

Desenvolvimento de placa de aquisição de sinais trifásicos de tensão e corrente para uso nos laboratórios do Unipam

Development of a Three-Phase Voltage and Current Signal Acquisition Board for Use in UNIPAM Laboratories

MURILO MACHADO DE MATOS
Discente de Engenharia Elétrica (UNIPAM)
murilo2machado@gmail.com

VICTOR HENRIQUE DA CUNHA FARIA
Professor orientador (UNIPAM)
victorhcf@unipam.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma placa de aquisição de sinais trifásicos de tensão e corrente. Utilizando sensores de efeito Hall de alta precisão, como o LA 100-P e o LV 20-P, o sistema inclui circuitos de condicionamento de sinal que garantem compatibilidade com diversos conversores analógico-digitais, abrangendo aplicações acadêmicas e industriais. Durante a construção, técnicas avançadas de filtragem e amplificação foram empregadas, assegurando a fidelidade dos sinais mesmo em ambientes com altos níveis de ruído. Os resultados práticos demonstraram uma precisão elevada, apresentando uma pequena discrepância, resultado do uso de componentes reais com tolerâncias no valor de especificação. Essa solução permite medições precisas de grandezas elétricas em redes trifásicas, proporcionando uma ferramenta robusta e confiável para alunos e pesquisadores. Além de suprir lacunas técnicas, o sistema amplia o alcance de experimentos laboratoriais, promovendo uma experiência educacional mais prática e aprofundada. A proposta destaca-se pela acessibilidade e eficiência, marcando um avanço significativo no uso de tecnologias acessíveis para o monitoramento e controle de sistemas elétricos.

Palavras-chave: sensor de tensão; sensor de corrente; aquisição de sinais.

Abstract: This work presents the development of a three-phase voltage and current signal acquisition board. Using high-precision Hall effect sensors, such as the LA 100-P and LV 20-P, the system includes signal conditioning circuits that ensure compatibility with various analog-to-digital converters, covering both academic and industrial applications. During construction, advanced filtering and amplification techniques were employed, ensuring signal fidelity even in high-noise environments. Practical results demonstrated high accuracy, with only minor discrepancies due to the use of real components with tolerance variations from their nominal values. This solution enables accurate measurement of electrical quantities in three-phase networks, providing a robust and reliable tool for students and researchers. In addition to addressing technical gaps, the system enhances the scope of laboratory experiments, promoting a more hands-on and in-depth educational experience. The proposal stands out for its accessibility and efficiency, representing a significant advancement in the use of affordable technologies for the monitoring and control of electrical systems.

Keywords: voltage sensor; current sensor; signal acquisition.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento dos parâmetros de tensão e corrente elétrica é de suma importância não apenas para os fornecedores, mas também para os consumidores. A medição precisa da tensão e corrente permite detectar e corrigir rapidamente problemas como sobrecargas, curtos-circuitos e flutuações de tensão, garantindo assim a continuidade do serviço. Nas indústrias, conhecer os valores de tensão e corrente permite controlar processos, detectar falhas e anomalias em equipamentos, verificar a eficiência energética, proteger pessoas e equipamentos.

A medição de tensão e corrente pode ser realizada utilizando-se um sistema de aquisição de dados. Esse sistema constitui um procedimento pelo qual um fenômeno físico do mundo real é convertido em sinais elétricos, que posteriormente são mensurados e convertidos em formato digital, a fim de serem processados, analisados e armazenados por um computador (Esteves, 2015). No sistema elétrico de potência (SEP), a aquisição de dados representa uma etapa crucial, desde o processo de geração de energia, transmissão e supervisão até o controle da rede primária e secundária de distribuição. Os sistemas de aquisição de dados podem ser inseridos em pontos importantes do sistema, como em bancos de capacitores, saída de alimentadores, chaves automáticas, cargas importantes etc. (Mamede Filho, 2017; Jardini, 1999).

Em sistemas elétricos de baixa tensão (BT), as medições de tensão e corrente podem ser conduzidas por meio de um osciloscópio, que viabiliza a observação dos sinais de corrente e tensão. Além disso, é possível empregar uma placa de aquisição de dados, que não apenas facilita a visualização, mas também oferece capacidade de armazenamento de dados e controle de processos. A estrutura fundamental de uma placa de aquisição de dados compreende diversos componentes essenciais. Entre eles, destacam-se os sensores e transdutores, cuja função primordial é converter fenômenos físicos do mundo real em sinais elétricos. Ademais, o condicionamento de sinais desempenha um papel crucial, visando filtrar, amplificar, linearizar e isolar os sinais, de modo que possam ser adequadamente utilizados por um hardware de aquisição de dados, como um conversor analógico-digital (Park; Mackay, 2003).

