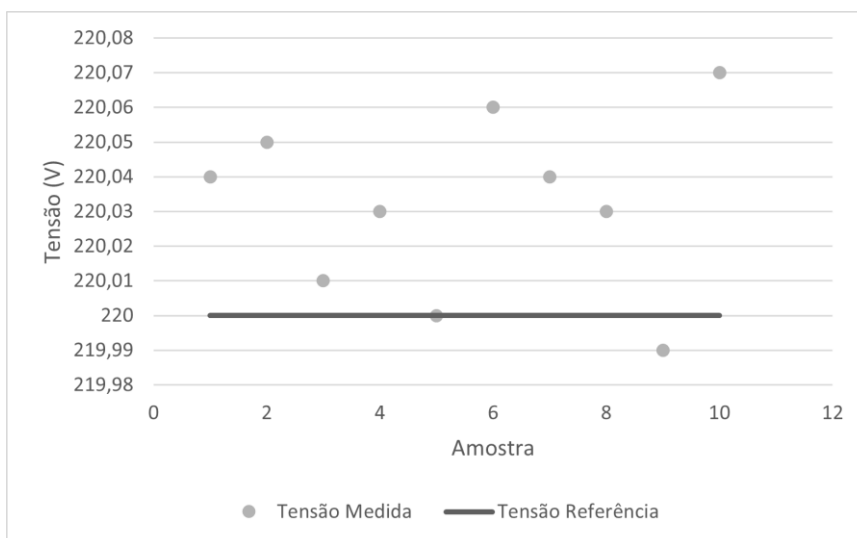
Fonte: O autor, 2024.

Desta forma, é possível constatar que o maior erro percentual encontrado nos casos estudados foi de 1,25%, confirmando a exatidão do protótipo utilizando o *hardware* e o algoritmo de medição desenvolvidos. Além disso, ao analisar os sinais de erro, observa-se consistentemente que o medidor tende a apresentar valores ligeiramente inferiores aos reais da grandeza medida, reforçando a confiabilidade do dispositivo, mostrando uma tendência conservadora em suas medições.

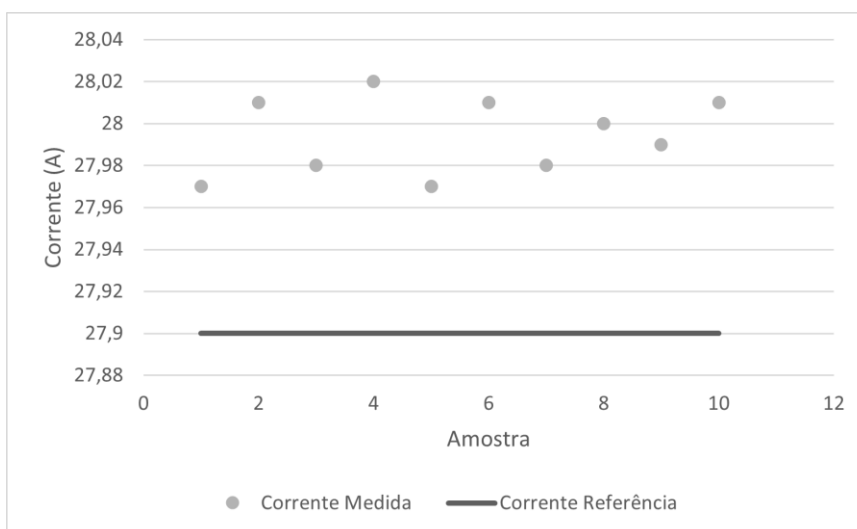
Por fim, para verificar a precisão do protótipo, medições espaçadas no tempo das grandezas de tensão, corrente e potência ativa da fase A com a carga RLC foram coletadas, conforme pode ser observado na Figura 27.

Ao analisar os gráficos de corrente e potência, é possível observar uma tendência de medição ligeiramente superior ao valor de referência, porém com valores consistentes e variações mínimas, geralmente na segunda casa decimal, evidenciando uma precisão bastante acurada. Por outro lado, o gráfico das medições de tensão mostra uma variação maior entre as medições, sem uma linha de tendência bem definida. Apesar disso, as variações também se limitam principalmente à segunda casa decimal, o que torna os resultados satisfatórios para a aplicação.

