

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ruan Juarez Bulsing

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ANALISADOR DE ENERGIA
DIGITAL PARA ENSAIO DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Santa Maria, RS
2024

Ruan Juarez Bulsing

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ANALISADOR DE ENERGIA DIGITAL
PARA ENSAIO DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro de Controle e Automação**.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Concatto Beltrame

Santa Maria, RS
2024

Ruan Juarez Bulsing

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ANALISADOR DE ENERGIA DIGITAL
PARA ENSAIO DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro de Controle e Automação**.

Aprovado em 01 de fevereiro do 2024.

Rafael Concatto Beltrame, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Fernanda de Moraes Carnielutti, Dra. (UFSM)

Frederico Menine Schaf, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha gratidão a todas as pessoas e instituições que desempenharam papéis fundamentais na realização deste projeto e para a conclusão deste relatório. Seus apoios e incentivos foram fundamentais para o sucesso desta empreitada.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Simone Bulsing e Ivã Bulsing e irmã Eduarda Bulsing, pelo incentivo e apoio durante toda a jornada acadêmica. A minha noiva, Jovana Bernardt, agradeço pela inspiração e pelo suporte emocional que foram indispensáveis para superar desafios.

Aos amigos e colegas, em especial ao Lucas Mazocco e ao Abel Gehm, manifesto minha gratidão pela colaboração desde o início do projeto. O compartilhamento de ideias e conhecimentos foi crucial para o progresso e aprimoramento da pesquisa.

Agradeço meus professores, a equipe do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (NUPEDEE), o Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC) e ao Instituto de Redes Inteligentes (INRI) por toda a ajuda técnica, da teoria à prática do desenvolvimento do trabalho e que contribuíram para a minha formação.

Ao meu estimado professor e orientador, Rafael Beltrame, agradeço pelo comprometimento, paciência, e pelos ensinamentos, conselhos profissionais e atenção dedicados a mim. Sua disposição em contribuir para meu crescimento profissional e pessoal foi notável.

Por fim, expresso minha gratidão à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por proporcionar as condições necessárias para estudar, trabalhar e aprender ao longo destes anos. O compromisso com a excelência acadêmica em uma universidade pública e gratuita foi de importância vital para minha formação.

RESUMO

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ANALISADOR DE ENERGIA DIGITAL PARA ENSAIO DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

AUTOR: Ruan Juarez Bulsing
ORIENTADOR: Rafael Concatto Beltrame

Este Trabalho aborda o projeto de um analisador de energia digital capaz de realizar medidas elétricas em transformadores elétricos sob ensaio. Os referidos transformadores são ensaiados no Laboratório de Ensaio em Média Tensão (INRIMT) do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O analisador de energia digital é projetado para ter uma resolução mínima de 20 bits, uma alta taxa de amostragem e uma elevada precisão, visando o melhor custo benefício com respeito à disponibilidade de componentes no mercado. Este circuito estará embarcado em uma placa de circuito impresso (PCI) capaz de fazer a leitura da tensão e da corrente aplicadas no transformador, com etapas de proteção contra sobretensões e sobrecorrentes e filtros contra ruídos eletromagnéticos. O desenvolvimento do projeto utiliza os programas PSIM[®], LTspice, Octave, KiCAD e Visual Studio. A PCI terá um microcontrolador que deve processar os dados e enviar para um computador, via USB, para um programa que executará os cálculos e mostrará os valores de tensões e correntes médias e eficazes, potências ativa, reativa e aparente, fator de potência e taxa de distorção harmônica.

Palavras-chave: Analisador de Energia Digital, Ensaio em transformadores elétricos, Placa de circuito impresso, Instrumentação.

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DIGITAL POWER ANALYSER FOR ELECTRIC TRANSFORMER TESTS

AUTHOR: Ruan Juarez Bulsing
ADVISOR: Rafael Concatto Beltrame

This Project addresses the design of a digital power analyzer capable of conducting electrical measurements on transformers under testing. The aforementioned transformers undergo testing at the Laboratory of Medium Voltage Tests (INRIMT) within the Institute of Intelligent Networks (INRI) at the Federal University of Santa Maria (UFSM). The digital power analyzer is designed to have a minimum resolution of 20 bits, a high sampling rate, and high accuracy, aiming for the best cost-benefit ratio with respect to component availability in the market. This circuit will be embedded on a printed circuit board (PCB) capable of reading the voltage and current applied to the transformer, with protection stages against overvoltages and overcurrents and filters against electromagnetic noise. The project development utilizes the PSIM®, LTspice, Octave, KiCAD, and Visual Studio programs. The PCB will incorporate a microcontroller responsible for processing the data and sending it to a computer via USB, where a program will perform calculations and display values of average and effective voltages and currents, active, reactive, and apparent powers, power factor, and harmonic distortion rate.

Keywords: Digital Power Analyser, Transformer testing, Printed circuit board, Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Relação entre o crescimento do consumo de energia elétrica com o crescimento econômico e a emissão de gases de efeito estufa mundial.	13
Figura 1.2 – Relação entre o crescimento do consumo de energia elétrica com o crescimento econômico e a emissão de gases de efeito estufa no Brasil.	14
Figura 1.3 – Esquemático do princípio de funcionamento de um transformador.	16
Figura 1.4 – Representação da instrumentação para ensaios em transformadores no INRIMT.	18
Figura 1.5 – Esquemático do sistema de medição proposto para os ensaios em transformadores.	19
Figura 2.1 – Símbolo de um amplificador operacional.	22
Figura 2.2 – Circuito básico de um amplificador de instrumentação com AmpOps.	22
Figura 2.3 – Divisor de tensão resistivo diferencial.	23
Figura 2.4 – Princípio de funcionamento do sensor por efeito Hall com campo magnético.	24
Figura 2.5 – Filtro passa-baixa.	25
Figura 2.6 – Proteção contra sobretensão.	25
Figura 2.7 – Símbolo do diodo <i>schottky</i> e gráfico comparativo da polarização direta do diodo <i>schottky</i> e do diodo PN.	26
Figura 2.8 – Diagrama de blocos de um isolador digital.	27
Figura 2.9 – Padrão de comunicação SPI.	28
Figura 3.1 – Fluxograma de funcionamento do analisador de energia digital.	31
Figura 3.2 – Exemplo de aplicação do amplificador de instrumentação AD8221.	38
Figura 3.3 – Circuito com diodos <i>Schottky</i> para proteção do conversor A/D.	39
Figura 3.4 – Simulação do circuito de condicionamento de tensão.	40
Figura 3.5 – Resultado da simulação do circuito condicionador de tensão.	40
Figura 3.6 – Configuração do circuito amplificador subtrator.	42
Figura 3.7 – Circuito de instrumentação do sinal de corrente em tensão.	43
Figura 3.8 – Resultado da simulação do circuito medidor de corrente.	44
Figura 3.9 – Microcontrolador STM32F401CCU6.	45
Figura 3.10 – Esquemático do circuito medidor de tensão.	46
Figura 3.11 – Esquemático do circuito medidor de corrente.	47
Figura 3.12 – Primeira parte do esquemático dos reguladores de tensão.	49
Figura 3.13 – Segunda parte do esquemático dos reguladores de tensão.	50
Figura 3.14 – Esquemático do conversor A/D e do isolador.	51
Figura 3.15 – Esquemático do circuito do microcontrolador.	52
Figura 3.16 – Esquemático dos conectores da PCI.	53
Figura 3.17 – Disposição dos componentes na PCI com as trilhas e planos de terra (primeira versão).	54
Figura 3.18 – Visualização em 3D da PCI projetada (primeira versão).	55
Figura 3.19 – Visão superior da placa do analisador de energia (primeira versão).	56
Figura 3.20 – Disposição dos componentes na PCI com as trilhas e planos de terra (segunda versão).	57
Figura 3.21 – Visualização em 3D da PCI projetada (segunda versão).	57
Figura 3.22 – Visão superior da placa do analisador de energia, destacando as diferentes regiões (segunda versão).	58
Figura 3.23 – Visão superior da placa do analisador de energia (segunda versão).	59
Figura 3.24 – Algoritmo base dos programas.	60
Figura 3.25 – Algoritmo do <i>firmware</i>	61

Figura 3.26 – Algoritmo do programa supervisorio do analisador de energia digital.....	63
Figura 3.27 – Análise experimental: forma de onda do sinal de tensão.....	64
Figura 3.28 – Análise experimental: forma de onda do sinal de corrente.....	66
Figura 3.29 – Corte de um período da comunicação entre o MCP3911 e o STM32.....	68
Figura 3.30 – Resultados do primeiro teste do sistema supervisorio.....	71
Figura 3.31 – Resultado gráfico da simulação do sinal no PSIM®.....	72
Figura 3.32 – Resultados do segundo teste do sistema supervisorio.....	73
Figura 3.33 – Resultado gráfico da simulação do sinal no PSIM.....	74
Figura 3.34 – Janela de configuração do analisador de energia digital.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Critérios de escolha do conversor A/D.....	32
Tabela 3.2 – Valores das variáveis.	34
Tabela 3.3 – Variação da resolução por <i>OSR3</i>	35
Tabela 3.4 – Corrente de consumo dos componentes alimentados por reguladores de tensão.	48
Tabela 3.5 – Resultado experimental do divisor resistivo como sensor de tensão.....	65
Tabela 3.6 – Resultado do experimento no sensor de corrente por efeito <i>Hall</i>	66
Tabela 3.7 – Resultados do primeiro ensaio do sistema supervisorio	72
Tabela 3.8 – Resultados do segundo ensaio do sistema supervisorio.	74

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D - Analógico/Digital
AIE - Agência Internacional de Energia
AMCLK - Frequência Mestre Analógica
AmpOp - Amplificador Operacional
App – Corrente de pico-a-pico
CA - Corrente Alternada
CC - Corrente Contínua
CEI - Comissão Eletrotécnica Internacional
CEM - Compatibilidade Eletromagnética
CEPEL - Centro de Pesquisa em Energia Elétrica
CI - Circuito Integrado
DMCLK - Frequência Mestre Digital
DRMCLK - Frequência de Taxa de Dados
FH - Frequência Harmônica
FS - Frequência do Sinal
GEPOC - Grupo de Eletrônica de Potência e Controle
IEE - Instituto de Energia e Ambiente
Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INRI - Instituto de Redes Inteligentes
INRIMT - Laboratório de Média Tensão do INRI
LATEC - Laboratório de Alta Tensão dos Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAT-EFEI - Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá
MCLK - Frequência Mestre
OSR - Regulador da Taxa de Amostragem
PCI - Placa de Circuito Impresso
PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem
PIB - Produto Interno Bruto
SGE - Sistema de Gestão de Energia
SPI - Interface Periférica Serial
TC - Transformador de Corrente
TCONV - Tempo de Conversão
TP - Transformadores de Potencial
TTL - Transistor-Transistor Logic
UART - Receptor/transmissor assíncrono universal
USB - Universal Serial Bus
USP - Universidade de São Paulo
Vpp - Tensão de pico-a-pico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 CIRCUITO DE INSTRUMENTAÇÃO	21
2.1.1 Amplificador operacional e amplificador de instrumentação	21
2.1.2 Sensor de tensão.....	22
2.1.3 Sensor de corrente	23
2.1.4 Filtros passivos.....	24
2.1.4.1 <i>Filtro passa baixa de 1ª ordem</i>	24
2.1.4.2 <i>Filtro anti-aliasing.....</i>	25
2.1.5 Circuitos de proteção.....	25
2.1.6 Conversor A/D e a comunicação SPI	27
2.1.7 Microcontrolador.....	28
2.2 CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI).....	29
2.3 SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO DOS DADOS.....	30
2.3.1 Linguagem de programação C#	30
3 ANALISADOR DE ENERGIA DIGITAL PROPOSTO.....	31
3.1 ESTRUTURA E DEMANDA DO CIRCUITO	31
3.2 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL	32
3.3 CONDICIONAMENTO DO SINAL DE TENSÃO	35
3.3.1 Divisor de tensão resistivo.....	35
3.3.2 Filtro passa-baixa passivo de primeira ordem.....	36
3.3.3 Instrumentação do sinal.....	37
3.3.4 Filtro <i>anti-aliasing</i>	38
3.3.5 Proteção por diodos Schottky	39
3.3.6 Simulação do circuito de tensão	39
3.4 CONDICIONAMENTO DO SINAL DE CORRENTE.....	41
3.4.1 Instrumentação do sinal convertido de corrente em tensão	41
3.5 MICROCONTROLADOR E COMUNICAÇÃO	44
3.6 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	45
3.6.1 Esquemático do analisador de energia	46
3.6.2 Desenvolvimento da PCI.....	53
3.6.3 Fabricação e montagem da PCI	55
3.7 ALGORITMO DO ANALISADOR DE ENERGIA DIGITAL	59
3.7.1 Algoritmo do firmware do microcontrolador do dispositivo.....	61
3.7.2 Algoritmo do programa supervisor do analisador de energia	62

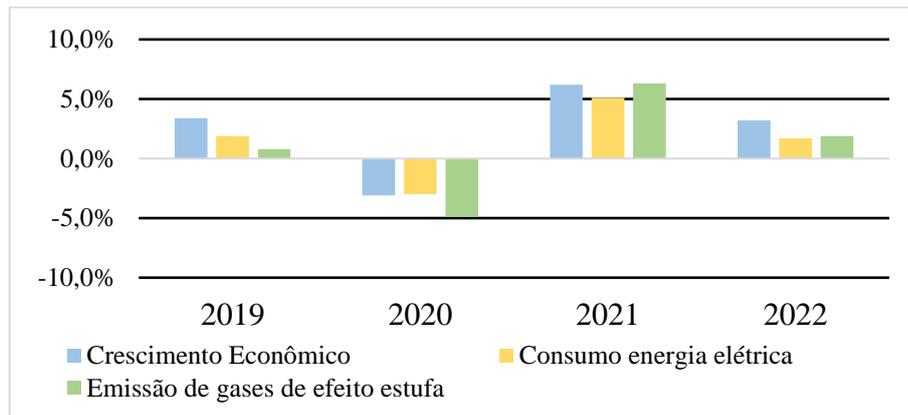
3.8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
3.8.1 Resultados experimentais do circuito de medição de tensão e corrente.....	64
3.8.1.1 <i>Resultado do circuito de instrumentação de tensão</i>	64
3.8.1.2 <i>Resultado do circuito de instrumentação de corrente</i>	65
3.8.1.3 <i>Resultado do experimento da conversão de analógico para digital</i>	67
3.8.2 Sistema supervisorio do analisador de energia digital	69
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica é uma questão analisada e debatida mundialmente visando a sustentabilidade ambiental, sendo gerido por agentes reguladores em âmbitos nacional e internacional. A regulamentação de geração, distribuição e transmissão da energia elétrica garante que os dispositivos necessários nesses processos estejam adequados para o uso, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis para a geração de energia (BRANCO, 2011).

Segundo as Estatísticas Mundiais de Energia e Clima (Enerdata – *World Energy & Climate Statistics*, em Inglês) no Anuário de 2023, o consumo de energia elétrica crescia, em média, 1,9% por ano de 2010 até 2019, quando em 2020, na pandemia por COVID-19, ocorreu uma queda de -3,0 % no consumo dos países pertencentes ao G20 (que inclui o Brasil). De 2020 para 2021, o consumo voltou a aumentar com 5,1% e, em 2022, 1,7%. O aumento do consumo de energia elétrica é relacionado pela Enerdata com o crescimento da economia global e com a emissão dos gases de efeito estufa, conforme a Figura 1.1

Figura 1.1 – Relação entre o crescimento do consumo de energia elétrica com o crescimento econômico e a emissão de gases de efeito estufa mundial.



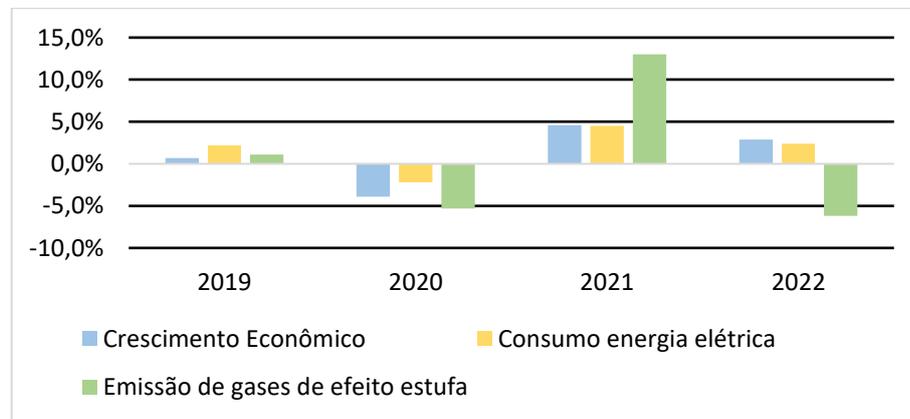
Fonte: Adaptado de (ENERDATA, 2023).

Essa relação é respaldada pelo desenvolvimento tecnológico. Apesar da eficiência dos equipamentos e máquinas em geral estar melhorando com o decorrer dos anos, há uma demanda muito maior por máquinas e equipamentos elétricos, aumentando o consumo de eletricidade, e, por consequência, aumentando as emissões de gases de efeito estufa. A Agência Internacional

de Energia (AIE, 2022) afirma que o crescimento econômico cresce junto com consumo de combustíveis fósseis desde o início da Revolução Industrial no século XVIII e que juntamente com o desafio de gerar energia limpa, deve-se melhorar cada vez mais a qualidade e eficiência da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como as máquinas elétricas.

O consumo de energia elétrica no Brasil, bem como o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) e a emissão de CO₂ está em concordância com a média dos países listados no G20, como mostrado na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Relação entre o crescimento do consumo de energia elétrica com o crescimento econômico e a emissão de gases de efeito estufa no Brasil.



Fonte: Adaptado de (ENERDATA, 2023).

A AIE (2022) ainda estima que o consumo mundial de energia elétrica aumente mais de 30% até 2040 e que a geração de energia represente 60% das emissões de gases do efeito estufa.

A crescente demanda por energia elétrica exige que os produtos e serviços de geração, transmissão e distribuição atualizem suas tecnologias de forma a melhorar a eficiência ao diminuir perdas energéticas, buscando o equilíbrio do desenvolvimento econômico e do meio-ambiente. Os agentes regulamentadores buscam resguardar esses princípios com marcos regulatórios.

Para regulamentar o sistema de gestão de energia (SGE) é que foi elaborada em 2011 a ISO 50001:2011, que foi atualizada para uma segunda versão em 2018. A ISO 50001:2018 tem como objetivo auxiliar organizações no desenvolvimento de sistemas e processos necessários para melhorar o desempenho energético, independente da forma que essa energia é gerada (hidráulica, gás natural, fotovoltaico, dentre outros) (MIRANDA, 2019).

No Brasil, o responsável por regulamentar o SGE é o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). A Lei nº 10.295, conhecida por lei de eficiência energética e que foi publicada em 17 de outubro de 2001, estabelece programas de avaliação da conformidade compulsórios na área de eficiência energética onde havia programas voluntários de etiquetagem. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Porém, para um objeto ou dispositivo fazer parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), necessita passar por uma série de ensaios em laboratórios acreditados pelo Inmetro (Inmetro, 2020).

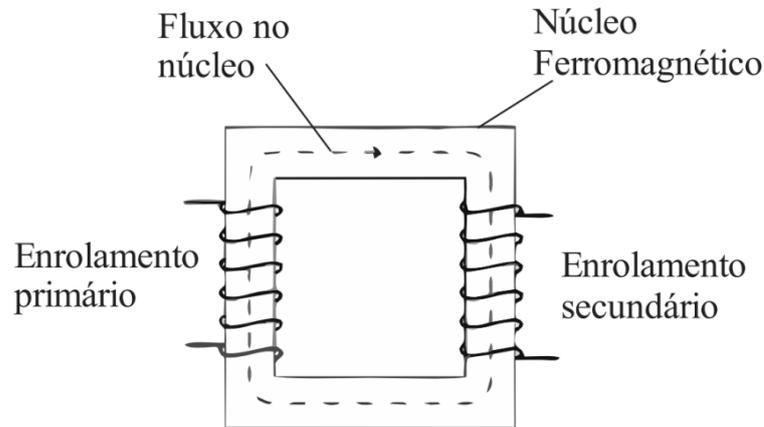
Os transformadores são os responsáveis pela manipulação da tensão (elevação e rebaixamento) até chegar ao consumidor final, comercial ou residencial, com a finalidade de adequar o nível de tensão ao consumo. Dessa forma, esses equipamentos estão presentes em maior número no sistema e, por consequência, têm um papel fundamental na distribuição e transmissão de energia, tendo um impacto relevante na rede (LEITE, 2020).

O funcionamento de um transformador baseia-se no princípio da indução eletromagnética. O equipamento é composto por dois ou mais enrolamentos, de cobre ou alumínio, que são isolados entres si, em torno de um núcleo ferromagnético. De acordo com a lei de Faraday, se um dos enrolamentos for submetido a uma corrente elétrica variante no tempo, essa corrente irá gerar um campo magnético variante no tempo que será orientado a percorrer o núcleo, passando através do segundo enrolamento, como ilustrado na Figura 1.3. Esse fenômeno ocorre porque a relutância magnética do ar é superior à do material ferromagnético.

Consequentemente, o campo magnético variável no tempo induz uma diferença de potencial nos demais enrolamentos. A magnitude desses campos gerados está diretamente relacionada ao número de espiras de cada enrolamento e à permeabilidade magnética do núcleo (DASGUPTA, 2009; KIRSTEN, 2014).

No contexto de ensaios em transformadores elétricos, diversas grandezas são medidas para compreender o processo. Entre as principais estão as tensões e correntes médias e eficazes, as potências ativa, reativa e aparente, o fator de potência e a taxa de distorção harmônica. Cada uma dessas grandezas desempenha um papel crucial na eficiência e na operação adequada dos transformadores elétricos, sendo vital para garantir a estabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Figura 1.3 – Esquemático do princípio de funcionamento de um transformador.