Em diversas pesquisas no ramo da engenharia elétrica, surge a necessidade de medir sinais de tensão e corrente com fins de monitoramento e controle. Nesse sentido, o emprego de osciloscópios para essa tarefa apresenta limitações, sobretudo quando se busca a integração eficaz desses dispositivos nos projetos. Esse entrave decorre, primordialmente, de suas elevadas cifras de investimento e das volumosas dimensões que caracterizam esses instrumentos. Diante dos problemas relacionados ao osciloscópio, muitos pesquisadores e engenheiros optam por desenvolver suas próprias unidades de aquisição de dados, contudo essa opção apresenta inúmeros desafios, demandando significativa quantidade de tempo que poderia ser destinada ao tema principal da pesquisa. Esses esforços, embora necessários em certos cenários, podem comprometer a eficiência e a agilidade na execução de projetos de engenharia elétrica.

Considerando-se a complexidade de criar uma unidade de aquisição de dados para monitoramento de tensão e corrente e a importância de manter a concentração no propósito central do projeto, o objetivo deste trabalho é descrever o desenvolvimento e a construção de uma placa de aquisição de dados. Essas placas são destinadas a realizar

medições precisas das grandezas elétricas trifásicas de tensão e corrente em cada um dos condutores de fase da rede de distribuição de energia. As placas são construídas utilizando o sensor de corrente LA 100-P e o sensor de tensão LV 20-P da marca LEM. O sinal de saída desses sensores é conectado a um circuito de condicionamento de sinal convertendo os níveis de tensão analógica para 0 ~ 3,3V, 0 ~ 5V e -10V ~ 10V, permitindo a leitura de dados por um conversor analógico-digital. A verificação do funcionamento das placas de aquisição de dados é conduzida por meio de um teste prático, verificando o sinal senoidal condicionado por meio de visualização em um osciloscópio, comparando os dados obtidos com os dados simulados por *software*.

A disponibilização das placas de aquisição de sinal de tensão e corrente para os alunos de engenharia elétrica oferecerá uma solução sólida e confiável para suas necessidades de coleta de dados. Isso permitirá que eles progridam em suas pesquisas e projetos com segurança e precisão, sem enfrentar a dificuldade de criar um sistema adicional para completar seus trabalhos.

2 REVISÃO TEÓRICA

A aquisição de dados refere-se ao processo de reunir informações do mundo real. Esses dados são predominantemente numéricos e geralmente são coletados, armazenados e analisados por meio de um computador. O uso de um computador automatiza o processo de aquisição de dados, possibilitando a coleta de mais informações em menos tempo e com menos erros (Du; Li; Guo, 2017; Park; Mackay, 2003).

Por meio de sensores e transdutores, sinais analógicos do mundo real, podem ser processados pelo sistema de aquisição de dados. Ocasionalmente alguns transdutores e sensores produzem sinais que são difíceis ou perigosos de medir diretamente com um dispositivo de aquisição de dados (Esteves, 2015).

Em situações com alto índice de ruídos, alta tensão, sinais de magnitude muito alta ou extremamente baixa, ou quando há necessidade de medir vários sinais simultaneamente, torna-se essencial realizar o condicionamento desses sinais para uma coleta de dados eficaz (Lopes, 2007). O condicionamento dos sinais provenientes dos sensores tem como propósito transformá-los em um formato que seja compatível com outros dispositivos, aprimorando a exatidão e a confiabilidade da grandeza mensurada (Fraden, 2016).

Em geral, todos os dispositivos de interface são projetados para permitir a conexão de sinais de sensores em uma faixa de tensão de 0 a 5 V, que posteriormente será digitalizada por um conversor A/D (Emilio, 2013). Dessa maneira, a grande maioria dos sinais devem ser condicionados por meio de um circuito eletrônico, incluindo principalmente a amplificação e filtragem, além de outras operações que podem ser realizadas no tratamento do sinal (Katdare; Warke; Vaidya, 2020).