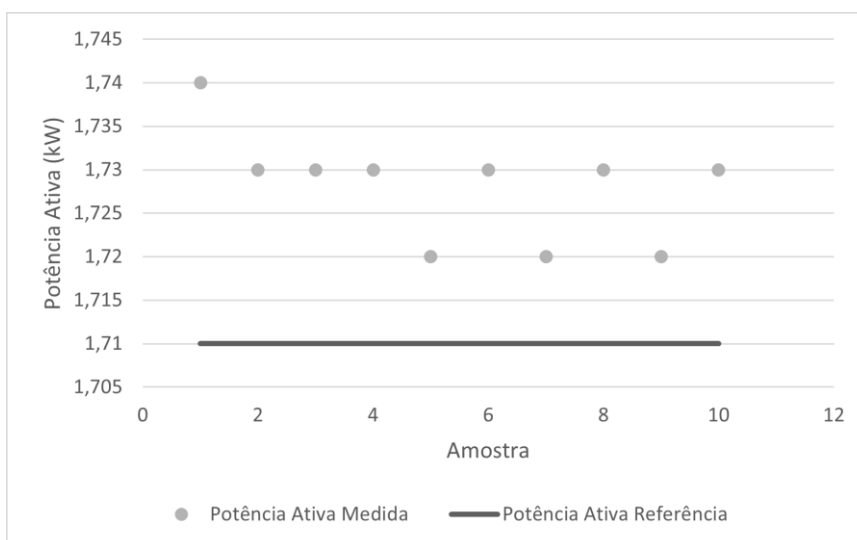
Figura 27 – Gráficos de dispersão das medidas de tensão, corrente e potência ativa



(a)



(b)



(c)

Fonte: O autor, 2024.

5 CONCLUSÃO

A partir do presente trabalho pode-se inferir o papel fundamental das novas tecnologias aplicadas na modernização do SEP, que corrobora com o aumento da eficiência da geração, transmissão, distribuição e consumo de energia; visando mitigar o crescimento da lacuna existente entre a oferta e demanda de eletricidade, de modo que o SM, foco principal do trabalho, é tido como uma peça-chave para concretização desta modernização, pois atua como o elo físico que interliga a rede elétrica com o sistema de gerenciamento remoto.

Neste âmbito, como um número considerável de dispositivos deste tipo se fazem necessários, visto que a implementação prática do conceito de SG depende da atuação em conjunto dos diversos dispositivos que a compõem e fornecem informações da rede, o custo final do equipamento torna-se um ponto crucial para possibilitar esta modernização, trazendo à tona a preocupação de manter a precisão e contemporaneidade dos dispositivos utilizando tecnologias e métodos que não se tornem obsoletos frente ao crescente avanço tecnológico nas áreas de eletrônica, processamento de sinais e comunicação. Por conseguinte, o protótipo foi idealizado com o intuito de ser uma alternativa de baixo custo mantendo a qualidade, exatidão e segurança na coleta e envio das informações.

Durante o desenvolvimento do trabalho os conceitos, princípios de funcionamento e principais componentes utilizados para aplicações deste tipo foram explorados, objetivando viabilizar a implantação de SMs na rede de distribuição. Os estudos foram concentrados na elaboração da parte do *hardware* e *software* do protótipo, sempre visando o custo-benefício, com a utilização de métodos de processamento de sinais com baixo custo computacional e boa exatidão, protocolo de comunicação acessível e componentes de baixo custo. Também se focou na parte da interface e armazenamento dos dados provenientes das medições fornecidas pelo protótipo, que fica situada no campo do MDSM tendo o banco de dados, métodos de inserção de informações, consulta e apresentação das informações de forma simples e objetiva como partes principais.

Além do protótipo se mostrar bastante flexível para diversas aplicações, podendo, por exemplo, trabalhar em conjunto com outros SMs em um esquema mestre-escravo regulando parâmetros de data e hora, alterando bandeiras tarifárias, fornecendo dados para comparação visando a detecção de fraudes e furtos, fornecendo dados para auxiliar na estimativa dos parâmetros de continuidade da rede de distribuição, ou simplesmente realizando medições de uma unidade consumidora específica. Quando comparado com os demais dispositivos estudados na literatura, o protótipo foi desenvolvido com um design que assimila as boas

práticas utilizadas nos diferentes trabalhos para possibilitar a medição e comunicação de forma precisa, confiável e segura. Um diferencial é o *hardware* criado para aquisição de dados, que, apesar de não ser complexo, mostrou-se bastante eficaz.

Por fim, é possível concluir que o trabalho obteve bons resultados frente a grande multidisciplinaridade que envolve a criação de todas as partes integrantes do projeto, fornecendo uma solução funcional e com uma boa relação custo-benefício. Incluindo desde a elaboração da parte analógica com o projeto e definição dos sensores para coleta dos sinais de interesse, filtros e fonte de alimentação. Da parte digital, incluindo a definição do MCU a ser utilizado, métodos de conversão A/D, métodos de processamento dos sinais, protocolos de comunicação interna e externa. Até a parte da infraestrutura virtual, na criação do banco de dados, dos métodos de conexão e envio de informações para o banco de dados, e interface de exibição das informações.