Fonte: Adaptado de (DASGUPTA, 2009).

Os ensaios em transformadores começaram depois que se concluiu que 70% das perdas totais da geração de energia estão presentes na rede de distribuição, e dessa porcentagem um terço é proveniente de transformadores (NUNES, 2011). Dessa forma, o Inmetro tornou compulsória a inclusão desses equipamentos no PBE, demandando que os transformadores passem por ensaios de eficiência e sejam etiquetados segundo a norma ABNT NBR 5356-1.

A exigência por ensaios fez com que existisse uma alta demanda de fabricantes de transformadores *versus* poucos laboratórios acreditados pelo Inmetro que pudessem realizar os ensaios. Existem no Brasil quatro instalações com este perfil: o Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (CEPEL) da Eletrobrás, em Nova Iguaçu, RJ; o Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), em São Paulo, SP; o Laboratório de Alta Tensão dos Institutos LACTEC, em Curitiba, PR; e o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI), em Itajubá, MG (MIRANDA, 2019). Porém, a alta demanda por ensaios fez com que outros laboratórios recebessem uma designação temporária, a fim de dar vazão à fila de espera de transformadores produzidos. Partindo-se deste contexto, o Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da UFSM criou a divisão de média tensão (INRIMT), que tem como principal objetivo implementar um laboratório habilitado a realizar os ensaios estabelecidos pela Norma ABNT NBR 5356-1, que abrange os transformadores de potência (ABNT NBR, 2010).

Há também a norma ABNT NBR ISO IEC 17025 - Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração, que rege o sistema de controle de

qualidade do laboratório. Os ensaios realizados no INRIMT se classificam em três categorias: ensaio de rotina, de tipo e especiais, e possui nove tipos de ensaios presentes na ABNT NBR 5356:

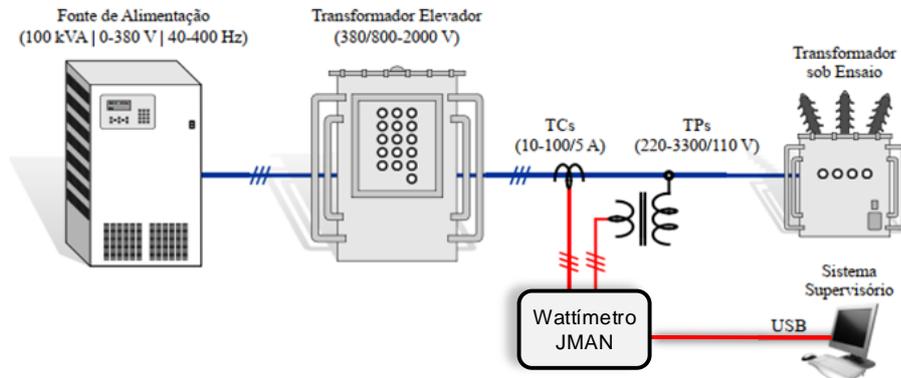
- a) Medição da resistência dos enrolamentos;
- b) Medição de relação de transformação (TTR);
- c) Medição de impedância de curto-circuito e perdas em carga;
- d) Medição de perdas a vazio e corrente de excitação;
- e) Medição da resistência de isolamento;
- f) Ensaio de tensão suportável à frequência industrial;
- g) Ensaio de tensão induzida;
- h) Ensaio de elevação de temperatura;
- i) Ensaio de suportabilidade ao impulso atmosférico.

Dentre esses tipos de ensaios, c), d) e h) utilizam o analisador de energia JMAN[®] MONITEK 9451, um aparelho digital que realiza a medição da tensão, corrente e temperatura simultaneamente. Essas grandezas são enviadas para o *software* TRANS4 que calcula os valores desejados conforme o ensaio. Esse *software* utiliza emulação através de máquina virtual em DOSBOX para a execução.

O INRIMT possui um sistema automatizado para realizar ensaios em transformadores de até 500 kVA e classe 25 kV (MIRANDA, 2019). Conforme as normas de ensaios, o analisador de energia empregado deve medir tensões de até 1905 V e correntes de até 20 A. O equipamento atual empregado no INRIMT não tem esse limite, requerendo o emprego de transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC) adicionais para adequar os níveis de tensão e corrente. A Figura 1.4 mostra um esquemático da instrumentação para os ensaios nos transformadores.

A fonte emuladora trifásica alimenta o transformador elevador, que eleva a tensão para alimentar os transformadores sob ensaio. Os transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC) rebaixam os níveis de tensão e corrente, respectivamente, a fim de adequá-los ao analisador de energia JMAN. Além da instrumentação da Figura 1.4, para realizar os ensaios no transformador sob ensaio, é necessário configurá-lo.

Figura 1.4 – Representação da instrumentação para ensaios em transformadores no INRIMT.



Fonte: Adaptado de LEITE, 2020.

Para medição de impedância de curto-circuito e perdas em carga, a ABNT NBR 5356:2010 determina que é necessário aplicar uma forma de onda senoidal na frequência nominal de valor suficiente para circular a corrente nominal nos terminais do lado de alta tensão, enquanto os terminais de baixa tensão estão curtos-circuitados. É recomendado alimentar o lado de alta tensão por apresentar menor nível de corrente. O nível de tensão aplicado nesse ensaio é normalmente inferior a 10% do valor nominal do transformador (MIRANDA, 2019).

Para a medição de perdas a vazio e corrente de excitação, ou perdas no ferro – oriundas das perdas por histerese e perdas por correntes parasitas que dependem do valor, frequência e forma de onda da tensão de alimentação – a norma ABNT NBR 5356-1 determina a aplicação de uma forma de onda senoidal pura na frequência e tensão iguais às nominais da derivação principal do transformador. As ligações podem ser feitas tanto nos enrolamentos de alta tensão quanto nos de baixa. A recomendação é de se utilizar os terminais de baixa tensão para facilitar a medição de tensão. Os demais enrolamentos devem permanecer em aberto. Então, é aplicada a tensão nominal do enrolamento conectado (MIRANDA, 2019).

Como resultado do ensaio, o transformador não poderá apresentar perdas a vazio com valor superior a 10% do declarado pelo fabricante. As perdas totais (perdas a vazio somadas às perdas em carga) do transformador sob ensaio não podem ultrapassar 6% do declarado pelo fabricante, bem como não podem ultrapassar os valores definidos na ABNT NBR 5440:2014 e no PRODIST (MIRANDA, 2019).

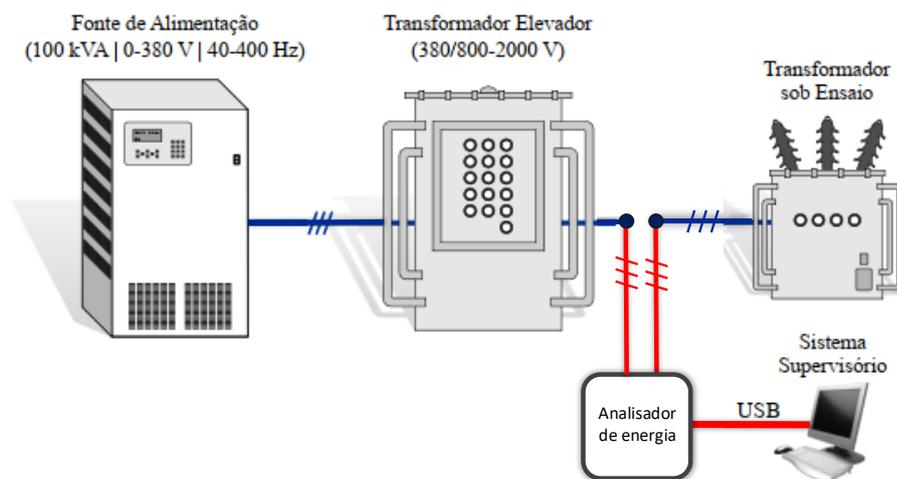
O ensaio de elevação de temperatura busca determinar a temperatura no topo do óleo e nos enrolamentos, em regime permanente, de transformadores imersos em óleo. Esse ensaio utiliza o método do curto-circuito, onde o transformador não é submetido à tensão e corrente

nominal ao mesmo tempo. O objetivo é estabelecer a elevação da temperatura no topo do óleo em regime permanente com dissipação das perdas totais e estabelecer a temperatura média dos enrolamentos à corrente nominal. Esse ensaio é dividido em duas partes, onde primeiramente deve-se determinar a elevação de temperatura no topo do óleo submetendo o transformador a uma corrente de ensaio tal que a potência ativa média (dissipada principalmente nos enrolamentos) seja igual às perdas totais do transformador, monitorando as temperaturas do óleo e do meio de resfriamento até a taxa de variação da elevação de temperatura no topo do óleo ser menor que 1°C durante três horas (MIRANDA, 2019).

A segunda parte do ensaio deve iniciar imediatamente após o término da primeira etapa. O objetivo é determinar a temperatura média dos enrolamentos ao aplicar a corrente nominal por uma hora. A temperatura do óleo e do meio de resfriamento continuam sendo monitoradas. Ao fim desse procedimento, desconecta-se a alimentação e o curto-circuito e as resistências dos enrolamentos devem ser medidas de imediato. O valor da resistência do enrolamento medido antes de aquece-lo é comparado após o procedimento e, então, é calculado o valor da elevação de temperatura no enrolamento (MIRANDA, 2019).

O analisador de energia digital abordado nesse trabalho reduzirá a necessidade de diversos equipamentos para os ensaios, pois será inserido entre o transformador elevador e o transformador sob ensaio, com o propósito de monitorar a tensão e a corrente com uma alta taxa de amostragem e enviar os dados para um *software* supervisor. A Figura 1.5 exemplifica como será essa implementação.

Figura 1.5 – Esquemático do sistema de medição proposto para os ensaios em transformadores.



Dessa forma, para atender à demanda de ensaios no INRIMT da UFSM, este trabalho abordará o desenvolvimento do *hardware* e do *software* de um analisador de energia empregado nos ensaios de transformadores elétricos. O analisador de energia deve atender todo o limite de medição com a precisão requerida, além de ser *plug-and-play*. Além disso, esse equipamento deve ser desenvolvido com componentes eletroeletrônicos de custo acessível para a sua implementação e finalmente testado em laboratório.

De uma forma mais específica, o analisador de energia será digital e monofásico, deve poder medir tensão até 1350 V; e corrente até 21 A (valores eficazes). Além disso, deve ter uma taxa de amostragem capaz de captar com a qualidade necessária para visualização até a 39^a harmônica da frequência base de 60 Hz e uma resolução mínima de 20 *bits*. O circuito deve contar com filtros de desacoplamento, passa-baixa de 1^o ordem e *anti-aliasing*, além da proteção nos sinais de entrada, proteção de sinal convertido para a entrada do conversor analógico digital (A/D) e proteção do sinal entre o conversor A/D e o microcontrolador. O programa de visualização (*software*) deve calcular e mostrar as tensões médias e eficazes, bem como as correntes médias e eficazes, as potências ativa, reativa e aparente, além do fator de potência e da taxa de distorção harmônica.

Estes valores foram definidos com base nos dados de configuração do laboratório, seguindo as necessidades de ensaio para cada modelo de transformador e as normas de ensaio da ABNT NBR 5356.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de tratar as especificações do projeto, deve-se trabalhar a teoria das principais informações citadas na introdução do trabalho. Dessa forma, a revisão bibliográfica tratará do que será utilizado para elaborar o projeto, iniciando por instrumentação do sinal, sensores de corrente e tensão, filtros e proteções, a confecção de placas de circuito impresso, como opera o conversor A/D, o microcontrolador e seu *firmware* e por fim, o computador e o *software*.

2.1 CIRCUITO DE INSTRUMENTAÇÃO

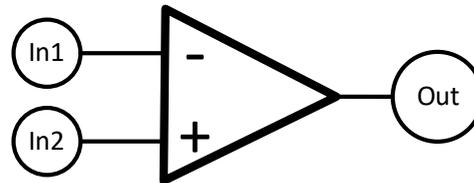
O circuito de instrumentação é composto por diversos componentes, como resistores, capacitores, diodos, amplificadores operacionais e amplificador de instrumentação. Esses componentes serão arranjados de forma a realizarem a leitura da tensão e da corrente, adequar a um nível de tensão do conversor A/D, e filtrar ruídos, além de proteger o conversor A/D contra sobretensão e sobrecorrente.

2.1.1 Amplificador operacional e amplificador de instrumentação

Um amplificador operacional (AmpOp) é um circuito integrado (CI) capaz de realizar operações matemáticas como a soma, subtração, multiplicação, derivação e integração, dependendo dos componentes periféricos ao CI, seus valores e arranjos. A Figura 2.1, mostra que o AmpOp possui duas entradas de tensão, sendo uma inversora e outra não inversora, com uma saída de sinal, e é alimentado por uma tensão positiva e outra negativa (Analog Devices - University Courses, 2017). Um AmpOp deve ter um alto ganho em malha aberta, resposta a altas frequências, alta impedância de entrada, baixa impedância de saída e baixa sensibilidade à mudança de temperatura.

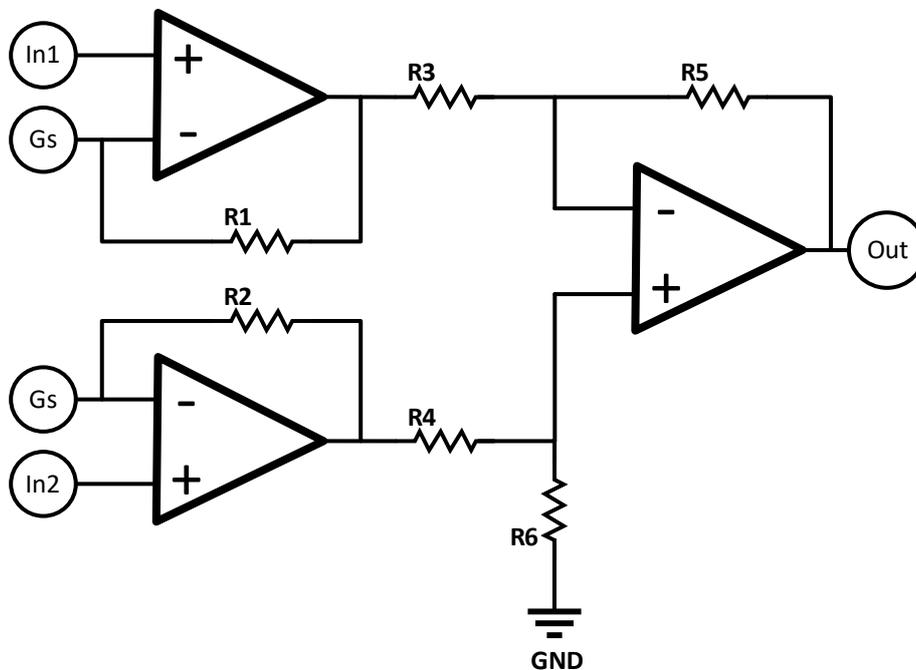
O Floyd (2018) mostra que os amplificadores de instrumentação são circuitos formados por três AmpOps, como mostrado na Figura 2.2, tem um alto ganho com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, possuindo uma ótima rejeição de ruídos de modo comum e são utilizados principalmente para amplificar sinais diferenciais. Nesse projeto, serão utilizados para adequar os sinais de tensão e corrente para o conversor A/D.

Figura 2.1 – Símbolo de um amplificador operacional.



Fonte: Adaptado de Floyd (2018).

Figura 2.2 – Circuito básico de um amplificador de instrumentação com AmpOps.



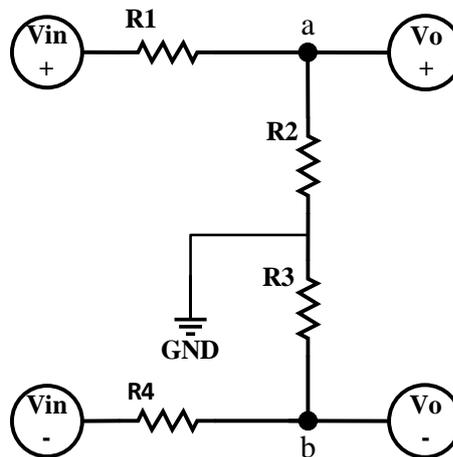
Fonte: Adaptado de Floyd (2018).

2.1.2 Sensor de tensão

Um sensor de tensão muito simples e utilizado é um divisor resistivo de tensão. Como o nome do circuito sugere, ele divide a tensão de entrada, tendo uma tensão menor na saída que é proporcional aos valores dos resistores utilizados. Nesse projeto, será utilizada uma associação de resistores, conforme a Figura 2.3. Nesse circuito, a tensão diferencial é reduzida para um valor seguro para a operação do conversor A/D. Essa configuração pode perder

precisão com o aquecimento dos resistores, então é necessário projetar os valores dos componentes para não aquecer.

Figura 2.3 – Divisor de tensão resistivo diferencial.



Fonte: Adaptado de Electronics Tutorials, 2020.

A Equação (2.1) mostra o sinal de saída pela tensão de entrada. Esse circuito pode ser projetado empregando a Lei de Ohm. O resultado da equação (2.1) é comparado à soma de dois divisores resistivos.

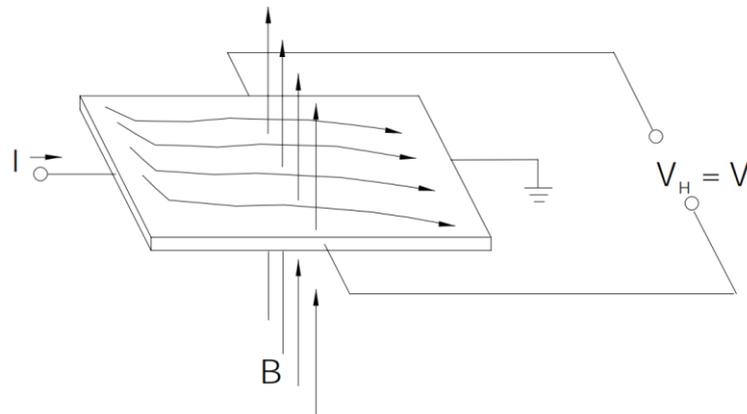
$$V_o = V_{in} \frac{R_2 + R_3}{(R_3 + R_4) + (R_1 + R_2)} \quad (2.1)$$

2.1.3 Sensor de corrente

Existem algumas formas de medir corrente, dentre elas, o sensor de corrente por efeito Hall que é utilizado em diversas aplicações por conter isolamento galvânica.

O efeito Hall faz com que surja uma diferença de potencial em um condutor elétrico, que será transversal ao fluxo de corrente e um campo magnético perpendicular à corrente (Figura 2.4). Desta forma, um sensor linear de corrente de efeito Hall é capaz de monitorar correntes contínuas e alternadas sem a necessidade de conexão elétrica entre o circuito monitorado e o circuito de monitoramento e pode fornecer um sinal de tensão que varie conforme o campo magnético aplicado (ELECTRONICS TUTORIALS, 2020).

Figura 2.4 – Princípio de funcionamento do sensor por efeito Hall com campo magnético.



Fonte: Adaptado de Honeywell (2016).

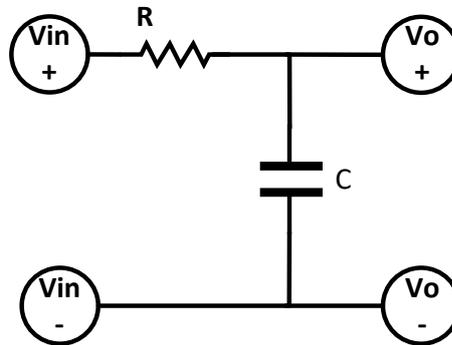
2.1.4 Filtros passivos

Em circuitos que fazem o tratamento de sinal, principalmente sinais de tensão, é comum a utilização de filtros capazes de atenuar ruídos externos por interferências eletromagnéticas, deixando passar somente as frequências de trabalho desejada. Para o analisador de energia, serão utilizados filtros passivos de 1ª ordem passa-baixa e filtro *anti-aliasing*.

2.1.4.1 Filtro passa baixa de 1ª ordem

O filtro passa-baixa ideal possibilita a passagem de um sinal abaixo da frequência de corte. Em frequências acima da frequência de corte, o sinal é atenuado. Um modelo de circuito muito utilizado para o filtro passa-baixa é a associação entre resistor e capacitor. A Figura 2.5 mostra esse circuito. O principal componente é o capacitor por ter a capacidade de se comportar como um curto-circuito abaixo da frequência de corte e, associado ao resistor, se comportar como um circuito aberto em frequências acima da frequência de corte (MUSSOI, 2004).

Figura 2.5 – Filtro passa-baixa.



Fonte: Adaptado de MUSSOI, 2004.

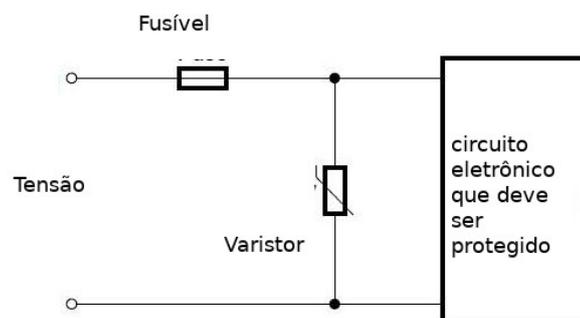
2.1.4.2 Filtro *anti-aliasing*

Um filtro *anti-aliasing* é caracterizado por um filtro passa-baixa. O que diferencia esses filtros é a frequência em que eles são empregados. Um filtro *anti-aliasing* é aplicado em frequências próximas da metade da frequência de amostragem do circuito.