As principais funções que um sistema eletrônico de condicionamento de sinais executa, conforme Park e Mackay (2003), são:

I. **filtragem:** em ambientes sujeitos a ruídos, sinais de baixa magnitude podem ser facilmente distorcidos. Para evitar isso, é comum empregar filtros passa-baixa, que atenuam frequências elevadas e preservam a precisão das medições.

II. **amplificação:** depois da filtragem, o sinal precisa ser amplificado para coincidir com a faixa de entrada do conversor analógico-digital (ADC). Instalar o amplificador próximo ao sensor minimiza interferências e melhora a resolução final dos dados.

III. **linearização:** muitos transdutores apresentam comportamento não linear em relação à grandeza física. Para corrigir essas distorções, aplicam-se técnicas de linearização por meio de componentes específicos ou algoritmos de software, garantindo maior exatidão na medição.

IV. **isolação:** em situações onde há risco de sobretensões ou falhas elétricas, o condicionamento de sinal pode isolar eletricamente o sensor do restante do circuito, protegendo tanto o equipamento quanto os operadores.

Segundo Lopes (2007), o sistema de aquisição de dados faz a análise de sinais oriundos de sensores ou transdutores. No contexto dos sistemas de potência, conhecer parâmetros como corrente, tensão e frequência é crucial para compreender seu funcionamento (Weedy, 2012). A confecção de placas de aquisição de corrente e tensão se revela indispensável no monitoramento e controle de sistemas elétricos, por favorecer precisão, segurança e eficiência. Um exemplo prático é apresentado por Neves (2021), Figura 1, que demonstra uma placa com transdutores de tensão e corrente, condicionados para fornecer uma saída de 10 V.

Figura 1: Placa de aquisição de sinal de tensão e corrente



Fonte: Neves, 2021, p. 30.

A medição de tensões consideravelmente elevadas é realizada por meio da redução da magnitude desses valores até níveis de tensão que sejam compatíveis com as capacidades de processamento de microprocessadores, conversores analógico-digitais e sistemas de aquisição (Faria, 2019). Esse processo é realizado com o emprego de dispositivos como transformadores de potencial, divisores de tensão e sensores de efeito Hall (Costa, 1996). A Figura 2 demonstra um transdutor de tensão baseado em efeito Hall.

Figura 2: Transdutor de tensão LV 20-P

Fonte: LEM, 2023.

Existem diferentes modos de medir correntes elétricas, podendo ser utilizados: derivadores de baixa resistência para obter tensões proporcionais, transformadores de corrente (TC's) e sensores de efeito Hall. Entretanto, circuitos derivadores não possuem isolamento galvânica, diferentemente dos transformadores de corrente, podendo danificar os componentes eletrônicos (Almeida, 2009). Os TC's são formados por um conjunto de espiras, que ao percorrer uma corrente alternada no primário, induz uma corrente proporcional no secundário de valor reduzido, podendo ser processada pelas UADC's (Costa, 1996; Faria, 2019).

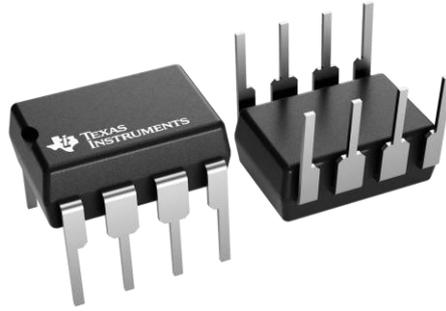
Figura 3: Transdutor de corrente LA 100-P

Fonte: LEM, 2023, *online*.

Almeida (2009) ressalta que sensores de corrente baseados no efeito Hall (Figura 3) podem operar tanto em CA quanto em CC, apresentando alta precisão em diversas faixas de frequência e intensidade. Por isso, são adequados a múltiplas aplicações. Os transdutores de tensão e corrente da LEM, por exemplo, permitem medições de até ± 700 V e ± 150 A, com isolamento galvânica entre primário (potência) e secundário (eletrônico), aumentando a durabilidade dos componentes.

Já o circuito de condicionamento da placa utiliza um CI amplificador operacional, conforme Figura 4, para adequar o nível do sinal, além de filtros passivos RC responsáveis por atenuar ruídos.

Figura 4: Amplificador operacional LM 741



Fonte: Texas Instruments, 2023, *online*.