Para realização de trabalhos futuros, é importante enfatizar a necessidade do aprofundamento no estudo sobre o processamento digital de sinais, programação e design de sistemas embarcados, ferramentas que são de extrema importância para o aperfeiçoamento do protótipo. Ademais, ainda se faz necessária a implementação prática do *hardware* do protótipo, que é indispensável para comprovação dos estudos e fomento de futuras adequações para possibilitar a criação de um produto comercializável. Existe também a possibilidade da realização de estudos voltados a análise dos dados obtidos, métodos de comunicação seguros, sistemas de gerenciamento e armazenamento das informações e métodos de processamento de sinal aprimorados, que complementam o trabalho desenvolvido.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 5 – Sistema de medição e procedimentos de leitura**. 2021. Disponível em:

<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html> . Acesso em: 01 fev. 2024.

BAHMANYAR, A.; JAMALI, S.; ESTEBSARI, A.; PONS, E.; BOMPARD, E.; PATTI, E.; ACQUAVIVA, A. Emerging smart meters in electrical distribution systems: Opportunities and challenges. In: 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2016, Shiraz.

Anais eletrônicos [...] Iranian Conference on Electrical Engineering, 2016, Shiraz, p. 1082-1087. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7585682> . Acesso em: 01 fev. 2024

BALBIOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 3. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2019.

BARAI, G. R.; KRISHNAN, S.; VENKATESH, B. Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid-a review. In: 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference, 2015, London, ON, Canada. **Anais eletrônicos [...]** Electrical Power and Energy Conference, 2015, London, ON, Canada, p. 138-145. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7379940> . Acesso em: 01 fev. 2024.

BELCHIOR, F. N. **Apostila de Medidas Elétricas**. Minas Gerais, 2014. (Apostila).

BIAN, D.; KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. Analysis of communication schemes for Advanced Metering Infrastructure (AMI). In: 2014 IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition, 2014, National Harbor, MD, USA. **Anais eletrônicos [...]** General Meeting, Conference & Exposition, 2014, National Harbor, MD, USA, p. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6939562> . Acesso em: 01 fev. 2024.

BRITO, J. L. G. de. **Sistema para monitoramento de consumo de energia elétrica particular, em tempo real e não invasivo utilizando a tecnologia Arduino**. 2016. 106 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016. Disponível em:

https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/pdflibrary/08_tcc2016_joao_luisgrizinskybrito_0.pdf . Acesso em: 08 fev. 2024.

CARRATÙ, M.; FERRO, M.; PIETROSANTO, A.; PACIELLO, V. Smart power meter for the iot. In: 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics, 2018, Porto. **Anais eletrônicos [...]** International Conference on Industrial Informatics, 2018, Porto, p. 514-519. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8472018> . Acesso em: 01 fev. 2024.

COOLEY, James W.; TUKEY, John W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. **Mathematics of computation**, v. 19, n. 90, p. 297-301, 1965. Disponível em: <https://community.ams.org/journals/mcom/1965-19-090/S0025-5718-1965-0178586-1/S0025-5718-1965-0178586-1.pdf> . Acesso em: 01 fev. 2024.

DINIZ, B. R. A.; EVANGELISTA, A. A.; ALEXANDRIA, A. R. de. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DIGITAL DE ENERGIA ELÉTRICA MONOFÁSICO PARA APLICAÇÕES RESIDENCIAIS. **HOLOS**, v. 7, p. 55-68, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481554852006.pdf> . Acesso em: 05 jan. 2024.

GHOSAL, A.; CONTI, M. Key management systems for smart grid advanced metering infrastructure: A survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 3, p. 2831-2848, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8676005> . Acesso em: 09 jan. 2024.

HASHMI, M. Survey of smart grids concepts worldwide. **VTT Technical Research Centre of Finland**, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Statistics Data Browser**: electricity generation by source. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel> . Acesso em: 05 jan. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Statistics Data Browser**: electricity consumption. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons> . Acesso em: 05 jan. 2024.

LI, Z.; PEI, B.; ZHANG, X.; LIU, H.; TONG W. A Bidirectional Electric Energy Metering Algorithm based on the Fundamental Component Extraction and Alternating Current Sampling. In: 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, 2018, Xi'an. **Anais eletrônicos [...]** Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, 2018, Xi'an, p. 1272-1279. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8469438> . Acesso em: 01 fev. 2024.