2.1.5 Circuitos de proteção

Foram aplicados alguns estágios de proteção no circuito, como a proteção de sobretensão e sobrecorrente na entrada dos sinais na placa, proteção com diodos *schottky* e um CI de proteção digital. A proteção de sobretensão e surto elétrico utilizada é um par varistor e fusível. O arranjo dos componentes é mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Proteção contra sobretensão.



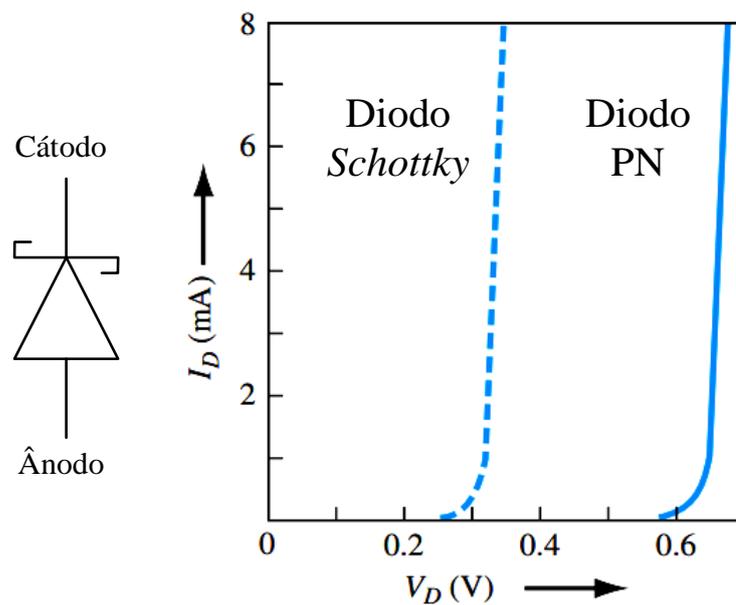
Fonte: (SOLDA FRIA, 2003).

O funcionamento do circuito consiste na redução do valor da resistência do varistor com o aumento da tensão, de forma a fechar um curto-circuito no varistor e, por consequência, na entrada do sinal, aumentando a corrente e rompendo o fusível.

A proteção para a medição de corrente é dada por um fusível em série com a entrada do sinal, que se rompe quando a capacidade de corrente no fusível é excedida.

Os diodos *schottky* são adicionados após o condicionamento do sinal e antes do sinal entrar no conversor A/D. Esse modelo de diodo possui uma comutação muito rápida e, quando polarizado diretamente, possui uma queda de tensão muito baixa. Dessa forma, o diodo *schottky* é capaz de limitar um transiente de tensão dentro de uma faixa de tensão, no caso, a janela de leitura do conversor A/D. A Figura 2.7 apresenta o símbolo do diodo e a comparação com de condução quando polarizado diretamente entre o diodo *schottky* e o diodo PN.

Figura 2.7 – Símbolo do diodo *schottky* e gráfico comparativo da polarização direta do diodo *schottky* e do diodo PN.

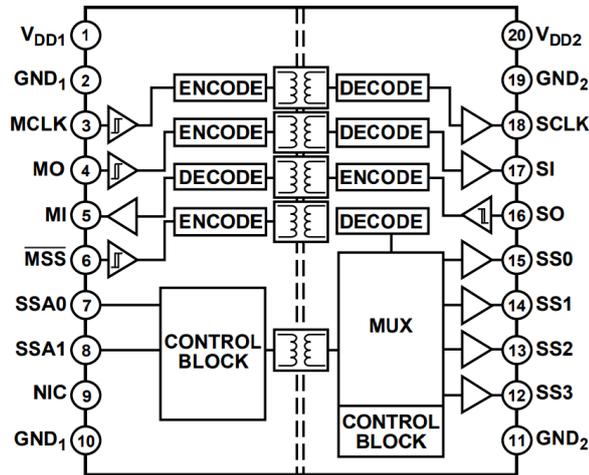


Fonte: Adaptado de NEAMEN, 2012.

A última etapa de proteção é na parte digital do circuito, com a utilização de um CI de proteção digital (Figura 2.8). Logo depois do conversor A/D, no circuito que envia os sinais coletados por um barramento SPI (*Serial Peripheral Interface*), pode ser adicionado um CI

capaz de manter a comunicação, mas isolar o sensor do microcontrolador de forma galvânica ou fotoelétrica.

Figura 2.8 – Diagrama de blocos de um isolador digital.



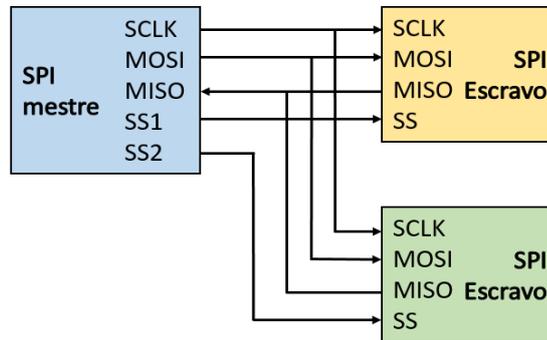
Fonte: Adaptado de Analog Devices (2017).

2.1.6 Conversor A/D e a comunicação SPI

O conversor analógico digital é responsável por trazer os dados mensurados de forma analógica para um formato digital e faz com que esses dados possam ser tratados por um microcontrolador, aumentando as aplicações. Existem diversos tipos de conversores A/D, dentre eles, o conversor delta-sigma é bastante popular em aplicações de instrumentação de precisão por ter uma excelente resolução em relação ao seu custo (HERD, 2016).

A comunicação entre o conversor A/D e o microcontrolador será do tipo SPI (*Serial Peripheral Interface*). SPI é um tipo de comunicação serial síncrona que pode enviar e receber dados ao mesmo tempo (*full duplex*) a uma taxa de 20 Mbps e possibilita o controle do fluxo dos dados. Além disso, a comunicação SPI permite utilizar mais de um dispositivo no mesmo barramento, que contém caminhos separados para enviar mensagens. A Figura 2.9 mostra o esquema padrão de comunicação SPI.

Figura 2.9 – Padrão de comunicação SPI.



Fonte: Adaptado (Embarcados, 2022).

Nesse padrão há no mínimo 4 canais, onde o SCLK é utilizado para sincronizar a transmissão de dados, o MOSI é o canal que o mestre envia a mensagem ao escravo, o MISO é o canal o mestre que recebe a mensagem do escravo. Através do SS n (n indica a quantidade de escravos conectados no barramento) o mestre seleciona o escravo a ser utilizado (SACCO, 2012).

Porém, a comunicação entre o mestre e os escravos não pode ser paralela, já que utilizam o mesmo barramento. O mestre sempre indica um dos escravos, trata a mensagem e depois solicita ao próximo escravo. A comunicação SPI é muito utilizada por conversores A/D com alta taxa de amostragem justamente por não ter a possibilidade de causar um gargalo na aquisição dos dados.

Alguns conversores A/D utilizam comunicações seriais do tipo I2C ou UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), mas essas podem não possuir velocidade de comunicação suficiente ou confiável para esse projeto.

2.1.7 Microcontrolador

Microcontroladores são circuitos integrados que contém um núcleo de processador, memórias de programação do tipo RAM, NOR flash e EPROM, além de periféricos programáveis de entrada e saída. Existem diversas configurações diferentes que variam em consumo de energia e potência de processamento, e por isso, os microcontroladores possuem uma grande gama de aplicações que envolvem controle e automação.

2.2 CONFECCÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

Confeccionar uma PCI requer muitos cuidados quanto ao circuito e aos efeitos elétricos que possam ocorrer. Uma das maiores preocupações é compatibilidade eletromagnética (CEM), pelo cuidado que se deve ter em não introduzir distúrbios em outros sistemas, mas também de não absorver interferências externas. Para isso, têm-se uma regulamentação com parâmetros e critérios relacionados a CEM para dispositivos eletrônicos que podem variar de um país para outro.

A Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI) é muito utilizada para compatibilizar as demais legislações existentes em diversos países. A CEI tem uma norma que trata somente sobre a CEM (NBR IEC 61000:2014), dividida em seis partes: parte geral, que conceitua o básico; outra para descrever e classificar o ambiente; delimitar a emissão e a imunidade eletromagnética; as técnicas de medição e testes; instruções de instalação e atenuação dos dispositivos; e uma parte para padrões genéricos com requisitos para emissão e imunidade em ambientes genéricos.

Uma PCI que opere com elementos analógicos e digitais, com frequências de comunicação na casa de dezenas de MHz, como no caso da frequência base do SPI, com uma alta taxa de transmissão de dados e alta resolução deve obedecer a essas normas para garantir precisão e confiabilidade nos dados coletados dos ensaios.

Algumas das recomendações de Benedict, em *PCB Design for EMI/EMC Compliance*, 2000, e de Montrose, em *EMC and the printed circuit board*, 1998 são:

- Usar sinais diferenciais para reduzir a sensibilidade aos parasitas devido a interferência, uma vez que campos magnéticos de corrente fluindo em sentidos opostos se anulam (idealmente) e a interferência será induzida nos dois caminhos e subtraída no destino. Mas, para isso, as duas trilhas devem seguir o mesmo caminho;
- O caminho de retorno da corrente de um sinal deve ser cuidado para não circular por outras partes e interferir em outros sinais;
- Evitar usar vias nas trilhas de sinais. Preferencialmente em caminhos de retorno;
- Usar planos de terra para diminuir a impedância das trilhas de retorno e diminuir a emissão e detecção de interferências;
- Interligar os planos de terra das faces por vias e criar um polígono de terra;
- Separar por regiões os circuitos analógicos, digitais e de alimentação, tendo o cuidado de manter um caminho comum sem cruzamentos de sinais;

- Trilhas de comunicação devem estar distante em duas vezes seu tamanho para evitar interferências;
- Utilizar capacitores cerâmicos de desacoplamento para filtrar ruídos nas entradas de alimentação dos componentes integrados e capacitores eletrolíticos de dezenas ou centenas de μF nas entradas de alimentação.

2.3 SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados coletados pelo conversor A/D serão enviados para o microcontrolador, que terá um protocolo específico de transmissão desses dados ao programa de supervisão encarregado de realizar os cálculos e apresentar os resultados do ensaio. Esse programa será desenvolvido em C#.

2.3.1 Linguagem de programação C#

O requisito primordial para o processamento reside na eficiência em coletar e exibir rapidamente os dados, a fim de reiniciar o ciclo de amostragem, ao mesmo tempo em que assegura uma fácil utilização do programa, proporcionando uma clara visualização dos parâmetros.

Para atender a essas demandas, foram analisadas diversas linguagens de programação, incluindo C#, Java e Python. Em termos de similaridade, C# e Java compartilham uma base que abrange a orientação a objetos e a utilização de uma máquina virtual, sendo ambas influenciadas pelo paradigma de programação C++, visando um equilíbrio entre desempenho e segurança. Em contraste, Python destaca-se por sua simplicidade e legibilidade superiores, apesar de ser uma linguagem interpretada, o que pode resultar em um desempenho ligeiramente inferior em comparação com C#.

Independentemente disso, todas as três linguagens avaliadas poderiam ser aplicadas ao projeto. Com base em critérios de desempenho e segurança na manipulação de memória, optou-se pela utilização de C# em conjunto com o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), Visual Studio 2022.

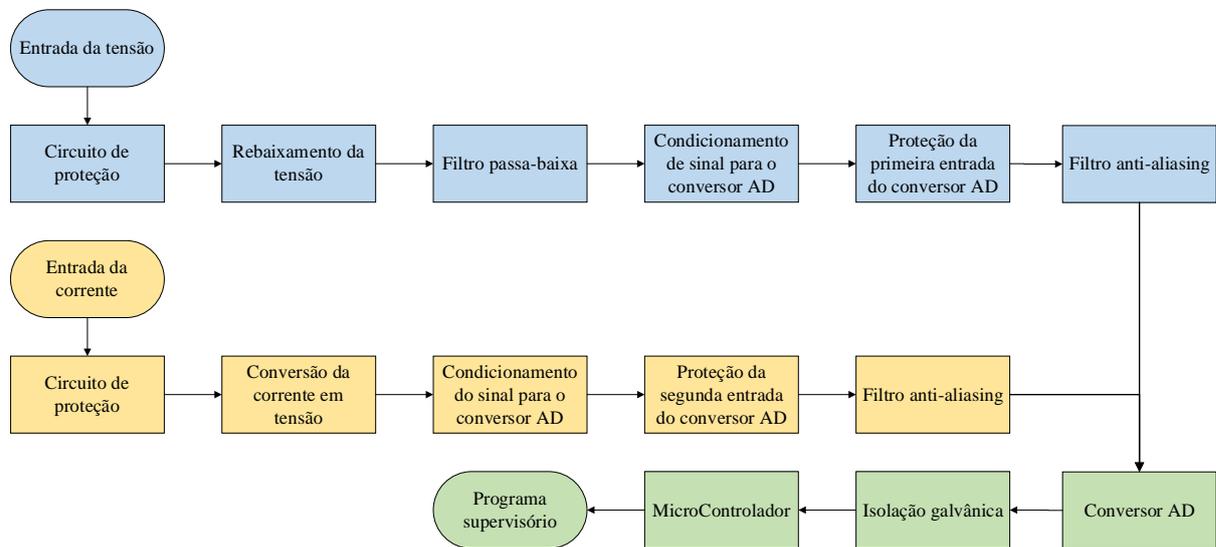
3 ANALISADOR DE ENERGIA DIGITAL PROPOSTO

Com base na revisão bibliográfica conduzida, foram identificadas as exigências do projeto, culminando na seleção dos componentes de acordo com as necessidades e a disponibilidade comercial. O desenvolvimento do *hardware* foi subdividido em diversas frentes interdependentes, que se complementam mutuamente e são concluídas por meio do desenvolvimento do *software*.

3.1 ESTRUTURA E DEMANDA DO CIRCUITO

O desenvolvimento do circuito iniciou com base nas necessidades e nos materiais dispostos ao projeto, passando por diversos testes e reavaliações. A partir disso, a Figura 3.1 mostra uma ilustração que exemplifica a estrutura interna do analisador de energia digital para captar os sinais de corrente e tensão até enviá-los ao computador com o sistema supervisor.

Figura 3.1 – Fluxograma de funcionamento do analisador de energia digital.



Fonte: Autor.

Com relação à Figura 3.1, observa-se que a parte azul corresponde à medição de tensão, a seção amarela representa o circuito de medição de corrente, enquanto a porção verde engloba a conversão do sinal analógico para digital, visando o envio ao sistema supervisor. Ao analisar o fluxograma, torna-se evidente que a estrutura do circuito está centrada no conversor A/D, uma

vez que as adaptações dos sinais de entrada são ajustadas para valores compatíveis com o conversor. Os próximos tópicos partirão, então, para o detalhamento do conversor A/D, seguido pelos condicionadores de sinais e pelo circuito do microcontrolador.

3.2 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL

O conversor analógico digital é o componente mais crítico para este trabalho por estar envolvido com a resolução, a taxa de amostragem e a precisão do projeto.

A Tabela 3.1 mostra os critérios que foram determinados conforme as melhorias necessárias para adequação dos ensaios nos transformadores, segundo ABNT NBR 5356. Dessa forma, a taxa de amostragem é determinada por necessitar de uma boa resolução na 39ª harmônica de 60 Hz, que é a frequência aplicada no transformador pela fonte emuladora da rede elétrica. O valor da taxa de amostragem deve garantir 10 amostras na frequência da 39ª harmônica. A Equação (3.1) apresenta como determinar esse valor.

Tabela 3.1 – Critérios de escolha do conversor A/D.

Critério	Descrição	Valor
Taxa de amostragem	Taxa de amostras mínima	23,4 kS/s
Utilizar interface SPI	Comunicação por SPI	20 MHz
Resolução de 24-bits	Capaz de capturar 24-bits por amostra	113,5468 μ V e 1,7881 μ A
Dois canais de entrada	Canais simples ou diferenciais, sem comutação MUX	-

Fonte: Autor.

$$Taxa = F_F * F_H * N \quad (3.1)$$

$$Taxa = 60 * 39 * 10 = 23,4 \text{ kHz} \quad (3.2)$$

onde Taxa é a frequência de amostragem, F_F é a frequência fundamental, F_H é a ordem da última harmônica a ser analisada e N o número de amostras desejadas na última frequência harmônica.

Dessa forma, deseja-se que o conversor A/D seja capaz de capturar no mínimo 23.400 amostras por segundo com a maior resolução possível (no mínimo 20 *bits*) e que deve ter dois canais de entrada com captura simultânea, no caso, para leitura da tensão e da corrente, ou então um canal apenas e cada entrada de sinal do circuito teria seu conversor A/D. Outra necessidade é uma comunicação com uma alta taxa de transmissão de dados. Dentre os modelos de comunicação aplicados aos mais diversos modelos de conversores A/D no mercado, observou-se que a comunicação SPI é a que apresenta a maior taxa de comunicação com confiabilidade.

Dos componentes que apresentam as especificações necessárias, o MCP3911 da *Microchip Technology Inc.*[®] é o conversor A/D selecionado por atender os critérios necessários e estar disponível comercialmente. As principais informações sobre o MCP3911 são:

- Conversão Delta-Sigma;
- Dois canais de amostras síncronas de 16/24-*bits* de resolução;
- Sinal diferencial nos canais de entrada de -1 V a 1 V, com garantia de precisão e proteção para até 2 V, mas com perdas de qualidade dos dados coletados;
- Sinal não diferencial de 600 mV a 1,8 V, com referência em 1,2 V;
- Taxa de dados de 125 kS/s;
- Alimentação analógica e digital separadas de 2,7 V a 3,6 V;
- Comunicação SPI de 20 MHz;
- Frequência base com cristal oscilador ou oscilador externo de 4 MHz, podendo aumentar até 8 MHz;

Ainda, é necessário analisar as frequências de operação do MCP3911 que, conforme a folha de especificações, segue as seguintes equações:

$$AMCLK = \frac{MCLK}{PRESCALE} \quad (3.3)$$

$$DMCLK = \frac{MCLK}{4 * PRESCALE} \quad (3.4)$$

$$TCONV = \frac{3 * OSR3 + (OSR1 - 1)}{DMCLK} * OSR3 \quad (3.5)$$

$$DRCLK = DMCLK / OSR \quad (3.6)$$

$$Taxa_Amostragem = \frac{DRCLK}{FH * FS} \quad (3.7)$$

Onde:

- *MCLK*: Principal e mais rápida frequência do conversor A/D, podendo ser interna ou externa com cristal oscilador;
- *PRESCALE*: Valor que configura diversas frequências de operações do conversor;
- *AMCLK*: Frequência da parte analógica;
- *DMCLK*: Frequência da parte digital;
- *OSR* (1 e 3): Razão entre a frequência de amostragem e a saída de dados;
- *TCONV*: Tempo de conversão do sinal de analógico para digital;
- *DRMCLK*: Taxa de dados de saída;
- *FH*: Última frequência harmônica necessária;
- *FS*: Frequência base do sinal;
- *Taxa_Amostragem*: Quantidade de amostras na última frequência harmônica necessária.

Os valores necessários para as variáveis das equações que fazem o conversor A/D operar na maior velocidade possível e dentro das necessidades do projeto estão dados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores das variáveis.

Variável	Valor
<i>MCLK</i>	4 MHz
<i>PRESCALE</i>	1
<i>AMCLK</i>	4 MHz
<i>DMCLK</i>	1 MHz
<i>OSR1</i>	1
<i>OSR3</i>	64
<i>TCONV</i>	192 μ s
<i>DRMCLK</i>	15,625 kHz
<i>FH</i>	60 Hz
<i>FS</i>	39 ^a
<i>Taxa_Amostragem</i>	6,67 amostras por período

Fonte: Adaptado de Microchip inc. (2012).

As variáveis de controle são o *PRESCALE* e o *OSR3*. O *PRESCALE* divide a frequência principal (*MCLK*) para a parte analógica e para a parte digital e pode ser escolhido entre 1, 2, 4 e 8. O *OSR3* pode variar entre 32 e 256. Dessa forma, o *PRESCALE* deve ser 1 para não diminuir a velocidade do conversor e o valor do *OSR3* influencia proporcionalmente na resolução do conversor e inversamente na velocidade de coleta das amostras, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Variação da resolução por *OSR3*.

<i>OSR3</i>	Resolução
256	24 <i>bits</i>
128	23 <i>bits</i>
64	20 <i>bits</i>
32	17 <i>bits</i>

Fonte: Adaptado de Microchip inc. (2012).

Como visto na Tabela 3.3, o *OSR3* escolhido é 64 e indica que a resolução determinada é de 20 *bits* para ter 6 amostras por período na última frequência harmônica. Ainda não alcançando as 10 amostras desejadas por uma limitação do conversor A/D, mas com condições de fornecer uma boa visualização dos harmônicos.

3.3 CONDICIONAMENTO DO SINAL DE TENSÃO

O circuito de condicionamento de tensão deve adequar o sinal de tensão que será aplicado no transformador sob ensaio para a leitura dentro da faixa de medida do conversor A/D, contando com a proteção de sobretensão para o circuito de medição. Como mencionado na seção 3.2, o conversor A/D suporta uma entrada de sinal nos canais de -1 V até 1 V. Por isso, o circuito deve reduzir os 1905 V_p para 1 V_p diferencial. O método determinado para esse objetivo é o divisor de tensão resistivo. A proteção para sobretensão no sinal de entrada de tensão será com o par varistor e fusível. O filtro passa-baixas no final do circuito de condicionamento da tensão leva em consideração os resistores do divisor de tensão e a frequência de chaveamento da fonte emuladora CA.