Circuitos de condicionamento de sinal ajustam a saída de sensores para torná-la compatível com conversores A/D (Abdullah *et al.*, 2018). Nesse sentido, recomenda-se o uso de microcontroladores com A/D integrado, como Arduino, ESP-32 e Raspberry Pi (Scherz; Monk, 2016). Em especial, a placa ESP-32 (Figura 5) apresenta Wi-Fi 802.11, Bluetooth e um conversor A/D SAR de 12 bits com até 18 canais, permitindo a aquisição, o armazenamento e o envio de dados para sistemas de monitoramento remoto (Abdullah *et al.*, 2018).

Figura 5: Placa de desenvolvimento ESP-32



Fonte: Eletrogate, 2023, *online*.

Os sistemas supervisórios coletam informações das placas de aquisição, permitindo armazenar, analisar e processar dados, além de possibilitar o controle de processos (Du; Li; Guo, 2017). Dessa forma, incluir o ESP-32 permite construir um sistema completo de aquisição de dados, fazendo a integração com computadores e sistemas de monitoramento e supervisórios.

3 METODOLOGIA

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para medição de tensões e correntes trifásicos, para uso nos laboratórios de engenharia elétrica do UNIPAM. Para isso, a metodologia empregada seguiu a delimitação do problema e uma estratégia de resolução. Sendo assim, a sistemática a ser utilizada na execução do projeto pode ser dividida nas seguintes etapas:

Etapa 1: realizar uma pesquisa bibliográfica sobre melhores arranjos e topologias para construção do circuito de filtragem e de condicionamento de sinais;

Etapa 2: simular o circuito no *software* Multisim, desenvolvido pela National Instruments, que permite modelar e simular o comportamento de circuitos analógicos e digitais com precisão, facilitando o design e a análise antes da prototipagem.

Etapa 3: teste em protoboard para verificar o sinal de saída dos sensores de tensão e corrente, utilizando uma carga resistiva com fator de potência 1, tensão de 127V e potência de 1800W;

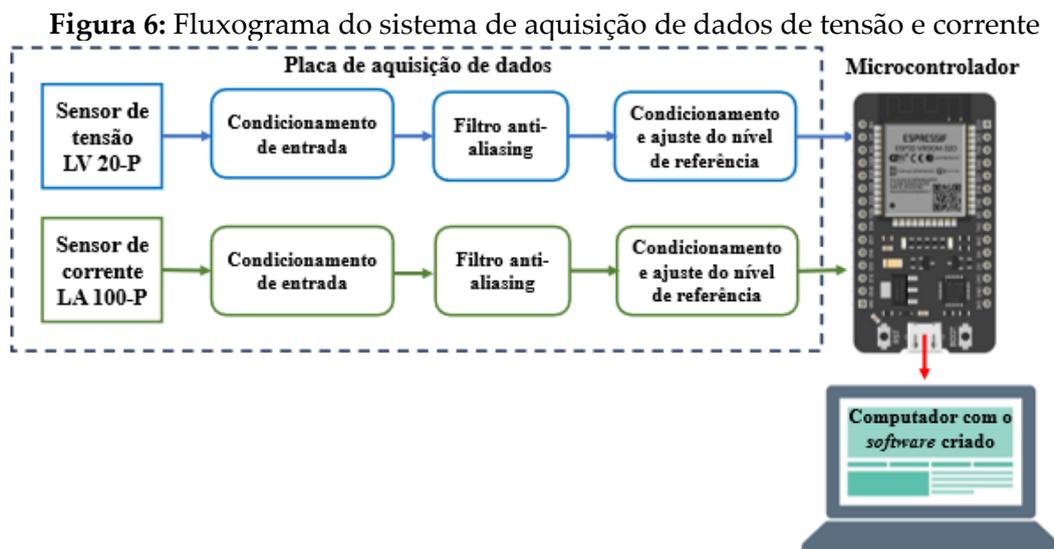
Etapa 4: desenvolver o projeto da placa de circuito impresso (PCI) utilizando o EAGLE, um *software* amplamente reconhecido para design de esquemáticos e layouts de PCBs.