LIMA, Al. L. de. **Desenvolvimento de um sistema para aquisição e processamento de sinais utilizando a plataforma TivaWare™ para aplicações em Smart Grid**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7633> . Acesso em: 01 fev. 2024.

MAXIM INTEGRATED. **DS3231: Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal**. 2015. Disponível em: < <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf> > Acesso em: 01 fev. 2024.

MENG, X. Research on the inspection and monitoring system of power equipment based on cloud storage platform. In: 2018 Chinese control and decision conference, 2018, Shenyang. **Anais eletrônicos [...]** Chinese control and decision conference, 2018, Shenyang, p. 1567-1571. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8407377> . Acesso em: 01 fev. 2024.

MUNSHI, Amr A.; YASSER, A.-RI Mohamed. Big data framework for analytics in smart grids. **Electric Power Systems Research**, v. 151, p. 369-380, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779617302559> . Acesso em: 09 jan. 2024.

NEOENERGIA. **Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual**. 2020. Disponível em: [https://servicos.celpe.com.br/residencial-rural/Documents/DIS-NOR-036%20-%20Fornecimento%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20em%20M%C3%A9dia%20Tens%C3%A3o%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20C3%A0%20Edifica%C3%A7%C3%A3o%20Individual\(1\).pdf](https://servicos.celpe.com.br/residencial-rural/Documents/DIS-NOR-036%20-%20Fornecimento%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20em%20M%C3%A9dia%20Tens%C3%A3o%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20C3%A0%20Edifica%C3%A7%C3%A3o%20Individual(1).pdf) . Acesso em: 01 de fev. 2024.

OLIVEIRA, E. **Conhecendo o NodeMCU-32S ESP-32**. MasterWalker Eletronic Shop, 2017. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/embarcados/esp32/conhecendo-o-nodemcu-32s-esp32/> . Acesso em: 01 fev. 2024.

OPEN ENERGY MONITOR. **Electricity Monitoring: AC Power Theory-Arduino Maths**. Disponível em: <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ac-power-theory/arduino-maths> . Acesso em: 09 jan. 2024.

OPEN ENERGY MONITOR. **Learn: Electricity Monitoring**. Disponível em: <https://docs.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/index.html> . Acesso em: 18 jan. 2024.

ORLANDO, M. et al. A smart meter infrastructure for smart grid IoT applications. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 14, p. 12529-12541, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9659809> . Acesso em: 09 jan. 2024.

PAREDES, H. K. M. **Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades**. 2011. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2011. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1615493> . Acesso em: 12 fev. 2024.

PEREIRA, L. S. **Medidor inteligente para redes de distribuição de energia elétrica**. 2016. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2016. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1628479> . Acesso em: 12 fev. 2024.

RAFIEI, M; EFTEKHARI, S. M. A practical smart metering using combination of power line communication (PLC) and WiFi protocols. In: 2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution, 2012, Theran. **Anais eletrônicos [...]** Conference on Electrical Power Distribution, 2012, Theran, p. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6254548> . Acesso em: 01 fev. 2024.

SALMAN, K. **Introduction to the smart grid**. London: The Institution of Engineering and Technology, 271 p., 2017.

SANTOS, B. P. et al. Internet das coisas: da teoria à prática. In: Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016, Minas Gerais. **Anais**

eletrônicos [...] Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016, Minas Gerais, v. 31, p. 16. Disponível em: <https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf> . Acesso em: 01 fev. 2024.

SANTOS, T. S. **Projeto e implementação de dispositivo eletrônico inteligente flexível para aplicações em smart grid**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13510> . Acesso em: 15 fev. 2024.

SOUSA, E. L. de et al. Development a low-cost wireless smart meter with power quality measurement for smart grid applications. **Sensors**, v. 23, n. 16, p. 7210, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/16/7210>. Acesso em: 01 fev. 2024.

UMANS, S. D.; tradução: Anatólio Laschuk. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WERANGA, K. S.; KUMARAWADU, S.; CHANDIMA, D. P. **Smart Metering Design and Applications**. Moratuwa: Springer, 2014. 141p.

WOLANIUK G. B. **Medidor de Energia em Média Tensão**. 2011. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba, 2011. Disponível em: <https://lactec.org.br/wp-content/uploads/2019/11/GiordanoWolaniuk.pdf> . Acesso em: 01 fev. 2024.

YUNUS, M. S. F. M. et al. Smart Meter Based on IoT Platform. In: 2023 9th International Conference on Computer and Communication Engineering, 2023, Kuala Lumpur. **Anais eletrônicos [...]** International Conference on Computer and Communication Engineering, 2023, Kuala Lumpur, p. 69-74. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246032> . Acesso em: 01 fev. 2024.