A instrumentação do circuito é composta por um amplificador de instrumentação, que recebe o sinal diferencial de tensão rebaixado e transforma em um sinal não diferencial, então outros dois amplificadores operacionais são necessários para converter o sinal novamente em diferencial para enviar ao conversor A/D. Essa etapa é necessária pois o amplificador de instrumentação garante uma alta impedância de entrada (que casa com os valores das resistências do divisor resistivo), além de reduzir a sensibilidade a ruídos. Ainda, há mais uma etapa de proteção com diodos Schottky e um filtro *anti-aliasing*.

3.3.1 Divisor de tensão resistivo

Os resistores dessa etapa do projeto devem ser capazes de reduzir a tensão. Esse processo, como mostrado na seção 2.1.2, ocorre pela associação dos resistores de forma diferencial. Além disso há requisitos de impedância de entrada no conversor A/D que devem ser respeitados na escolha dos valores dos resistores. Outra questão importante é a precisão do valor da resistência, que influencia na garantia de precisão no final do processo e para calibrar a medição conforme a os valores dos componentes. Os requisitos para os resistores são:

- Precisão de 1% ou melhor;
- Custo benefício pela disponibilidade no mercado;
- Potência de 250 mW.

A determinação do valor da resistência considerou a vida útil do equipamento, de forma que a potência dissipada nos resistores se mantenha menor do que 50 mW, conforme a Equação (3.8).

$$R_{Eq} = \frac{Vin_{RMS}^2}{P_D} \quad (3.8)$$

onde Vin_{RMS} é a tensão eficaz e seu valor foi determinado conforme a tensão máxima utilizada nos ensaios, P_D é a potência dissipada máxima estipulada para não aquecer os resistores de forma significativa, para não influenciar na variação da resistência. O valor da R_{Eq} calculado servirá como base para a simulação e será adaptado conforme a disponibilidade de resistores no mercado.

3.3.2 Filtro passa-baixa passivo de primeira ordem

Utilizar um filtro para evitar ruídos de alta frequência é essencial para este circuito, por haver diversas fontes de ruído que interferem na leitura dos dados do transformador. Dessa forma, foi considerada uma faixa de frequência de leitura que leva em conta a frequência da harmônica de ordem mais alta e a atenuação de 3 dB na faixa determinada (PERTENCE, 2015). O filtro passivo utilizado é o resistivo-capacitivo de primeira ordem por se enquadrar na necessidade do projeto, além de se adaptar ao circuito de forma que a parte resistiva pode ser utilizada do divisor resistivo de tensão. O modelo de capacitor para esse tipo de filtro deve ser cerâmico, por ter uma baixa impedância série, sendo capaz de responder rapidamente aos ruídos (MELO, 2020). A equação (3.9) mostra como determinar a frequência de corte do filtro.

$$F_C = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.9)$$

onde, F_C é a frequência de corte, R é o valor do resistor e C o valor do capacitor utilizado. No caso do projeto, o valor do resistor é o mesmo de uma parte do divisor resistivo e a frequência de corte foi determinada sendo uma década e uma oitava acima da frequência da harmônica de maior ordem. Com isso, a equação (3.9) fica conforme a equação (3.10).

$$C = \frac{1}{2\pi R F_C} \quad (3.10)$$

sendo

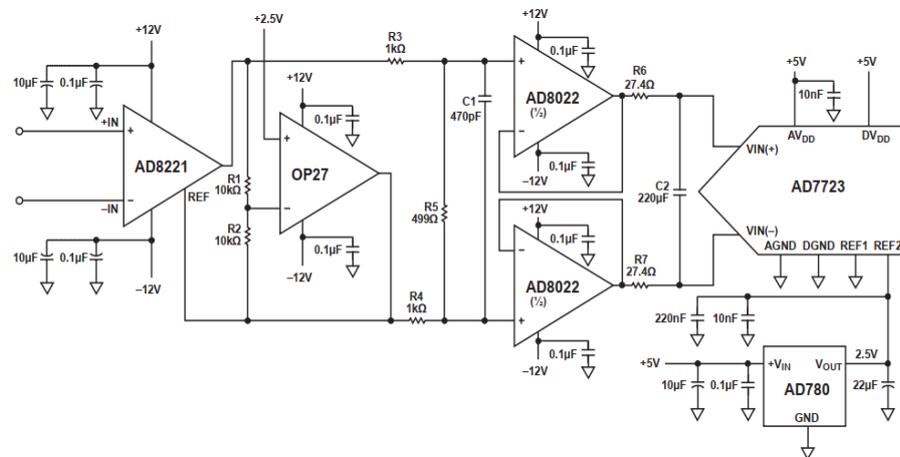
$$F_C = F_B * F_H * 20 \quad (3.11)$$

onde F_B é a frequência base da fonte emuladora CA para ensaios, F_H é a ordem da harmônica de maior ordem a ser amostrada e o valor de 20 representa uma década e uma oitava acima da frequência desejada (para evitar atenuar as frequências desejadas).

3.3.3 Instrumentação do sinal

O sinal filtrado passa por um amplificador de instrumentação de ganho unitário que é responsável por manter a alta impedância de entrada, alta rejeição a sinais de modo comum dentre outras características citadas na seção 2.2.1. O amplificador de instrumentação definido que atende à demanda do projeto é o AD8221 da Analog Devices®. A folha de especificações do AD8221 contém alguns exemplos de aplicação e, dentre eles, um modelo de circuito para conversores A/D com entrada diferencial, mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Exemplo de aplicação do amplificador de instrumentação AD8221.



Fonte: Adaptado de Analog Devices (2011).

O circuito da Figura 3.2 faz com que o sinal de tensão CA com referência no zero que sai do AD8221 seja atenuado pela metade e com referência na metade da amplitude máxima do sinal original. O sinal de saída do AD8221 é invertido pelo OP27 e então o AD8022 recebe os dois sinais invertidos e a saída desse último estágio recria o sinal diferencial para o conversor A/D. Dessa forma, o circuito de instrumentação do projeto foi desenvolvido com base nesse circuito.

3.3.4 Filtro *anti-aliasing*

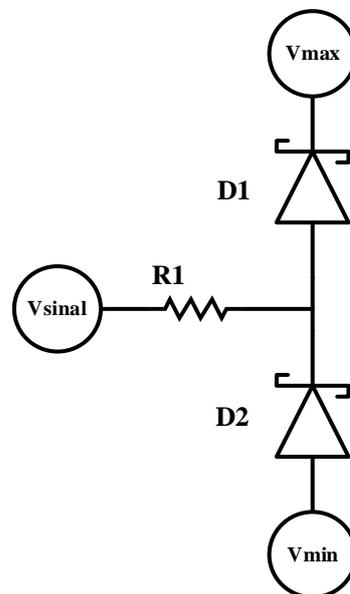
O filtro *anti-aliasing* foi projetado para a frequência da saída de dados do conversor A/D. Conforme mostrado na Tabela 3.2, o valor de $DRCLK$ é de 15,6 kHz. Logo, para evitar atenuação do sinal e comportar um aumento da frequência, caso seja utilizado um cristal oscilador, será utilizado um valor duas vezes maior. Assim, será calculado o valor do capacitor, que também deverá ser cerâmico, utilizando os resistores do circuito de instrumentação na entrada do conversor A/D. Cada resistor terá 1 kΩ. A equação (3.11) mostra o valor da capacitância necessária para o filtro.

$$C = \frac{1}{\pi * R * DRCLK * 2} = \frac{1}{\pi * 2k * \frac{31.2k}{2}} \approx 2 \text{ nF} \quad (3.12)$$

3.3.5 Proteção por diodos Schottky

Essa etapa de proteção com diodos *Schottky* consiste em prevenir uma sobretensão nas entradas do conversor A/D. Os diodos são configurados no circuito de tal forma a desviar a tensão maior que 1 V e menores que -1 V. O modelo de diodo selecionado é o BAS40H da *Nexperia* por ter uma comutação muito rápida e uma baixa queda de tensão quando polarizado diretamente. A Figura 3.3 exemplifica o circuito utilizado para proteção.

Figura 3.3 – Circuito com diodos *Schottky* para proteção do conversor A/D.

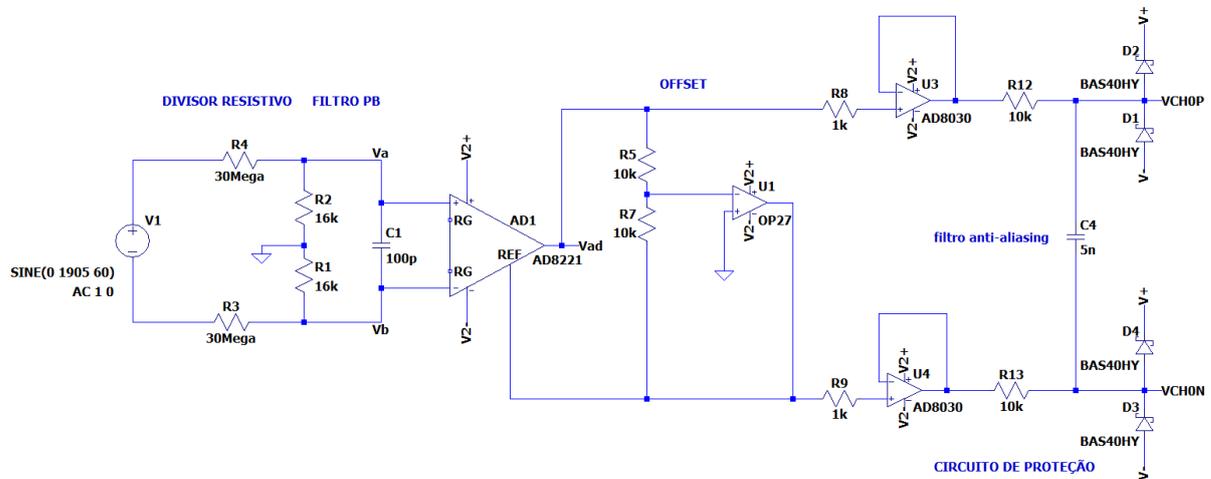


Fonte: Autor.

3.3.6 Simulação do circuito de tensão

A simulação integra todas as partes do circuito de condicionamento do sinal de tensão e, com base nos resultados, pode-se fazer as adaptações necessárias conforme os valores comerciais dos componentes utilizados. O programa utilizado para as simulações foi o *LTspice*[®]. A Figura 3.4 apresenta o circuito simulado.

Figura 3.4 – Simulação do circuito de condicionamento de tensão.



Fonte: Autor.

O circuito mostra os valores para os resistores responsáveis pela queda de tensão, o valor do capacitor para o filtro passa baixa com os resistores $R1$ e $R2$, e o valor do capacitor de filtro *anti-aliasing* em conjunto com os resistores $R12$ e $R13$.

O divisor resistivo consome apenas 31 mW, podendo operar sem variações consideráveis da resistência devido ao aquecimento. $V1$ é uma fonte emuladora de corrente alternada. A simulação do circuito com a amplitude total de leitura é mostrada na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Resultado da simulação do circuito condicionador de tensão.



Fonte: Autor.

Com respeito à Figura 3.5, em azul tem-se a tensão após o divisor resistivo e em vermelho tem-se a tensão de entrada no conversor A/D, indicando um bom funcionamento dentro do limite de leitura do dispositivo.

3.4 CONDICIONAMENTO DO SINAL DE CORRENTE

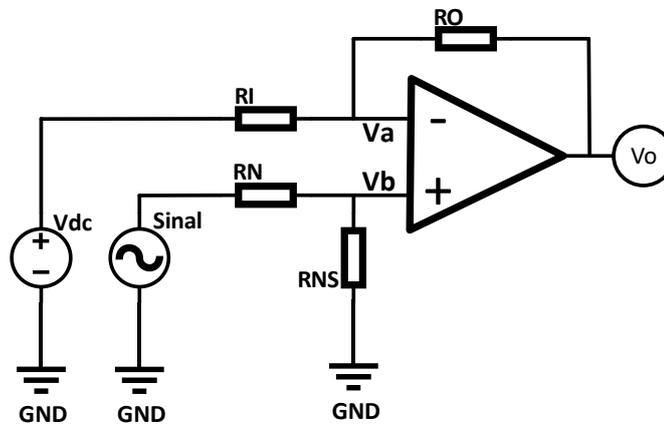
O circuito condicionador de corrente para o conversor A/D deve ter um comportamento parecido com o circuito de condicionamento de tensão, de modo a transformar a faixa de leitura de -30 A a 30 A em -1 V a 1 V e conter etapas de proteção e filtro. A forma de captura do sinal da corrente será por um sensor de efeito Hall por ter isolamento galvânica entre o dispositivo e a corrente medida. O sensor disponível comercialmente que mais se enquadra nas necessidades do projeto é o HMSR 30-SMS da LEM[®]. Esse é um sensor de corrente de até 30 A, alimentado por 5 V, capaz de medir corrente alternadas, contínuas, pulsos, dentre outros sinais. Esse sensor tem uma precisão de 0,75% na medida e um coeficiente linear de 1%.

O sinal de saída do sensor é referenciado em $2,5 \text{ V} \pm 0,005$ e varia de 0,5 V à 4,5 V, de forma proporcional ao valor da corrente medida. Dessa forma, esse sinal também deve ser condicionado para se adequar ao conversor A/D.

3.4.1 Instrumentação do sinal convertido de corrente em tensão

O sinal de tensão do sensor de corrente deve ser transformado de $2,5 \pm 2 \text{ V}$ em -1 V à 1 V. Esse processo será realizado por um amplificador operacional no modo subtrator, o qual somará o sinal com uma tensão CC de 5 V (V_{DC}) na entrada inversora, para o valor do deslocamento CC (V_{CC}), e aplicará um ganho inferior a 1, para que o sinal fique de acordo com a entrada do conversor A/D. A Figura 3.6 mostra a configuração do circuito subtrator, seguido pelas equações que determinam os valores dos componentes do circuito.

Figura 3.6 – Configuração do circuito amplificador subtrator.



Fonte: Autor.

O equacionamento do circuito pode ser desenvolvido através das leis das correntes de Kirchhoff e de Ohm:

$$\frac{V_{DC} - V_a}{R_I} + \frac{V_o - V_a}{R_O} = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{V_{Sinal} - V_b}{R_N} + \frac{V_b}{R_{NS}} = 0 \quad (3.14)$$

$$V_o = \frac{R_{NS}}{R_I} \cdot \frac{R_I + R_O}{R_N + R_{NS}} \cdot V_{Sinal} - \frac{R_O}{R_I} \cdot V_{DC} \quad (3.15)$$

Com a equação (3.15) pode-se encontrar os valores dos resistores ao definir os ganhos do circuito, separando-os por entrada inversora e não inversora e definindo $R_O = R_{NS} = 10k\Omega$. Assim:

$$K_1 = \frac{R_{NS}}{R_I} \cdot \frac{R_I + R_O}{R_N + R_{NS}} = \frac{V_o}{V_{Sinal}} \quad (3.16)$$

$$K_2 = -\frac{R_O}{R_I} = \frac{V_o}{V_{DC}} = \frac{K_1 \cdot V_{Sinal}}{V_{DC}} \quad (3.17)$$

onde K_1 e K_2 representam os ganhos para cada entrada. O valor do K_1 é o ganho desejado, que é transformar o sinal de 2 V em 1 V na saída. Logo $K_1 = 0,5$. Na entrada inversora será aplicado V_{DC} , com o objetivo de retirar V_{CC} do sensor de corrente. K_2 foi calculado pela razão da V_{DC} por V_{CC} . O resultado é dividido de K_1 . As equações 3.18 até a 3.23 mostram o resultado.

$$K_2 = \frac{K_1}{\left(\frac{V_{DC}}{V_{CC}}\right)} = \frac{0,5}{\left(\frac{5}{2,5}\right)} = 0,25 \quad (3.18)$$

$$K_2 = -\frac{R_O}{R_I} = 0,25 \quad (3.19)$$

$$R_I = \frac{R_O}{K_2} = \frac{10 \text{ k}}{0,25} = 40 \text{ k}\Omega \quad (3.20)$$

$$K_1 = \frac{R_{NS}}{R_I} \cdot \frac{R_I + R_O}{R_N + R_{NS}} = 0,5 \quad (3.21)$$

$$0,5 = \frac{10 \text{ k}}{40 \text{ k}} \cdot \frac{40 \text{ k} + 10 \text{ k}}{R_N + 10 \text{ k}} \therefore R_N = 15 \text{ k}\Omega \quad (3.23)$$

A Figura 3.7 mostra o circuito e os componentes calculados. O resultado da simulação do circuito é apresentado na Figura 3.8. Com as etapas de simulação e determinação dos componentes principais concluída, é necessário desenvolver uma placa de circuito impresso (PCI) para a aplicação que seja capaz de manter a isolação elétrica entre equipamentos conectados e que tenha proteção contra interferências eletromagnéticas.

Figura 3.7 – Circuito de instrumentação do sinal de corrente em tensão.

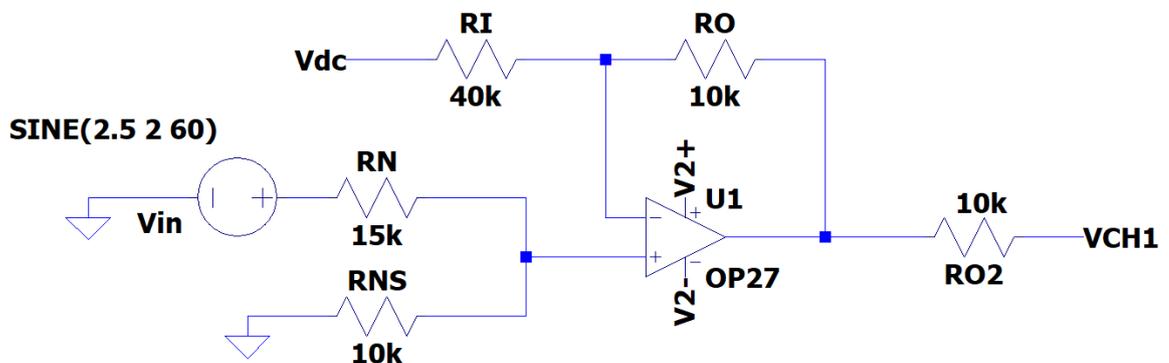
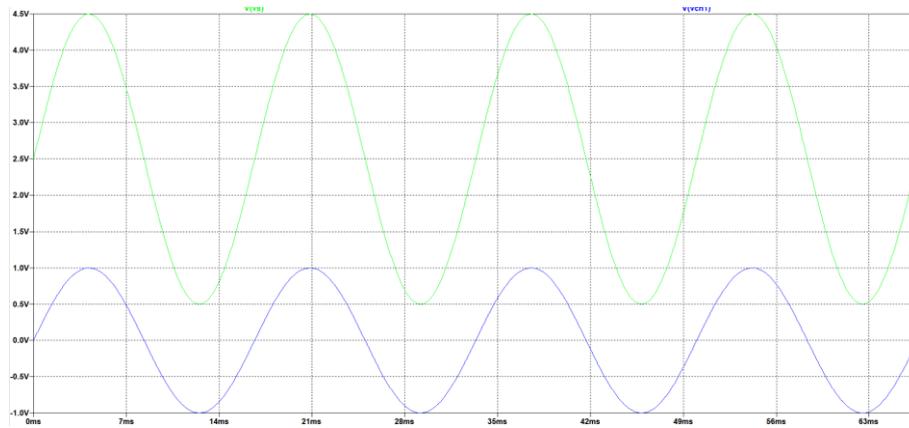


Figura 3.8 – Resultado da simulação do circuito medidor de corrente.



Fonte: Autor.

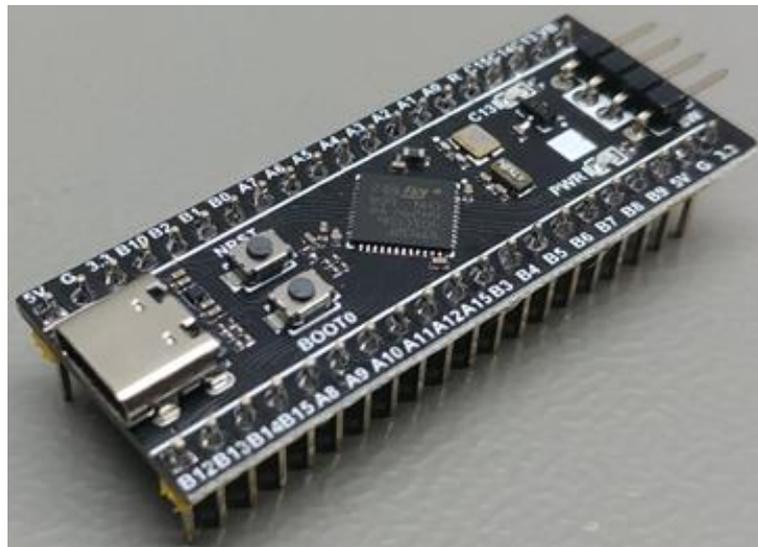
Com respeito à Figura 3.8, em azul tem-se o sinal de tensão da saída do sensor de efeito Hall e em verde tem-se o sinal que será aplicado no conversor A/D. Conforme se observa, o sinal do sensor de corrente é adequado para o conversor A/D com o circuito proposto.

3.5 MICROCONTROLADOR E COMUNICAÇÃO

Os dados enviados do conversor A/D para o microcontrolador ainda passarão por mais uma etapa de proteção, a qual consiste em um componente capaz de isolar sinais do lado de potência com respeito ao lado de controle. Essa isolação será instalada no barramento de comunicação SPI. O CI selecionado é o ADuM3154 da *Analog Devices*[®], por ser capaz de isolar até 3,75 kV por até 1 minuto e praticamente não interferir no tempo de envio dos dados ao microcontrolador.

Então, o microcontrolador deve ser capaz de receber os dados, reconstruir o valor da corrente ou tensão e enviá-los ao programa de supervisão no computador. O microcontrolador de melhor custo-benefício que atende à demanda do projeto é o STM32F401CCU6 da *STMicroelectronics*[®] mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Microcontrolador STM32F401CCU6.