Etapa 5: fabricação da placa de circuito impresso (PCI) que será realizada utilizando uma fresadora CNC da marca Carbide3D. Com base no layout desenvolvido no *software* EAGLE, a máquina cria as trilhas de cobre necessárias para o circuito. Após a usinagem, os componentes serão fixados na placa e soldados com ferro de solda e estanho, garantindo conexões robustas e confiáveis para o funcionamento do projeto.

Etapa 6: verificar o funcionamento da placa de circuito impresso através de um osciloscópio;

Etapa 7: realizar os testes finais, que consistem em medir as saídas dos sensores após a passagem pelos circuitos de filtro e de condicionamento de sinal, comparando os valores obtidos experimentalmente com os valores simulados previamente no *software* Multisim.

Uma representação mais detalhada do funcionamento do sistema de aquisição de dados de tensão e corrente trifásicas, para uma única fase, pode ser visto na Figura 6.



Fonte: os autores, 2023.

O sistema desenvolvido consiste em uma placa de aquisição de dados projetada para medição e processamento de sinais trifásicos de tensão e corrente, destinada a aplicações acadêmicas e laboratoriais, fornecendo uma solução prática para o estudo de

sistemas de potência, eletrônica e instrumentação. Os principais componentes do sistema incluem:

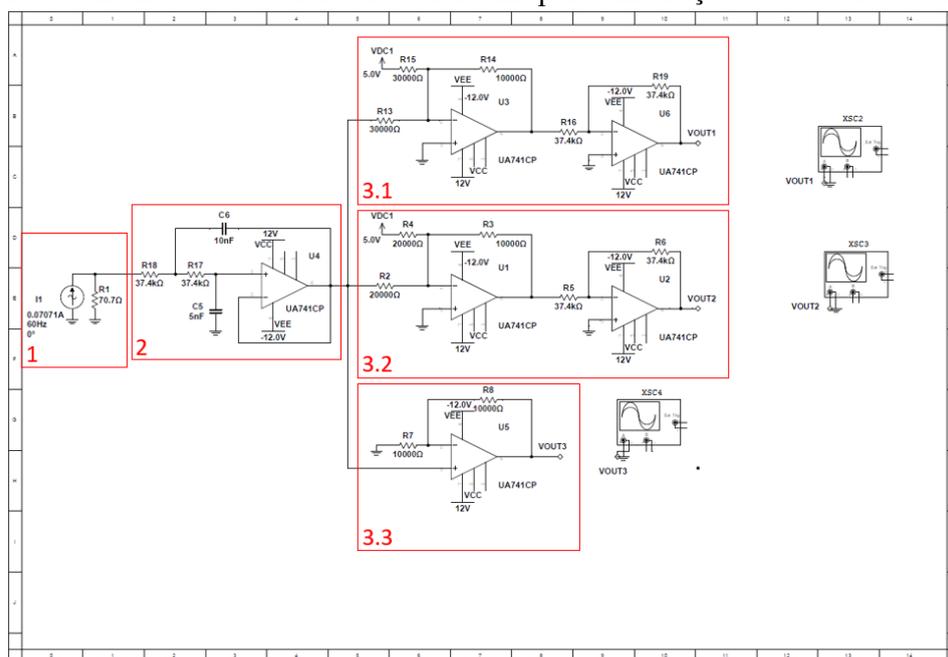
- Sensor de Tensão (LV 20-P): é um transdutor de efeito Hall com relação de transformação 2500:1000, capaz de medir tensões em CA, CC e pulsos, oferecendo alta precisão e isolamento galvânica para proteção contra surtos;
- Sensores de Corrente (LA 100-P): funcionam igualmente em CA, CC e pulsos, possuindo relação de transformação 1:2000. Sua construção assegura boa precisão e isolamento, protegendo o circuito contra descargas ou falhas;
- Filtro Ativo Passa-Baixa: utiliza amplificadores operacionais, resistores e capacitores para atenuar frequências indesejadas, garantindo a integridade das medições e possibilitando a captura de informações relevantes de cada fase;
- Condicionamento de Sinais: agrega ajustes de amplitude e offset, gerando saídas nas faixas de 0–3,3 V, 0–5 V e -10–10 V, ampliando a compatibilidade da placa com diferentes conversores A/D, como ESP32, Arduino e CLP.

4 RESULTADO FINAL

Nos tópicos a seguir, são apresentados os detalhes do desenvolvimento, simulação e validação dos circuitos projetados, incluindo as etapas de escolha e configuração dos sensores, o design de filtros e o condicionamento de sinais. Os circuitos foram projetados para atender aos requisitos específicos de medição de corrente e tensão, garantindo alta precisão e confiabilidade. Foram utilizados softwares especializados, como Multisim e Eagle, para simulação e desenvolvimento do layout da placa de circuito impresso (PCI).

4.1 DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

Foi necessário projetar e simular circuitos específicos para filtrar ruídos e ajustar os níveis de sinal dos sensores de corrente e tensão. Esse cuidado assegura medições mais confiáveis, adequando amplitude e frequência para posterior processamento. O trabalho incluiu a escolha precisa de componentes (resistores, capacitores, amplificadores operacionais e filtros ativos) e a realização de simulações minuciosas no Multisim, permitindo analisar o desempenho em diferentes cenários e otimizar os parâmetros de projeto. Como resultado, desenvolveu-se o circuito ilustrado na Figura 7, que sintetiza as soluções propostas para integridade e confiabilidade dos sinais.

Figura 7: Circuito desenvolvido no Multisim para simulação do sensor de corrente

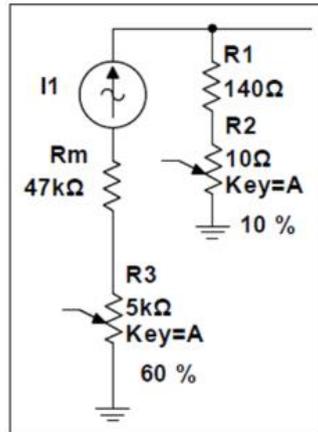
Fonte: os autores, 2024.

A explicação foi organizada em seções para detalhar o papel de cada componente do sistema. O circuito 1 (Figura 7) corresponde às saídas dos sensores de corrente e tensão, enquanto o circuito 2 aborda a filtragem. Os circuitos 3.1, 3.2 e 3.3 tratam do condicionamento para faixas de 0–3,3 V, 0–5 V e -10–10 V, respectivamente. A estrutura padronizada desses estágios simplifica o design e evita redundâncias, assegurando clareza na apresentação das etapas (4.1.1 a 4.1.4) referentes à escolha, à implementação e à integração de cada elemento.

4.1.1 Sensor de tensão

O sensor de tensão LV 20-P (LEM) mede até 500 V RMS, com relação de transformação 2500:1000. Como a corrente máxima no primário é 10 mA, emprega-se um resistor de 5 W e 50 kΩ (47 kΩ + trimpot) para limitar a corrente. A saída do sensor converte essa corrente em tensão por meio de um resistor de 140 Ω (mais um trimpot), resultando em valores entre -5 V e +5 V para 500 V RMS. O projeto recorre a resistores de precisão (1%) para obter medições mais confiáveis, conforme ilustra o esquema da Figura 8.

Figura 8: Esquemático de entrada e saída do sensor de tensão LV 20-P desenvolvido no Multisim

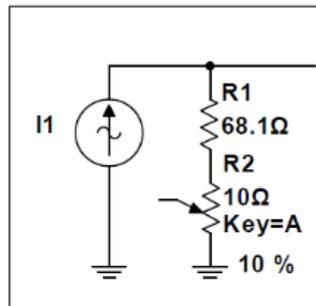


Fonte: os autores, 2024.

4.1.2 Sensor de corrente

O transdutor de corrente LA 100-P (LEM) tem relação de transformação 1:2000 e mede até 100 A RMS. Para converter a corrente secundária em tensão, utiliza-se um resistor de cerca de 70,7 Ω (definido em 68,1 Ω mais um trimpot), de modo que a saída oscile de -5 V a +5 V no limite de 100 A. Resistores de precisão (1%) garantem maior confiabilidade nos valores medidos, e a construção do circuito é demonstrada na Figura 9.

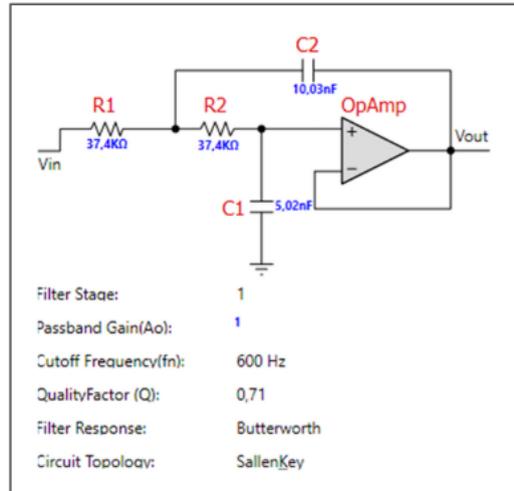
Figura 9: Esquemático de saída sensor de corrente LA 100-P desenvolvido no Multisim



Fonte: os autores, 2024.