Fonte: (STM32, 2023)

3.6 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Para iniciar o desenvolvimento da PCI foi preciso pesquisar por um programa de desenho assistido por computador para projetos eletrônicos que, de preferência, estivesse disponível gratuitamente. Dessa forma, foram testados os programas *Fritzing*, *EasyEDA* e *KiCAD*.

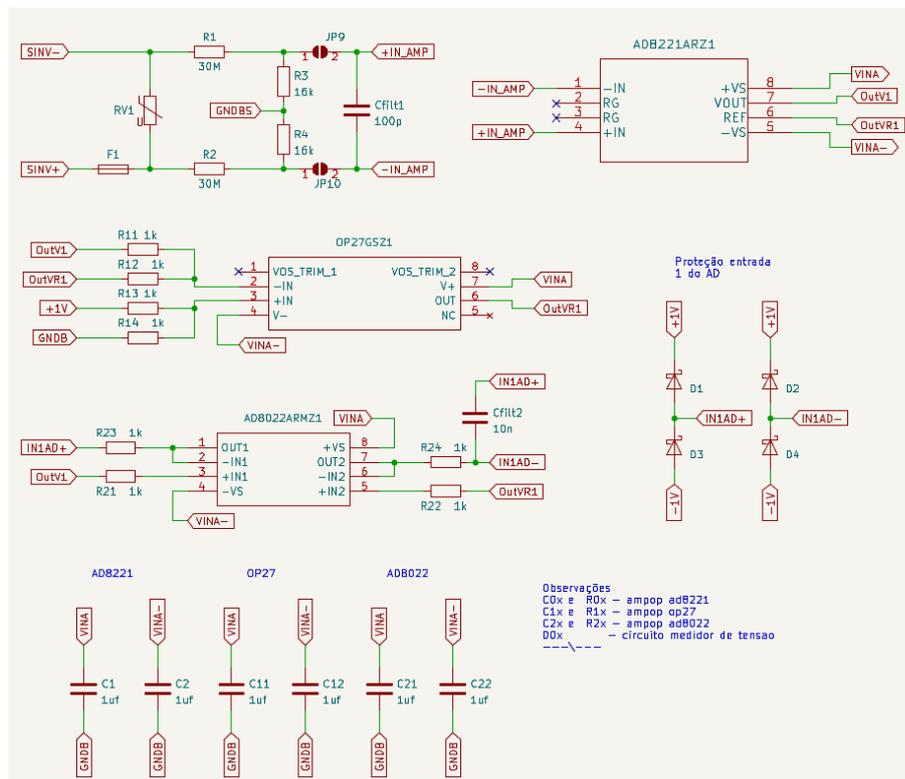
Dentre as opções, o *Fritzing* tem uma proposta muito interessante, mas não atende uma demanda de um projeto com muitos componentes, como é o caso. Já o *EasyEDA* é um programa gratuito para acadêmicos e muito utilizado por ter uma comunidade de desenvolvedores que podem compartilhar seus projetos publicamente ou de modo privado por ser baseado na *web*. Porém, o *KiCAD* também é um programa de código aberto desenvolvido em 1992 e que, recentemente, teve uma grande atualização e possui uma comunidade que colabora com o desenvolvimento do programa. Dessa forma, por compreender melhor a dinâmica do programa, escolheu-se o *KiCAD* para desenvolver a placa de circuito impresso desse projeto.

O esquemático do projeto foi separado em seis partes, sendo elas: os medidores de tensão e corrente, o circuito de alimentação, o conversor A/D e o isolador digital, o microcontrolador e os conectores. Essas partes são interconectadas por rótulos que, dessa forma, facilitam o entendimento do circuito.

3.6.1 Esquemático do analisador de energia

A Figura 3.10 mostra o esquemático do circuito medidor de tensão desenvolvido no *KiCAD*.

Figura 3.10 – Esquemático do circuito medidor de tensão.

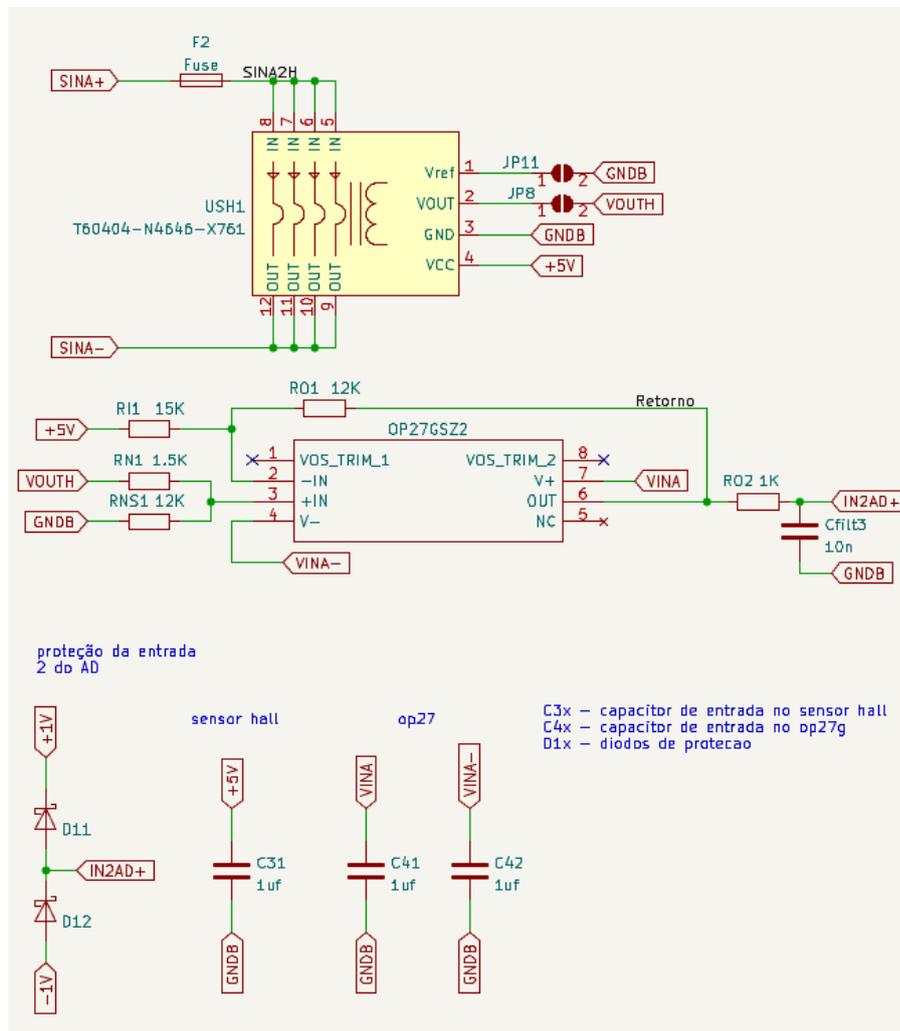


Fonte: Autor.

No esquemático há os capacitores de desacoplamento e resistores que foram nomeados em uma sequência que facilite na identificação ao organizar os componentes na PCI.

Na Figura 3.11, apresenta-se o esquemático do circuito medidor de corrente com a representação do sensor de corrente por efeito Hall, a instrumentação do sinal, um fusível de proteção de sobrecorrente antes do sensor, os diodos *Schottky* na entrada do conversor A/D e os capacitores de filtro.

Figura 3.11 – Esquemático do circuito medidor de corrente.



Fonte: Autor.

O circuito de alimentação foi dividido em quatro partes para facilitar o entendimento. Alguns componentes exigem uma proteção contra ruídos, então a alimentação deve ser separada para cada lado do isolador ADuM3154. Os níveis de tensão de alimentação do lado “A” foram definidos em -12 V e +12 V devido à demanda dos amplificadores operacionais. Já para o lado “B”, o nível de tensão é de 5 V. O conversor A/D MCP3911 recomenda que sejam utilizados reguladores de tensão separados para cada lado do seu CI (um para a parte analógica e outro para a parte digital). Da mesma forma, esse cuidado deve ser tomado para o isolador ADuM3154. O sensor de corrente por efeito Hall também será alimentado por um regulador de tensão. A potência dissipada pelos reguladores de tensão foi determinada a partir do consumo

dos circuitos de instrumentação. A Tabela 3.4 mostra o consumo de corrente de cada componente que necessita de um regulador de tensão.

Tabela 3.4 – Corrente de consumo dos componentes alimentados por reguladores de tensão.

Componente	Consumo (mA)	Tensão (V)
MCP3911 – Lado analógico	6,5	3,3
MCP3911 – Lado digital	0,7	3,3
ADuM3154 – Lado escravo	20	3,3
ADuM3154 – Lado mestre	20	3,3
HMSR_30_SMS – Sensor Hall	25	5,0
STM32F411CCU	≈200	3,3

Fonte: Adaptado Microchip inc., STMicroelectronics, Analog Devices e LEM.

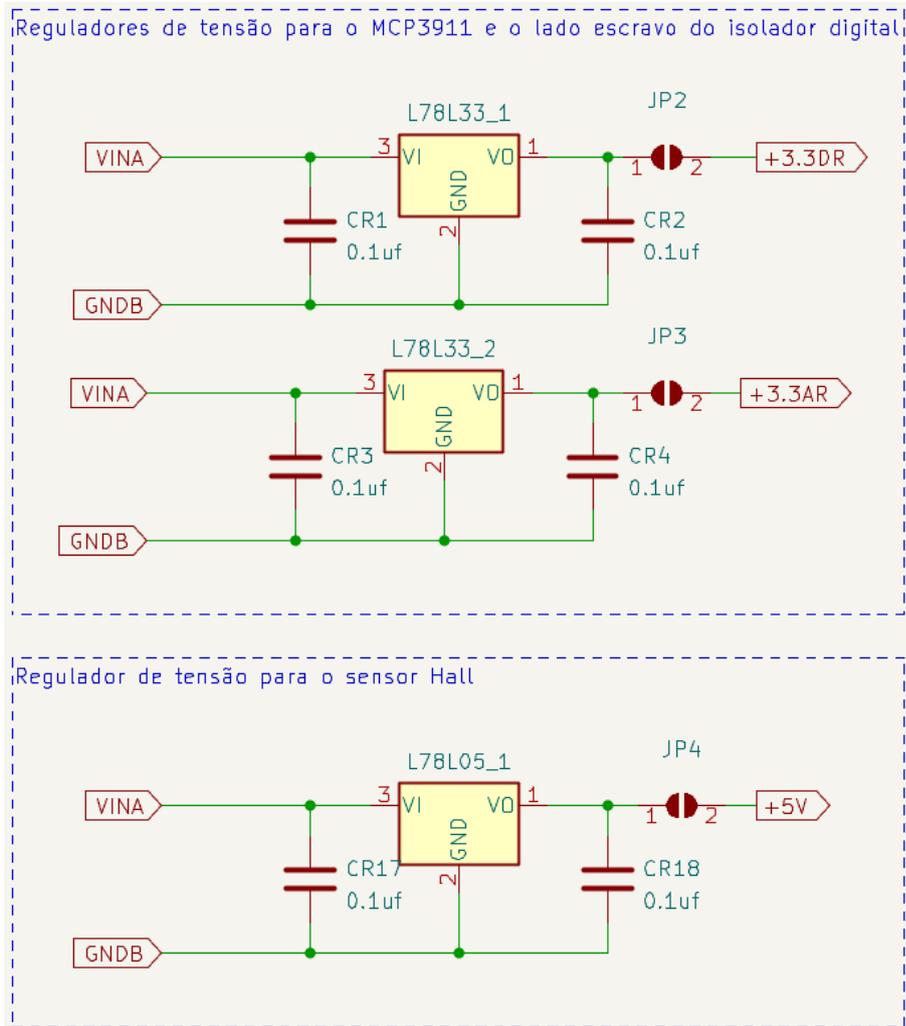
O recomendado para os reguladores de tensão é utilizar apenas 50% da corrente que o componente pode suportar (WENDLING, 2009) para garantir um nível de tensão estável e evitar o sobreaquecimento do componente. Assim, distribuiu-se os seguintes reguladores de tensão na PCI:

- Um regulador L78L33 para o lado analógico do MCP3911;
 - Um regulador L78L33 para o lado digital do MCP3911 e para o lado escravo do ADuM3154;
 - Um regulador UA79M33 para o STM32 e o lado mestre do ADuM3154;
- Um regulador 78L05 para o sensor Hall HMSR 30-SMS.

Para a proteção com os diodos *Schottky*, foram adicionados mais dois reguladores: um LM317 e um LM337, configurados para saídas de tensão de 1 V e -1 V, respectivamente.

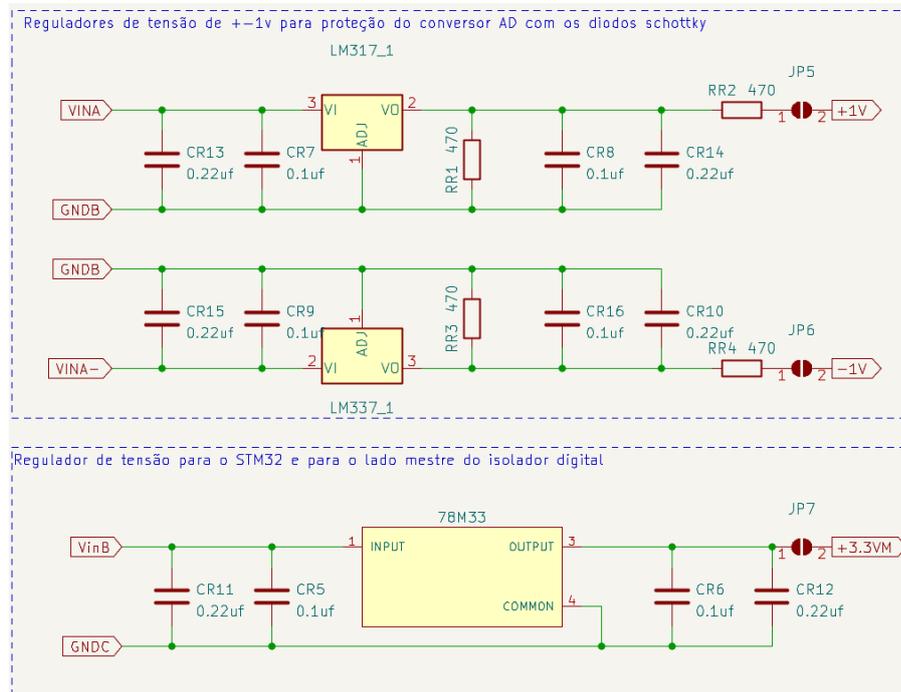
As Figura 3.12 e Figura 3.13 apresentam o esquemático dos reguladores de tensão para o circuito.

Figura 3.12 – Primeira parte do esquemático dos reguladores de tensão.



Fonte: Autor.

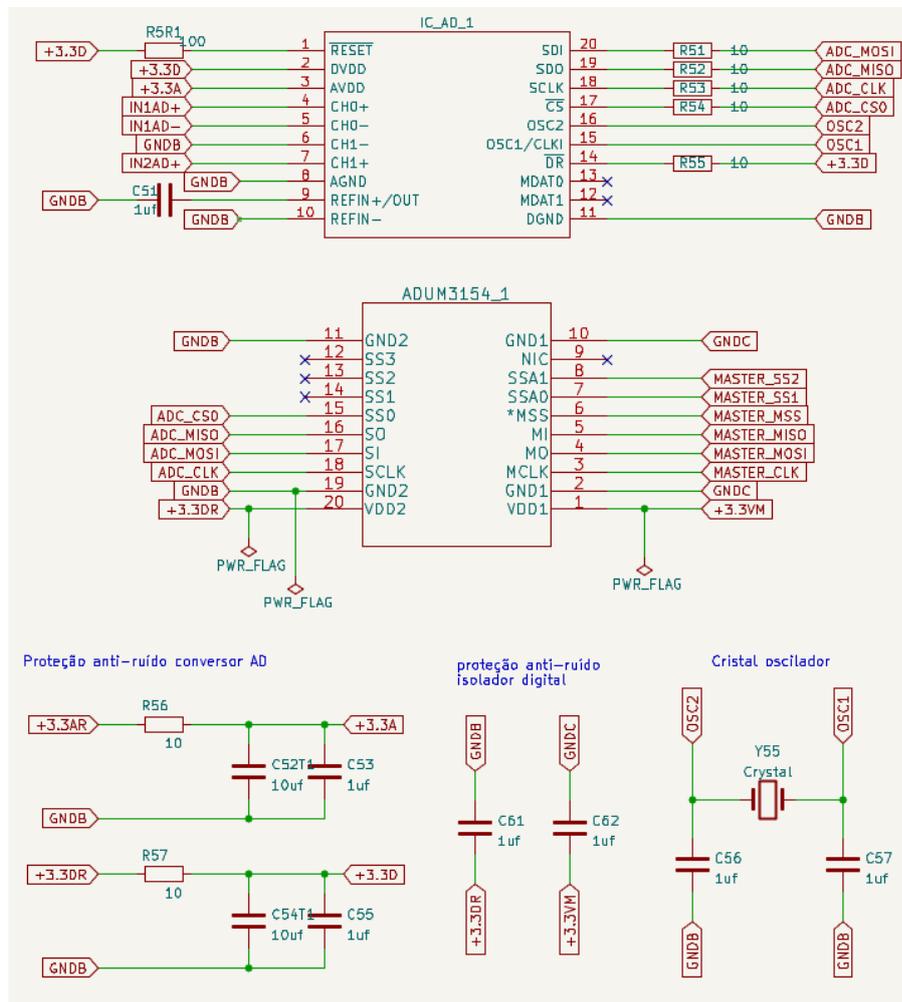
Figura 3.13 – Segunda parte do esquemático dos reguladores de tensão.



Fonte: Autor.

O esquemático do conversor A/D MCP3911 e o isolador digital ADuM3154, com seus respectivos componentes periféricos, são mostrados na Figura 3.14.

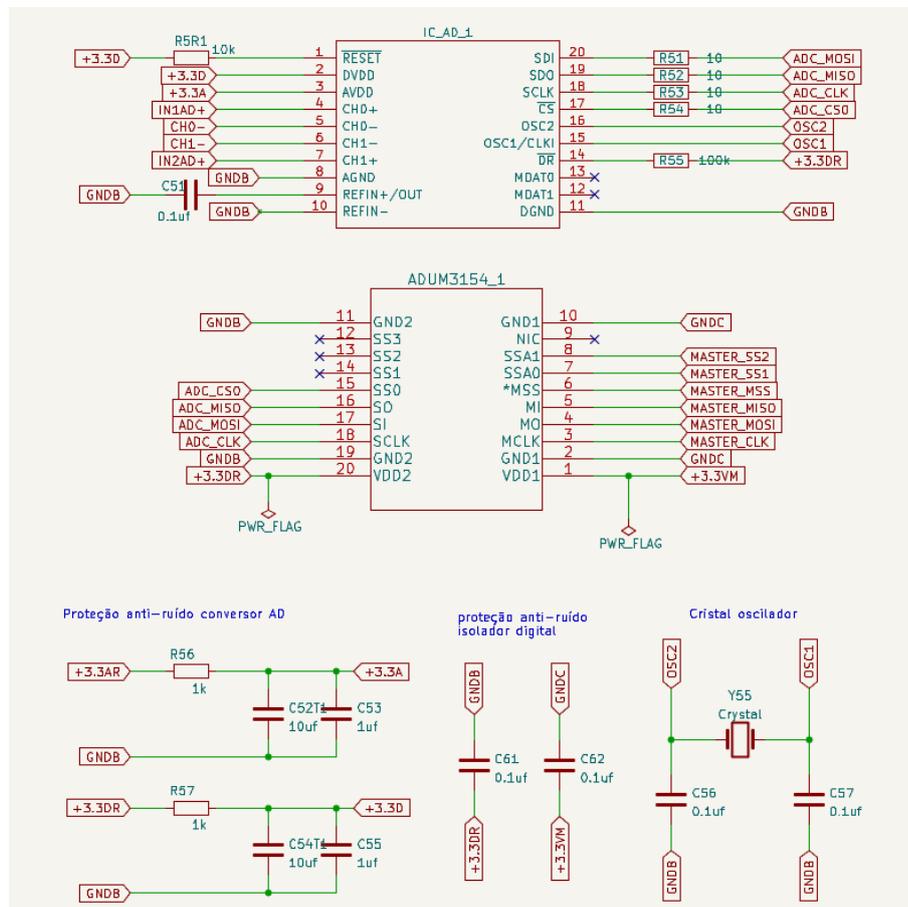
Figura 3.14 – Esquemático do conversor A/D e do isolador.



Fonte: Autor.

Para o STM32F411CCU, foram utilizados dois conectores do tipo *socket*, com duas colunas de pinos cada um, com o objetivo de conectar o microcontrolador na placa e ainda ter a opção de mudar, refazer ou então utilizar outra porta do microcontrolador sem a necessidade de grandes alterações na PCI já confeccionada. O esquemático está na Figura 3.15.

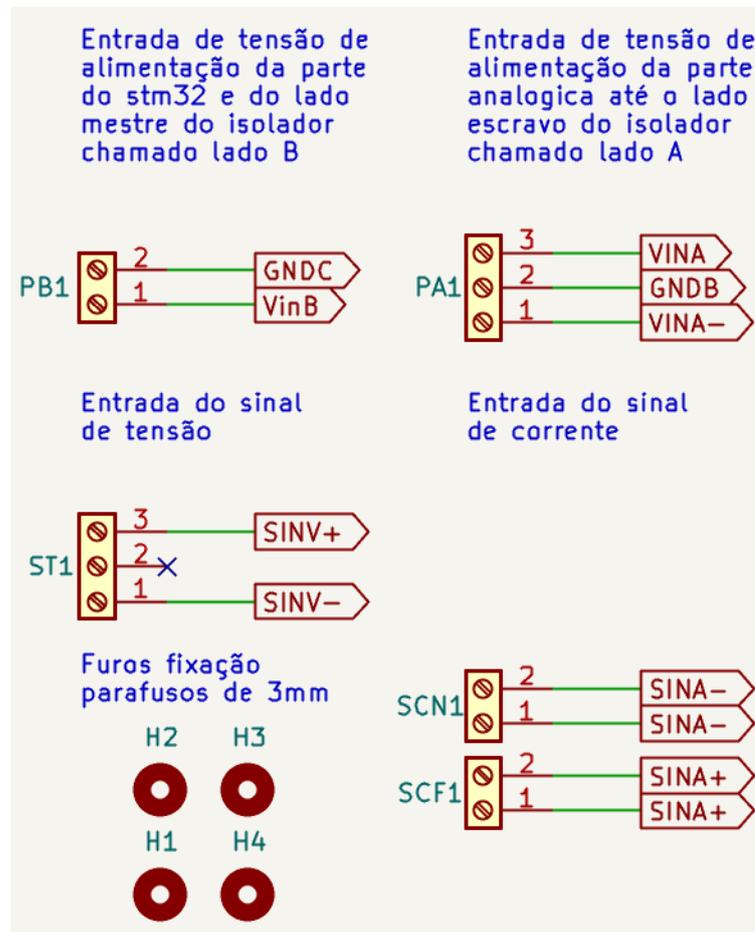
Figura 3.15 – Esquemático do circuito do microcontrolador.



Fonte: Autor.

A parte final do esquemático faz as ligações dos conectores (Figura 3.16), que estão separados por uma questão de organização, e facilita a visualização dos periféricos do circuito.

Figura 3.16 – Esquemático dos conectores da PCI.



Fonte: Autor.

Com os componentes definidos, organizados e com suas devidas conexões, dá-se início ao desenvolvimento do esquema de disposição dos componentes em uma PCI.

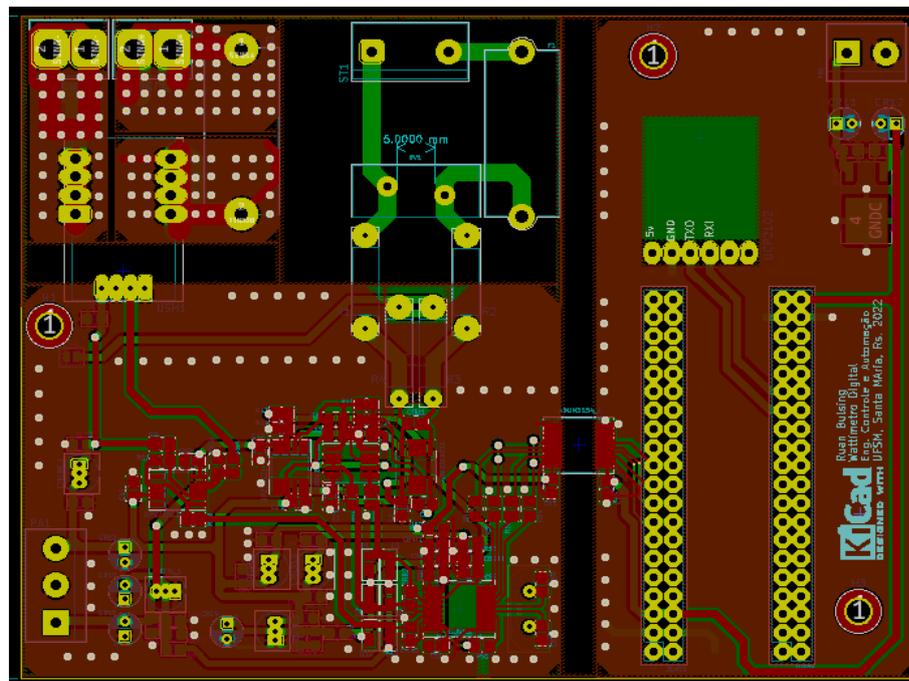
3.6.2 Desenvolvimento da PCI

Para a confecção da PCI será utilizada a fresadora de placas de circuito impresso PCB-Proto 1S, produzida pela TTP Indústria Mecânica®, gerenciada pelo Grupo de Eletrônica de Potência (GEPOC) da UFSM. A PCI do projeto deve ter duas faces e deve respeitar diversos critérios de desenvolvimento, como interferências eletromagnéticas, largura e distanciamento das trilhas com alta corrente e/ou tensão.

A Figura 3.17 mostra a disposição dos componentes e das trilhas do circuito. A placa foi dividida em entrada dos sinais de tensão e corrente, onde na parte de tensão não há plano de

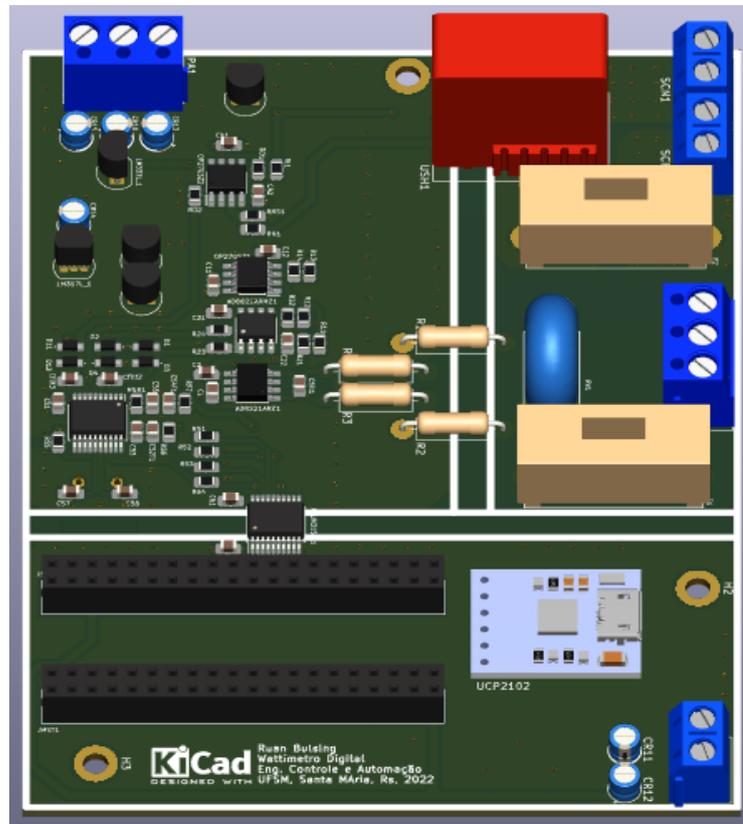
cobre nas duas faces para evitar a ruptura do dielétrico do ar entre as trilhas de alta tensão e o plano de terra. Na parte de entrada de corrente foi utilizado o maior espaço possível para a conexão dos pinos para que as trilhas comportem a corrente sem sobreaquecer. Nesse sentido, as faces foram interconectadas para aumentar a área de cobre. Logo após a entrada dos sinais está a parte de instrumentação, onde as trilhas foram feitas quase totalmente na face superior da placa. Já na parte inferior estão as trilhas de alimentação dos componentes. No lado direito da PCI está o circuito digital separado pelo CI isolador e com alimentação separada em relação ao circuito de instrumentação. A Figura 3.18 traz uma representação em três dimensões.

Figura 3.17 – Disposição dos componentes na PCI com as trilhas e planos de terra (primeira versão).



Fonte: Autor.

Figura 3.18 – Visualização em 3D da PCI projetada (primeira versão).

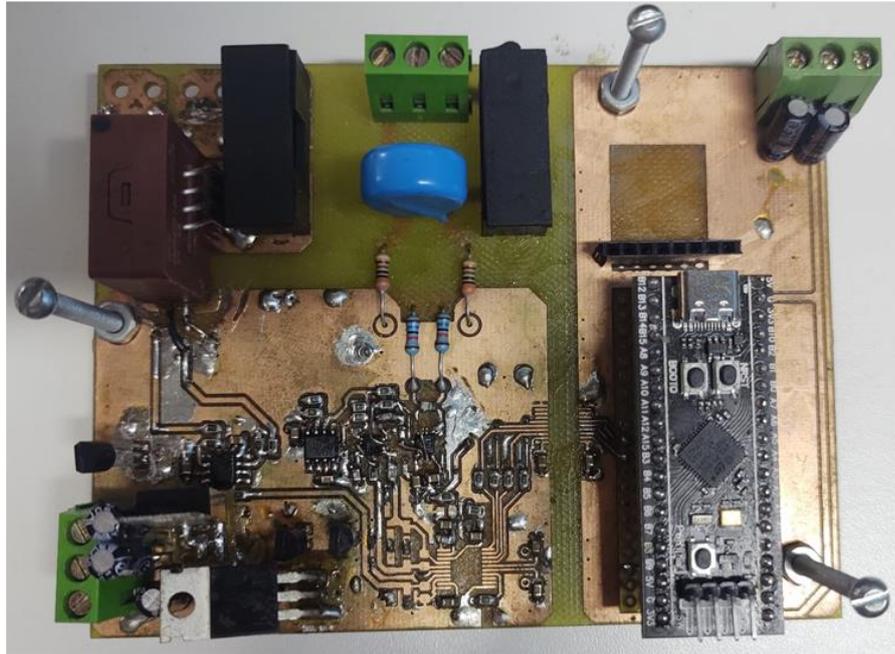


Fonte: Autor.

3.6.3 Fabricação e montagem da PCI

A Figura 3.19 mostra a placa fresada e com os componentes já instalados.

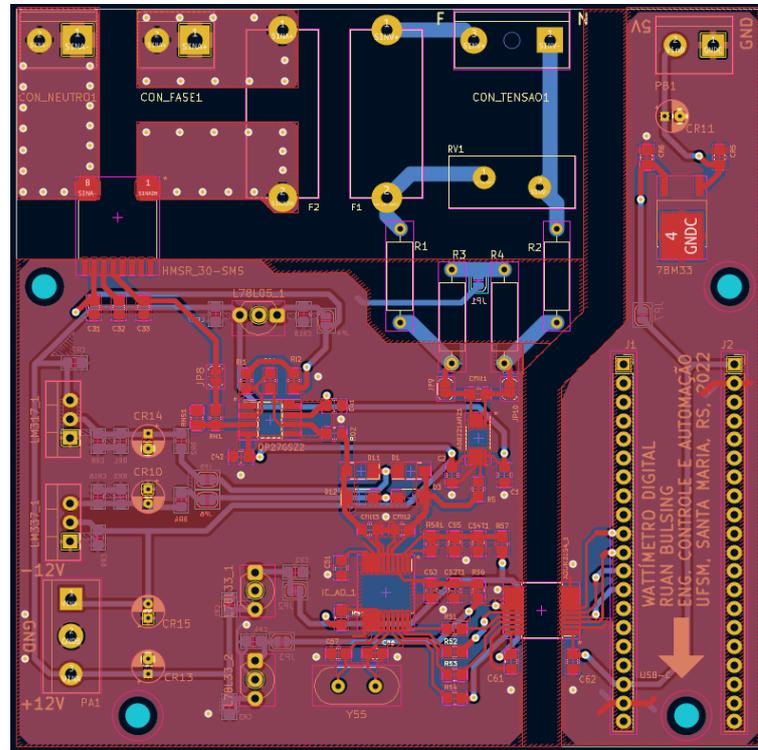
Figura 3.19 – Visão superior da placa do analisador de energia (primeira versão).



Fonte: Autor.

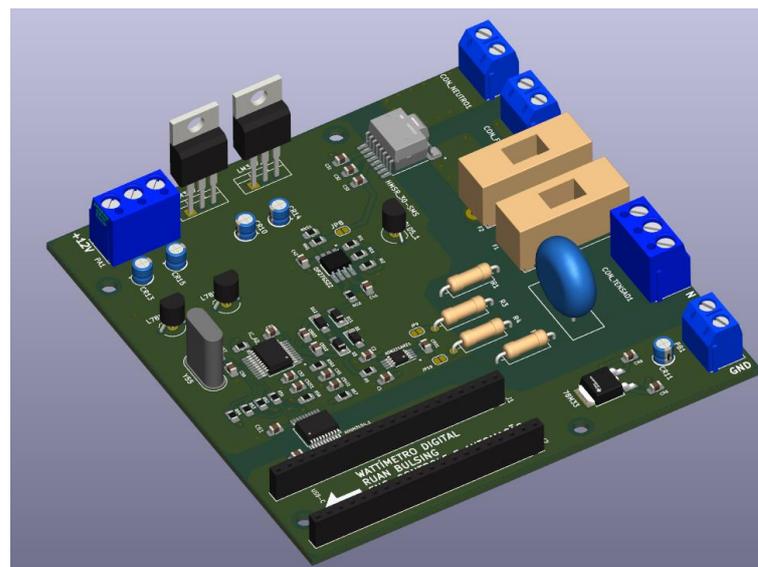
Ao realizar a montagem e os testes iniciais sobre a primeira versão do circuito, foi constatado alguns erros em relação aos *footprints* dos componentes. Para alguns desses erros, o circuito pode ser adaptado para que se utilizar os componentes disponíveis. Também foram rearranjados os componentes de forma a manter a organização em relação à proteção antirruídos eletromagnéticos, mas que possibilitasse que a PCI pudesse ser fabricada profissionalmente. Assim, desenvolveu-se uma segunda versão da PCI (Figura 3.20) que possui mais espaço para os componentes, trilhas mais largas e onde os erros da primeira versão foram corrigidos. A Figura 3.21 apresenta a vista em 3D da nova PCI.

Figura 3.20 – Disposição dos componentes na PCI com as trilhas e planos de terra (segunda versão).



Fonte: Autor.

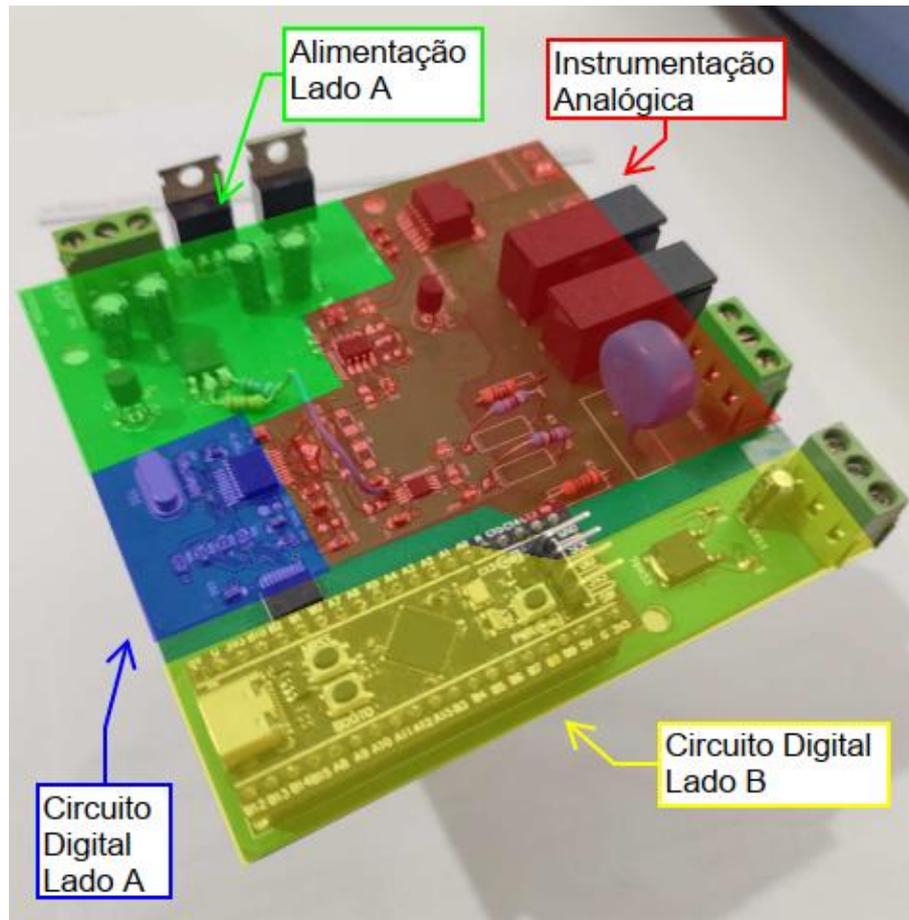
Figura 3.21 – Visualização em 3D da PCI projetada (segunda versão).



Fonte: Autor.

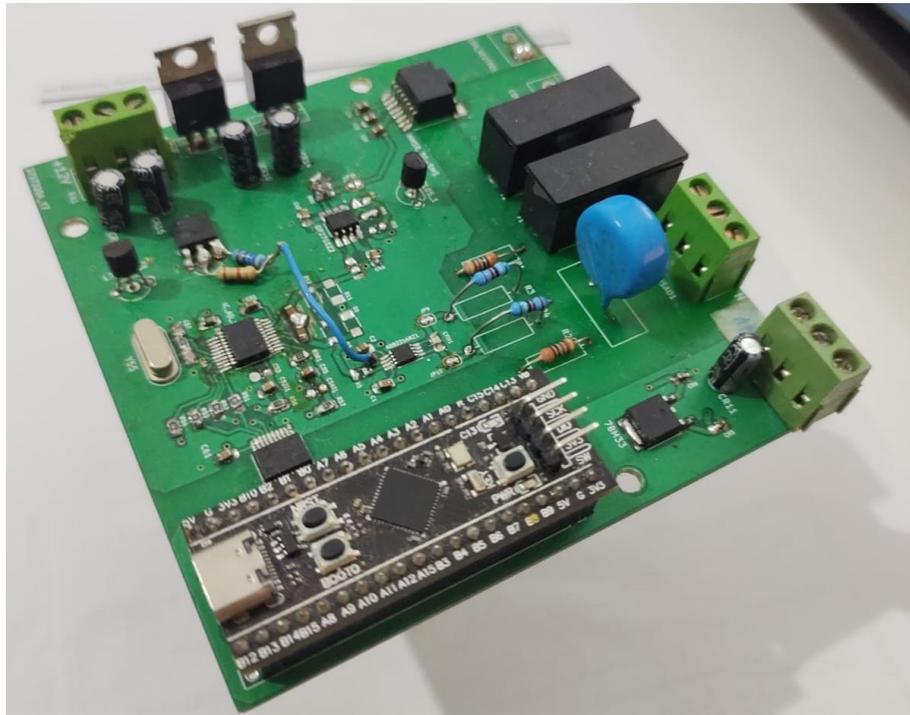
A Figura 3.22 mostra a organização das áreas da PCI para evitar interferências e a Figura 3.23 o circuito projetado com os componentes montados.

Figura 3.22 – Visão superior da placa do analisador de energia, destacando as diferentes regiões (segunda versão).



Fonte: Autor.

Figura 3.23 – Visão superior da placa do analisador de energia (segunda versão).

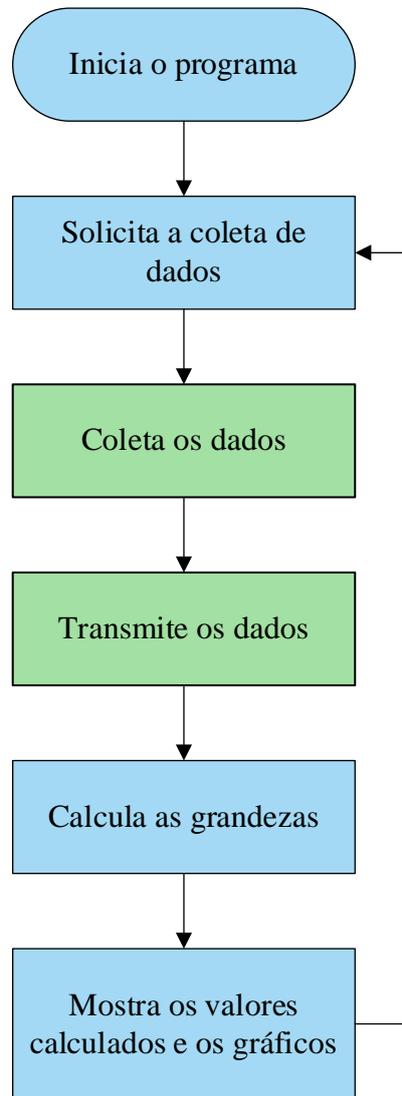


Fonte: Autor.

3.7 ALGORITMO DO ANALISADOR DE ENERGIA DIGITAL

Com o circuito de instrumentação do sinal para o MCP3911 concluído, foram necessários realizar os testes no conversor A/D e desenvolver o *firmware* do microcontrolador e o *software* que processará e mostrará os dados em plataforma PC. O desenvolvimento desses programas foi baseado em um fluxograma base, representado na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Algoritmo base dos programas.



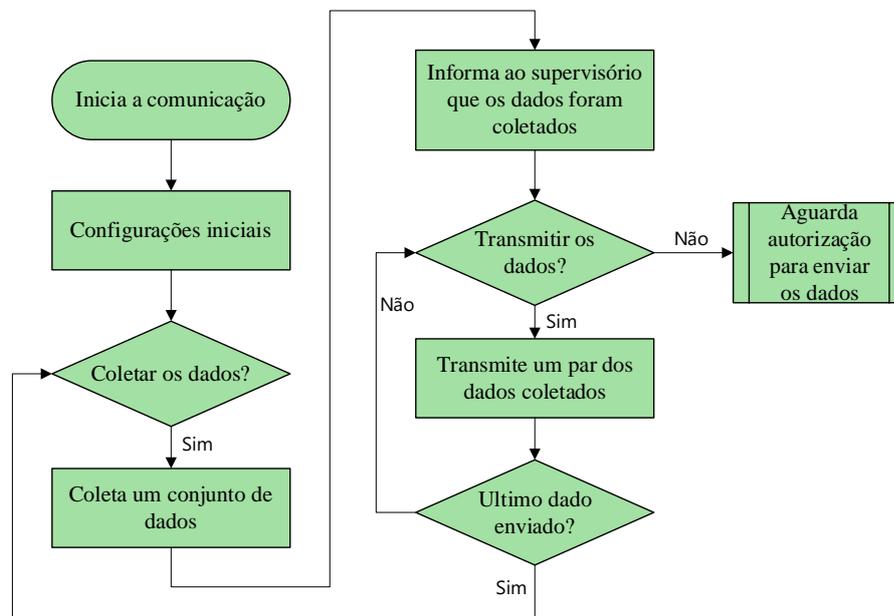
Fonte: Autor.

Na Figura 3.24, diferencia-se em azul o sistema supervisor que solicita e recebe as medidas de tensão e corrente, calcula as grandezas como a tensão e corrente eficaz e mostra esses valores e os gráficos. Em verde, está o STM32 que recebe as solicitações de dados novos e transmite por USB. Com a estrutura do algoritmo pode-se entrar em detalhes no desenvolvimento dos programas.

3.7.1 Algoritmo do firmware do microcontrolador do dispositivo

O microcontrolador STM32F401CCU6 possui a capacidade de operar a um *clock* base de até 84 MHz, apresentando suporte para comunicações por meio de protocolos SPI e CDC, por interface USB para estabelecer a comunicação entre o conversor A/D e o programa no computador. Nesse contexto, foi desenvolvido um algoritmo mostrado na Figura 3.25, dedicado para realizar as comunicações e coleta de dados, visando verificar a integração eficiente entre o conversor A/D, o microcontrolador e o programa supervisorio.

Figura 3.25 – Algoritmo do *firmware*.



Fonte: Autor.

O algoritmo foi implementado em linguagem C utilizando a STM32IDE, uma plataforma desenvolvida pela STM[®] para facilitar o desenvolvimento de programas em seus microcontroladores. Neste sistema, o microcontrolador opera conforme as instruções do programa supervisorio.

Durante a operação, o microcontrolador realiza a coleta de dados em uma janela de tempo correspondente a 1 períodos de 60 Hz, com uma frequência de amostragem de 250 kHz, obtendo e armazenando 4166 amostras de tensão e de corrente, utilizando um total de 32.5 Kbytes de memória SRAM do SMT32. Após a conclusão da coleta, o microcontrolador notifica

o supervisor sobre a disponibilidade dos dados e aguarda a confirmação para enviar um par de informações contendo tensão e corrente, seguindo assim até concluir o envio de toda a fila de dados.

Os dados enviados estão no formato hexadecimal e separados por uma vírgula. Assim, cada transmissão de dados tem 16 caracteres de hexadecimais, mais o caractere da vírgula e o terminador nulo “/0”, no total de transmissão de 18 bytes. Não foi especificado nenhum byte de confirmação da transmissão e recebimento, visto que este tipo de confirmação diminui a taxa de transmissão de dados. Ao concluir a transmissão de todos os dados, o microcontrolador entra em espera, aguardando novas instruções do programa supervisor.

3.7.2 Algoritmo do programa supervisor do analisador de energia

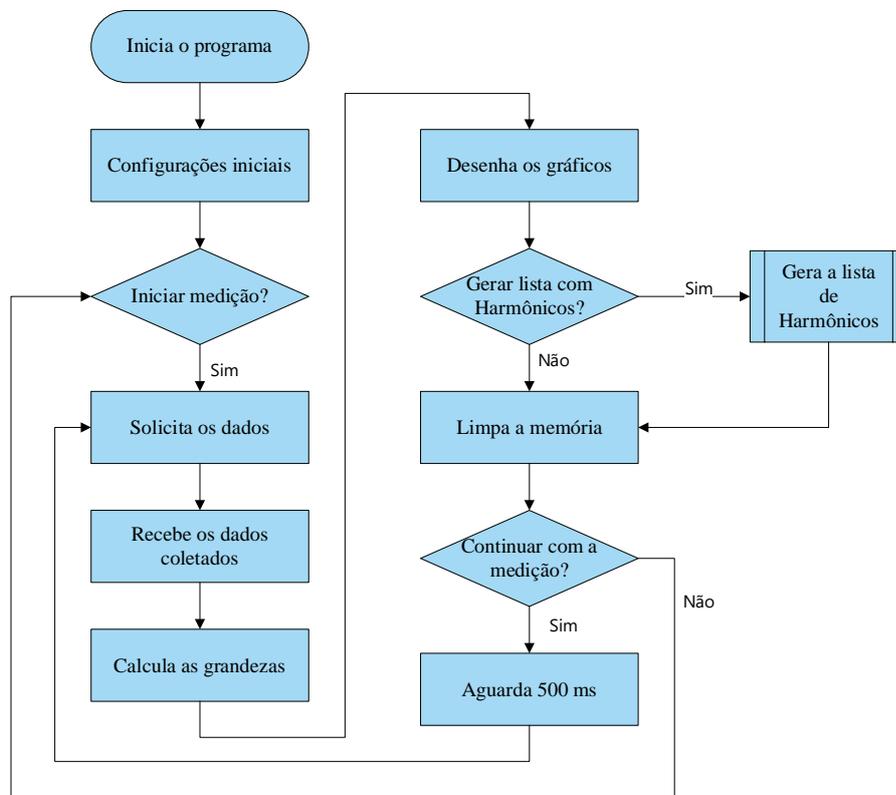
O desenvolvimento do programa supervisor para o analisador de energia digital, capaz de receber os dados, calcular e mostrar os valores foi desenvolvido em C#, utilizando a estrutura de desenvolvimento de *software .NET framework*, da Microsoft®. Essa abordagem permite a execução do programa no sistema operacional Windows. O algoritmo resultante é apresentado de maneira visual na Figura 3.26.

O programa supervisor é responsável por gerenciar a coleta da tensão e corrente no dispositivo e com essas informações, calcular as grandezas necessárias e apresentar ao usuário. O programa inicia com a necessidade de selecionar a porta USB à qual o dispositivo está conectado. Uma vez realizada essa seleção, o programa salva essas informações, eliminando a necessidade de escolher a porta a cada inicialização subsequente. Posteriormente, é possível iniciar o ensaio.

Ao solicitar ao dispositivo que colete os dados, o programa aguarda a resposta com as informações coletadas. Após receber todos os dados, o sistema supervisor realiza cálculos para determinar grandezas como tensão média, eficaz e THD da tensão, corrente média, eficaz e THD da corrente, potência aparente, ativa, reativa e o fator de potência.

Uma vez obtidos esses valores, eles são apresentados nos gráficos de tensão e corrente, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Em seguida, é possível solicitar novos dados e reiniciar o ciclo ou interromper a medição. Adicionalmente, o programa oferece a função de extrair uma lista com as frequências harmônicas de tensão e corrente.

Figura 3.26 – Algoritmo do programa supervisor do analisador de energia digital.



Fonte: Autor.

No caso de ocorrência de erros de conectividade ou se os dados não estiverem no formato hexadecimal, o usuário será informado por meio de mensagens de erro, incluindo informações relevantes para identificação e resolução do problema.

Com os circuitos, PCI e algoritmos apresentados, a próxima etapa deste relatório abordará os resultados experimentais obtidos durante a execução do projeto. Serão analisados os dados coletados pelo dispositivo, as grandezas calculadas e as informações visuais fornecidas pelos gráficos de tensão e corrente. Serão apresentadas as observações sobre o comportamento do sistema em diferentes condições de teste, proporcionando uma análise aprofundada do desempenho do analisador de energia digital desenvolvido.

3.8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos nesse projeto serão apresentados em partes, começando pela instrumentação dos sinais, depois pelo conversor A/D e os testes com o sistema supervisor.

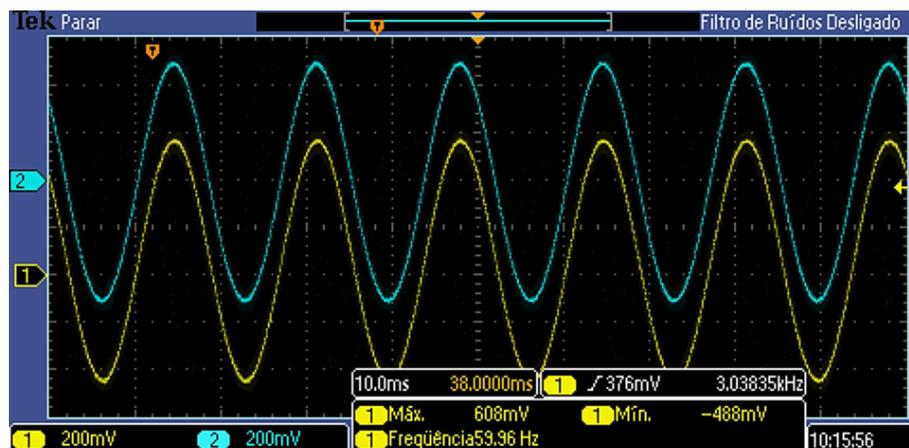
3.8.1 Resultados experimentais do circuito de medição de tensão e corrente

Antes de analisar os sensores de corrente e de tensão, foram testados os circuitos de instrumentação que adequam o sinal para o conversor A/D. Foram utilizados equipamentos de bancada como um gerador de funções, para simular os sinais dos sensores, um osciloscópio, que possibilita a visualização do sinal que entrará no conversor A/D, e uma fonte de bancada com tensão variável e controle de corrente, para alimentar o circuito. O objetivo dessa etapa é analisar o funcionamento da instrumentação do sinal e comparar o resultado com as simulações.

3.8.1.1 Resultado do circuito de instrumentação de tensão

O gerador de funções DG1022 da RIGOL[®] foi configurado para gerar uma senóide com amplitude de 1 V em 60 Hz e sem deslocamento CC, simulando o sinal de entrada no amplificador de instrumentação, no início do circuito. A ponteira do osciloscópio MSO 2012 da Tektronix[®] foi colocada em paralelo com a primeira entrada do conversor A/D. A Figura 3.27 apresenta o resultado no osciloscópio.

Figura 3.27 – Análise experimental: forma de onda do sinal de tensão.



Fonte: Autor.

O resultado na Figura 3.27 mostra, em amarelo, o sinal na entrada do conversor A/D e o sinal aplicado pelo gerador de funções. Percebe-se, que o sinal está de acordo com a simulação.

Após o teste do circuito, foi realizado um experimento aplicando tensão contínua de -20 V até 20 V a um passo de 2 V, onde o resultado está apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultado experimental do divisor resistivo como sensor de tensão.

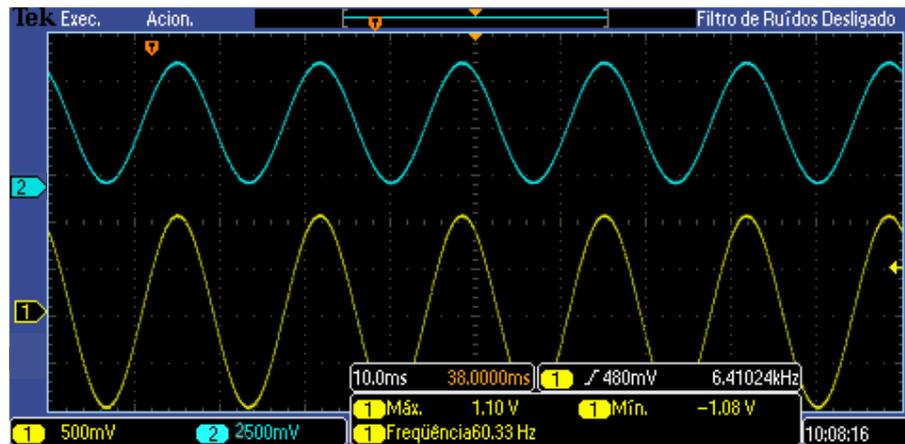
Tensão contínua (V)	Entrada do Conversor A/D (V)	Calculado (V)	Erro (%)
-20	-0,01	-0,0104	3,8
-18	-0,009	-0,0093	3,2
-16	-0,008	-0,0083	3,6
-14	-0,007	-0,0072	2,7
-12	-0,006	-0,0061	1,6
-10	-0,005	-0,0051	1,9
-8	-0,004	-0,004	0,0
-6	-0,003	-0,0029	3,4
-4	-0,002	-0,0019	5,2
-2	-0,001	-0,0008	25,0
0	0,000	0,0000	0,0
2	0,001	0,0012	16,6
4	0,002	0,0023	13,0
6	0,003	0,0034	11,7
8	0,004	0,0044	9,0
10	0,005	0,0055	9,0
12	0,006	0,0065	7,6
14	0,007	0,0076	7,8
16	0,008	0,0087	8,0
18	0,009	0,0097	7,2
20	0,010	0,0108	7,4

Fonte: Autor.

3.8.1.2 Resultado do circuito de instrumentação de corrente

Para o circuito de instrumentação de corrente, o gerador de funções simulará o sinal máximo de tensão da saída do sensor de efeito *Hall*, com amplitude de 2 V em 60 Hz e *offset* de 2,5 V. A ponteira do osciloscópio foi conectada em paralelo com a segunda entrada do conversor A/D. A Figura 3.28 apresenta o resultado no osciloscópio referente ao circuito de corrente.

Figura 3.28 – Análise experimental: forma de onda do sinal de corrente.



Fonte: Autor.

Na Figura 3.28, em amarelo, está o sinal aplicado à entrada do conversor A/D e, em azul, está o sinal aplicado pelo gerador de funções. O resultado desse experimento mostra que o circuito de instrumentação está de acordo com a simulação.

Com o teste do circuito de instrumentação, foi feito o teste aplicando corrente contínua em uma margem segura de aplicação em bancada para o protótipo. A Tabela 3.6 mostra o resultado dos valores colhidos.

Tabela 3.6 – Resultado do experimento no sensor de corrente por efeito *Hall*.

Corrente Contínua Aplicada (A)	Saída do sensor (V)	Entrada no Conversor A/D (V)	Calculado (V)	Erro (%)
-9,000	2,270	-0,114	-0,1160	-1,7
-8,010	2,298	-0,100	-0,0999	-0,1
-7,010	2,326	-0,086	-0,0859	-0,1
-6,022	2,348	-0,076	-0,0759	-0,1
-5,031	2,376	-0,062	-0,0619	-0,1
-4,046	2,404	-0,048	-0,0479	-0,2
-3,025	2,428	-0,036	-0,0359	-0,2
-2,160	2,455	-0,024	-0,0239	-0,4
-1,057	2,485	-0,007	-0,0075	-6,6
0,000	2,508	0,004	0,0040	0,0
1,038	2,535	0,017	0,0175	2,8
2,026	2,561	0,301	0,3050	1,3
3,010	2,588	0,442	0,4400	0,4
4,014	2,613	0,570	0,5650	0,8

Corrente Contínua Aplicada (A)	Saída do sensor (V)	Entrada no Conversor A/D (V)	Calculado (V)	Erro (%)
5,034	2,640	0,702	0,7000	0,2
6,050	2,665	0,836	0,8250	1,3
7,230	2,699	0,102	0,0995	2,5
8,100	2,723	0,115	0,1115	3,1
9,060	2,744	0,124	0,1220	1,6

Fonte: Autor.

O experimento foi realizado variando a corrente aplicada de -9 A até 9 A em uma variação de 1 A. com o objetivo de comprovar o sinal de saída do sensor de corrente HMSR 30-SMS e a relação de conversão do sinal para o canal de entrada do conversor A/D. O valor calculado seria o ideal as condições do projeto e o erro percentual referente à diferença entre o valor medido e o calculado.

Após a conclusão dos testes de instrumentação, realizados para assegurar o correto condicionamento do sinal para o conversor A/D em conformidade com as especificações fornecidas no *datasheet* do componente, foi possível aplicar os sinais diretamente no MCP3911 para avaliação do componente e da comunicação com o microcontrolador.

3.8.1.3 Resultado do experimento da conversão de analógico para digital

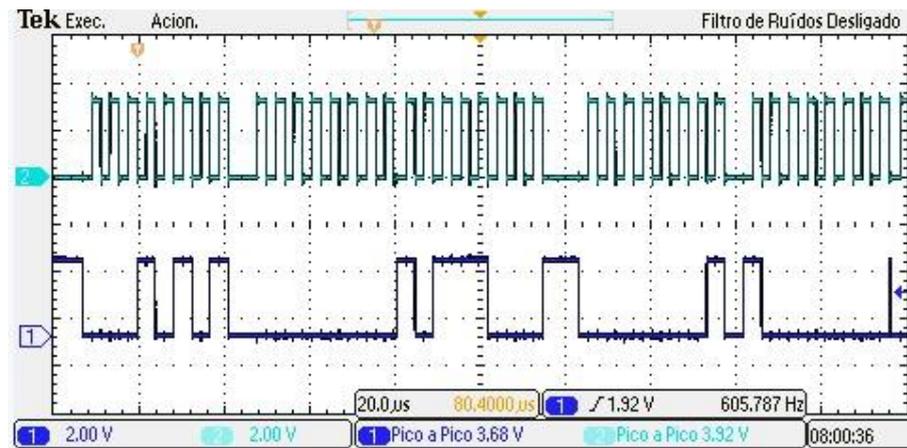
Esse experimento consiste em aplicar os sinais de tensões e correntes tratados para o conversor A/D, o MCP3911, e então analisar o sinal digital pelo microcontrolador. Porém, antes de aplicar os sinais tratados no MCP3911, foi utilizado uma fonte de bancada, com tensão contínua e corrente máxima controlada para evitar a queima do componente.

O primeiro teste do componente foi em circuito aberto, ou seja, não foi conectado a nenhum sinal, apenas as flutuações e interferências externas para testar a comunicação do MCP3911 com o STM32. E esse teste obteve o resultado esperado, onde os sinais flutuavam e pode-se atestar que a comunicação SPI funcionava, onde na Figura 3.29 tem-se um exemplo da comunicação com a geração do *clock* principal da comunicação e do sinal MISO, em que o MCP3911 envia os dados STM32. Na Figura 3.29, observa-se o *clock* no canal 2 e o sinal MISO no canal 1.

Os próximos testes buscam zerar a medida com um curto-circuito nos canais de entrada do MCP3911, ou teste com o sinal não diferencial, com o sinal de tensão de referência de

1,2 V que o próprio MCP3911 fornece como saída, sendo colocado na entrada positiva em um dos canais e a entrada negativa, aterrada ao GND do plano analógico. Esses testes, segundo o próprio *datasheet* do componente, deveria zerar, ou estar muito próximo de zero nos valores de saída do conversor A/D. O resultado não foi conforme o esperado.

Figura 3.29 – Corte de um período da comunicação entre o MCP3911 e o STM32.



Fonte: Autor.

Desta forma, ainda foi verificado as demais funções do MCP3911, como troca dos valores de configuração (*Prescale*, *Oversampling Ratio*, *Gain*, *Boost*) na tentativa de identificar a origem dos erros de leitura. Esses testes mostraram que a comunicação SPI funcionou perfeitamente em qualquer configuração de leitura e o isolador digital (ADuM3154), não comprometeu a comunicação SPI, mantendo a comunicação e a isolamento.

O próximo passo foi trocar os componentes periféricos ao MCP3911, capacitores de desacoplamento, resistores e cristal oscilador, constatar os níveis de tensão e corrente de alimentação do componente, bem como possíveis flutuações e interferência eletromagnéticas. Mesmo garantindo o funcionamento da alimentação dos componentes e que a alimentação estava correta e estável, o MCP3911 ainda não correspondia com o sinal de leitura desejado.

Uma última tentativa usar uma PCI reserva e o MCP3911 sobressalente. Porém, o resultado também não foi como o esperado. Os dois conversores A/D funcionam na parte digital conforme o *datasheet* e se comunicam com o microcontrolador, até mesmo com outros modelos de embarcados, como o Arduino Uno, o problema está na leitura analógica do componente que não se mostrou confiável, nem fiel às informações fornecidas pelo seu *datasheet* nem manuais de aplicação.

Também foi tentado contato com o fabricante do componente, a Microchip[®], mas não foi possível concluir a origem do problema. Demais desenvolvedores também reportaram problemas que se parecem com o que ocorreu neste projeto e, os poucos que compartilharam, a solução foi a troca do MCP3911 por um conversor A/D de outra fabricante.

Depois de esgotar as possibilidades de utilizar o conversor A/D desse projeto, foi constatado que a solução seria determinar outro conversor A/D, que ainda atenda às demandas de resolução, precisão e taxa de amostragem, porém desenvolver outro protótipo em tempo hábil e com orçamento limitado dificultam a implementação dessa solução.

Por se tratar de um protótipo e que este projeto poderá servir para o desenvolvimento futuro de outros bacharelados em engenharia e que, ainda há como desenvolver e melhorar os dispositivos do laboratório de ensaios do INRIMT da UFSM, determinou-se simular a utilização do conversor A/D com o STM32.

Dessa forma, exclusivamente neste Trabalho de Conclusão de Curso, o STM32 terá uma função em seu *firmware* que simula a geração de um sinal de tensão e corrente aplicados em um transformador quando ensaiado, dentro da resolução e taxa de amostragem do MCP3911, substituindo a função que receberia os dados do conversor A/D. Essa solução adotada para a continuidade do projeto inutiliza o circuito de instrumentação que, apesar de estar validado, não será utilizado no momento para realizar os ensaios do sistema supervisorio.

3.8.2 Sistema supervisorio do analisador de energia digital

O sistema supervisorio deve calcular e apresentar os as grandezas conforme a lista de dados enviada pelo dispositivo. As equações 3.24 até 3.33 foram utilizadas para calcular essas grandezas.

Tensão média (V_M):

$$V_M = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N v(K) \quad (3.24)$$

Corrente média (I_M):

$$I_M = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N i(K) \quad (3.25)$$

Tensão eficaz (V_{RMS}):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N v^2(K)} \quad (3.26)$$

Corrente eficaz (I_{RMS}):

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N i^2(K)} \quad (3.27)$$

THD da tensão (V_{THD}):

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^N v_h^2(K)}}{V_{h1}} \quad (3.28)$$

THD da corrente (I_{THD}):

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^N I_h^2(K)}}{I_{h1}} \quad (3.29)$$

Potência aparente (S):

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (3.30)$$

Potência ativa (P):

$$P = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N v(K)i(K) \quad (3.31)$$

Potencia reativa (Q):

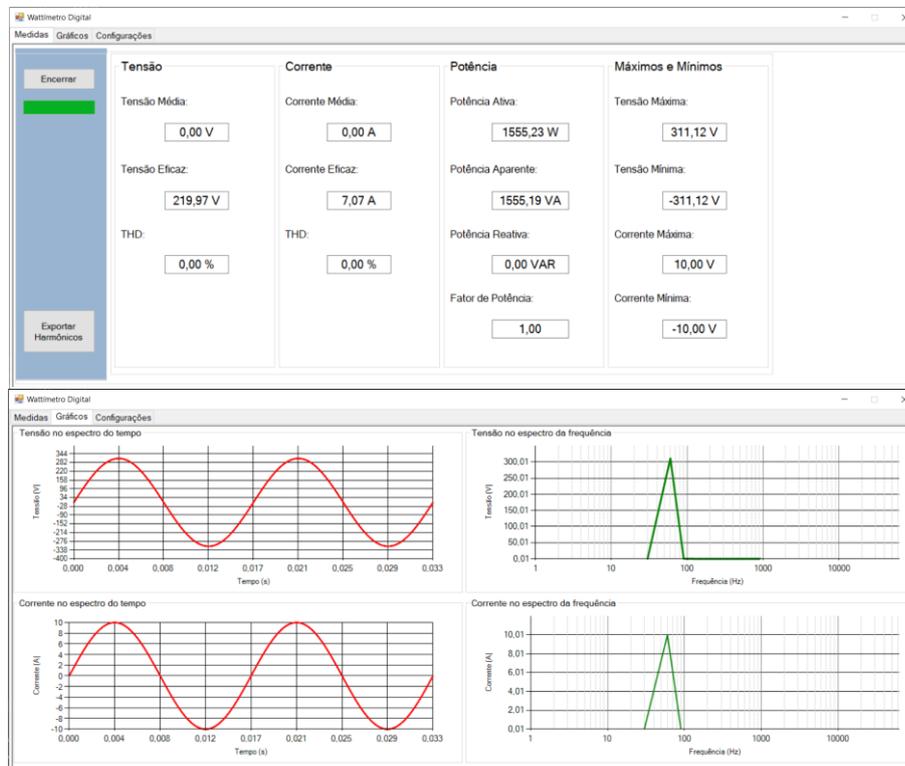
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.32)$$

Fator de potência (FP):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3.33)$$

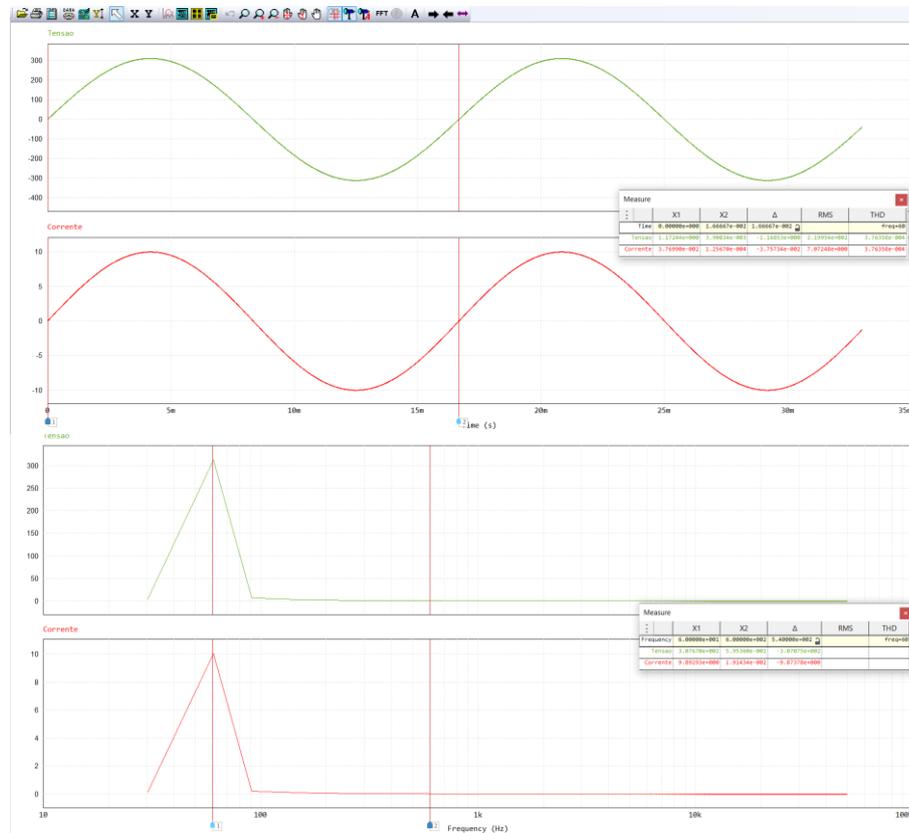
Com base na resolução do problema envolvendo o conversor A/D, usando a geração do sinal de forma virtual com o STM32, foram realizados alguns experimentos com o sistema supervisorio. O primeiro experimento foi gerando um sinal senoidal e alternado STM32, sem harmônicos e sem defasagem entre a tensão e a corrente, em 60 Hz, com amplitude de 311,12 V para a tensão e 10 A para a corrente. Uma simulação no PSIM[®] foi utilizada para comparar os resultados com os mesmos valores. O resultado do experimento é apresentado na Figura 3.30 com os valores coletados e as formas de ondas amostradas. A Figura 3.31 mostra o resultado do PSIM[®] com o mesmo sinal.

Figura 3.30 – Resultados do primeiro teste do sistema supervisorio.



Fonte: Autor.

Figura 3.31 – Resultado gráfico da simulação do sinal no PSIM®.



Fonte: Autor.

A Tabela 3.7 mostra o resultado comparado com os valores calculados e a relação de erro entre as medidas.

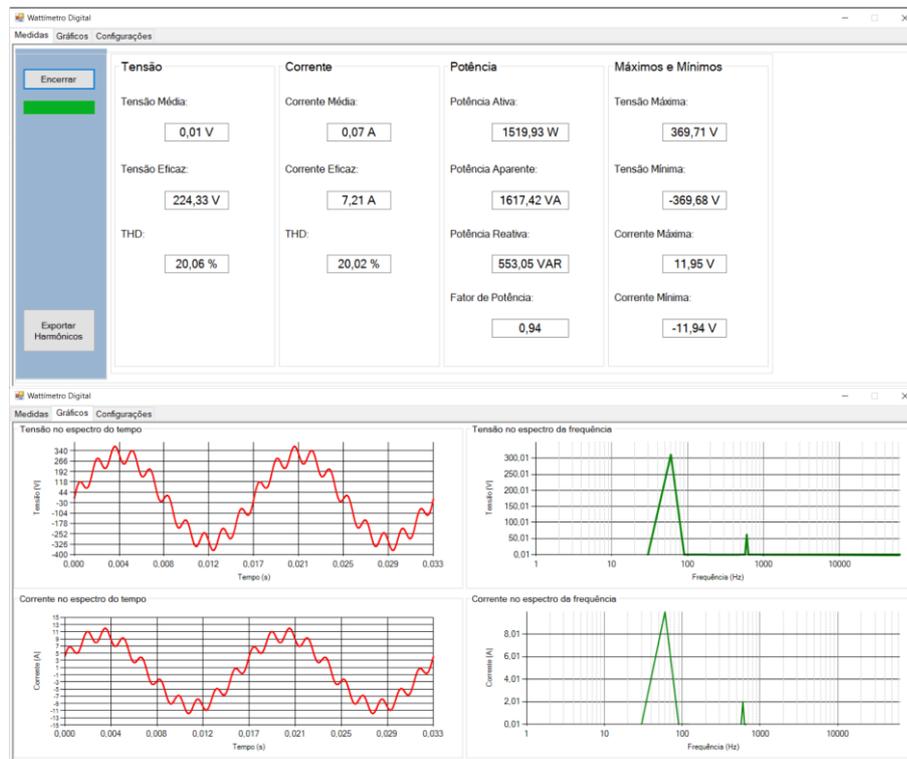
Tabela 3.7 – Resultados do primeiro ensaio do sistema supervisorio

Grandeza	Medido	Calculado	Erro (%)
V_M	0,00 V	0,00 V	0,00
V_{RMS}	219,97 V_{RMS}	220,00 V_{RMS}	0,01
V_{THD}	0,00 %	0,00 %	0,00
I_M	0,00 A	0,00 A	0,00
I_{RMS}	7,07 A_{RMS}	7,07 A_{RMS}	0,00
I_{THD}	0,00 %	0,00 %	0,00
S	1555,19 VA	1555,4 VA	0,01
P	1555,23 W	1555,4 W	0,01
Q	0,00 VAR	0,00 VAR	0,00
FP	1,00	1,00	0,00

Fonte: Autor.

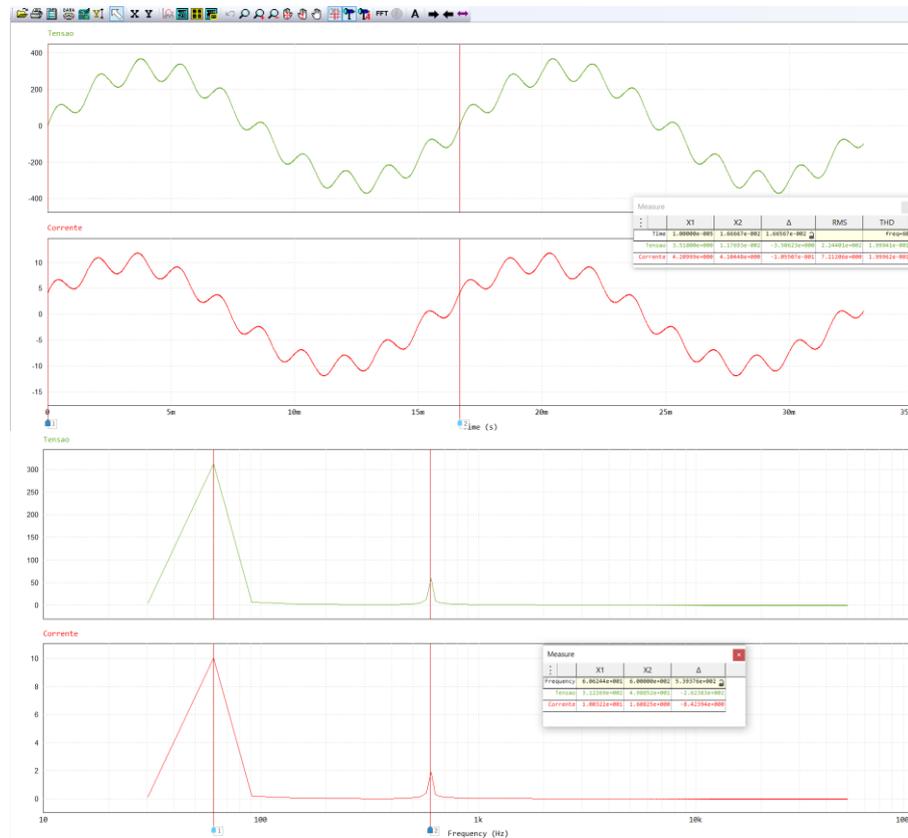
O segundo ensaio foi realizado com um sinal senoidal de 311,12 V com a frequência fundamental de 60 Hz somado a outro sinal senoidal de 62,22 V (cinco vezes menor que a amplitude principal) a uma frequência de 600 Hz. A corrente foi configurada com amplitude de 10 A, frequência fundamental de 60Hz, somada a um sinal de 2 A com frequência de 600 Hz. O segundo sinal aplicado na tensão e corrente representam sinais em frequências harmônicas. Também foi aplicado uma defasagem no sinal de corrente em relação à tensão de 20°. Figura 3.32 mostra o resultado do analisador de energia e a Figura 3.33, o resultado da simulação desses sinais no PSIM®.

Figura 3.32 – Resultados do segundo teste do sistema supervisorio.



Fonte: Autor.

Figura 3.33 – Resultado gráfico da simulação do sinal no PSIM.



Fonte: Autor.

A Tabela 3.8 mostra o resultado comparado com os valores calculados e a relação de erro entre as medidas.

Tabela 3.8 – Resultados do segundo ensaio do sistema supervisorio.

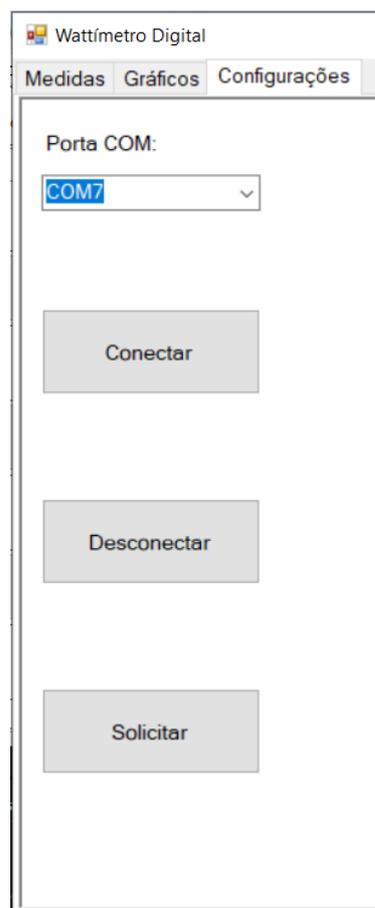
Grandeza	Medido	Calculado	Erro (%)
V_M	0,01 V	0,00 V	100,00
V_{RMS}	224,33 V_{RMS}	224,31 V_{RMS}	0,01
V_{THD}	20,06 %	19,99 %	0,03
I_M	0,01 A	0,00 A	-
I_{RMS}	7,21 A_{RMS}	7,21 A_{RMS}	0,00
I_{THD}	20,02 %	19,99 %	0,01
S	1617,42 VA	1617,59 VA	0,01
P	1519,93 W	1519,07 W	0,05
Q	553,05 VAR	553,04 VAR	0,00
FP	0,94	0,93	1,07

Fonte: Autor.

Com os resultados coletados, é possível perceber que o programa supervisor é bastante preciso ao comparar o resultado com a simulação e com os cálculos, conforme as equações das grandezas.

A Figura 3.34 mostra a página de configurações do sistema supervisor, onde o usuário pode escolher a porta onde o analisador de energia digital está instalado. Como o projeto foi realizado para ser prático no modelo *plug-and-play*, depois de selecionar uma vez qual porta utilizar, o usuário pode apenas conectar o dispositivo na porta USB do computador e iniciar a medição, não necessitando escolher a porta toda vez que abre o programa. A configuração da taxa de transmissão (*boud rate*) é fixa em 115200 bps, sem *bit* de paridade e oito *bits* de dados para 256 caracteres diferentes (ASCII de 8 *bits*).

Figura 3.34 – Janela de configuração do analisador de energia digital.



Fonte: Autor.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste projeto desenvolveu-se um protótipo de analisador de energia digital que servirá de base para o desenvolvimento de uma solução trifásica a ser utilizada em ensaios em transformadores elétricos pelo INRIMT na UFSM. O propósito do equipamento é trazer mais confiabilidade e otimização aos ensaios. O projeto foi separado em diversas etapas, iniciando por conceitos econômicos e legais que justificam a iniciativa do projeto. Também foram revisados conceitos de circuitos elétricos, eletrônica analógica e digital, instrumentação, programação de sistemas embarcados e sistemas supervisórios.

A simulação da instrumentação foi um passo fundamental para definir a compra dos componentes. Passando por dois modelos de PCI, um modelo inicial que serviu para validar a instrumentação digital, mas não havia precisão nas trilhas que pudesse testar o conversor A/D, MCP3911. Então com um segundo modelo de PCI, confeccionada profissionalmente, pode-se testar o conversor A/D e nessa etapa, ficou determinado, após vários testes e tentativas, que o MCP3911 não atenderia as necessidades do projeto. O principal problema foi a incoerência de informação do *datasheet* do componente com relação utilização na prática, já que não se tinha uma real definição da forma do sinal de entrada nos canais do MCP3911.

Desta forma, optou-se por prosseguir com outras etapas projeto, uma vez que refazer os circuitos de instrumentação para um outro modelo de conversor A/D não seria viável no tempo hábil. Assim, seguiu-se com o desenvolvimento do *firmware* do STM32 e do *software* do sistema supervisório. O STM32 simulou os resultados de um ensaio em um transformador, enviando os a tensão e a corrente medidos ao supervisório que calcula e mostra as grandezas e os dados no espectro do tempo e da frequência.

O resultado encontrado nas medições é satisfatório ao observar que os valores estão com um baixo percentual de erro, o que colocaria o instrumento dentro dos padrões. Por mais que não tenha sido possível testar o dispositivo por completo e comparar o sinal de entrada com o sinal mostrado no supervisório, conclui-se que o resultado foi satisfatório ao ponto que o projeto passou por várias etapas.

Este trabalho teve uma contribuição fundamental na formação de Engenheiro de Controle e Automação e poderá contribuir com a formação de outros graduandos no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos e embarcados e com os ensaios em transformadores no INRIMT da UFSM.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade e aprimoração deste trabalho, seguem algumas atualizações a serem realizadas:

- Projetar uma fonte com isolamento galvânica apropriada para os ensaios em transformadores;
- Projetar a instrumentação com um novo modelo de conversor A/D, que atenda às necessidades do projeto.
- Melhorar a funcionalidade do sistema supervisorio, com funções de *zoom* nos gráficos e uma interface gráfica mais amigável;
- Instalar o dispositivo no INRIMT e realizar ensaios em campo, comparando os resultados ao analisador comercial empregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356 - **Transformadores de potência**. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

BRANCO, P. ISO 50001: **Norma mundial para a eficiência energética**. ABB, [s. l.], p. 61–66, 2011.

BRASIL. **Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências**. Brasil, 2001. p. 1.

CHAPTER 2: INTRODUCTION AND CHAPTER OBJECTIVES. Analog Devices, 2017. Disponível em: <<https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/chapter-2>>. Acessado em: 14 de jun de 2022.

ELECTRICITY DOMESTIC CONSUMPTION. **ENERDATA**, 2021. Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>>. Acessado em: 18 de abr. de 2022.

GLOBAL ENERGY REVIEW 2021. **IEA**. 2021. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf>>. Acessado em: 18 de abr. de 2022.

HALL EFFECT SENSOR. **Electronic Tutorials**. 2020. Disponível em: <<https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>>. Acessado em: 14 de jun de 2022.

HERD, Bil. Tearing into delta sigma adc's. **Hackaday**. 2016. Disponível em: <<https://hackaday.com/2016/07/07/tearing-into-delta-sigma-adcs-part-1/>>. Acessado em: 21 de jun de 2022.

HONEYWELL. **Hall Effect Sensing And Application**. 2011. Disponível em: <<http://www.introni.it/df/HONEYWELL%20-%20Hall%20Effect%20Sensing%20and%20Application%201998.pdf>>. Acessado em: 05 de out de 2022.

INMETRO. **PBE: Programa Brasileiro de Etiquetagem**. 2017. Disponível em: <<http://www2.inmetro.gov.br/pbe>>. Acesso em: 18 de abr. de 2022.

LEITE, M. F. **Unidade de condicionamento de sinais para laboratório de ensaios em transformadores de distribuição**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

MARCHESAN A.P.G. **Proposta de sistema supervisorio de aquisição de dados para realização de ensaio de medição de perdas a vazio e corrente de excitação**. 2019. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

MCP3911. **Microchip**, 2012. Disponível em:

<https://br.mouser.com/datasheet/2/268/MCP3911_3_3V_Two_Channel_Analog_Front_End_20002286-2887302.pdf>. Acessado em: 08 de nov de 2021.

MELO, J. R. **Introdução ao estudo do emprego de capacitores cerâmicos em eletrônica de potência**. 2020. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Santa Maria, Florianópolis, SC, 2019.

MIRANDA, R. O. **Contribuição à instalação de um laboratório de ensaios em transformadores de distribuição no Instituto de Redes Inteligentes**. 2019. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

MUSSOI. **Resposta em frequência: filtros passivos**: Filtros passivos. CEFET de Santa Catarina, Gerência Educacional de Eletrônica, Florianópolis, Santa Catarina 2004, 2004. Disponível em: <<https://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Apostilas/filtropassivo.pdf>>Acessado em 21 de jun de 2022.

NEAMEN, D. A. **Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles**. 2012. Disponível em: <<https://www.optima.ufam.edu.br/SemPhys/Downloads/Neamen.pdf>> Acessado em 05 de out de 2022.

PERTENCE, J. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. Av. Jeronimo de Ornelas, 670 Santana, Porto Alegre - RS: Bookman, 2015.

PRECISION INSTRUMENTATION AMPLIFIER, AD8221. Analog Devices, 2011. Disponível em: <https://br.mouser.com/datasheet/2/609/AD8221_EP-2821706.pdf>. Acessado em: 13 de ago de 2020.

SACCO, Francisco. Comunicação SPI – Parte 1. **Embarcados**, 2012. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/spi-parte-1/>>. Acessado em: 20 de jun de 2022.

STM32, **WeAct Black Pill V1.2**, 2021. Disponível em:

<<https://stm32-base.org/boards/STM32F401CCU6-WeAct-Black-Pill-V1.2>>. Acessado em 05 de ago de 2023.

WENDLING, Marcelo. **CI reguladores de tensão**. UNESP. 2009.