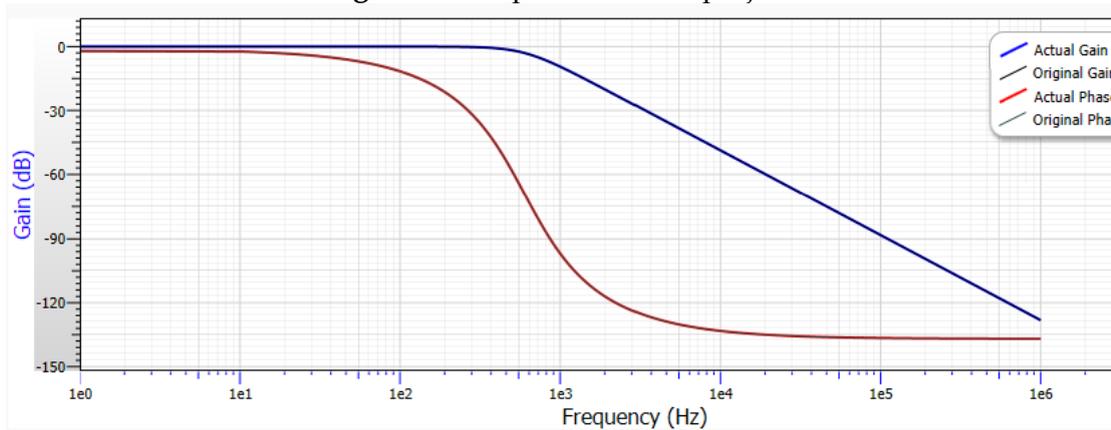
4.1.3 Filtro ativo passa-baixa

O filtro passa-baixa proposto para até 600 Hz (harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem) faz uso da topologia Sallen-Key, escolhida pela simplicidade de implementação, estabilidade e flexibilidade. A resposta Butterworth, caracterizada por atenuação uniforme e máxima planicidade na banda passante, foi adotada para preservar a forma de onda. Na prática, o software FilterPro (Texas Instruments) auxiliou na definição dos componentes e na simulação do desempenho, culminando no circuito ilustrado na Figura 10 (adaptado de FilterPro, 2024).

Figura 10: Circuito filtro passa-baixa, frequência de corte de 600 Hz

Fonte: adaptado de FilterPro, 2024.

A resposta do filtro é apresentada na Figura 11, em um gráfico que relaciona o ganho (dB) e Frequência (Hz).

Figura 11: Resposta do filtro projetado

Fonte: adaptado de FilterPro, 2024.

A Figura 11 ilustra o comportamento do filtro ativo, destacando a atenuação gradual que ocorre quando a frequência ultrapassa o valor de corte projetado em 600 Hz. Esse resultado evidencia a eficácia do filtro em reduzir componentes de alta frequência, preservando a integridade do sinal na faixa de interesse, porém apresentando uma defasagem da fase conforme o sinal se aproxima da frequência de corte.

4.1.4 Condicionamento de sinais

Para garantir compatibilidade com diversos conversores A/D, elaboraram-se quatro faixas de saída para cada sensor: 0 a 3,3 V, 0 a 5 V, -10 a 10 V e a saída bruta do sensor. Assim, atende-se tanto a microcontroladores que operam em níveis de 3,3 V e 5 V quanto a sistemas que demandam sinais bipolares. Cada circuito de condicionamento foi

exaustivamente simulado no Multisim, aplicando-se amplificadores operacionais em configurações somadora ou não inversora, o que possibilitou a inserção de um offset de 5 V para deslocar o sinal senoidal à faixa pretendida.

A validação realizada no *software* Multisim, conforme Figura 12, demonstrou a eficácia dos circuitos projetados, confirmando sua precisão e funcionalidade para o propósito desejado. Assim, a abordagem adotada garante a integridade dos sinais processados e sua adequação para as aplicações pretendidas.

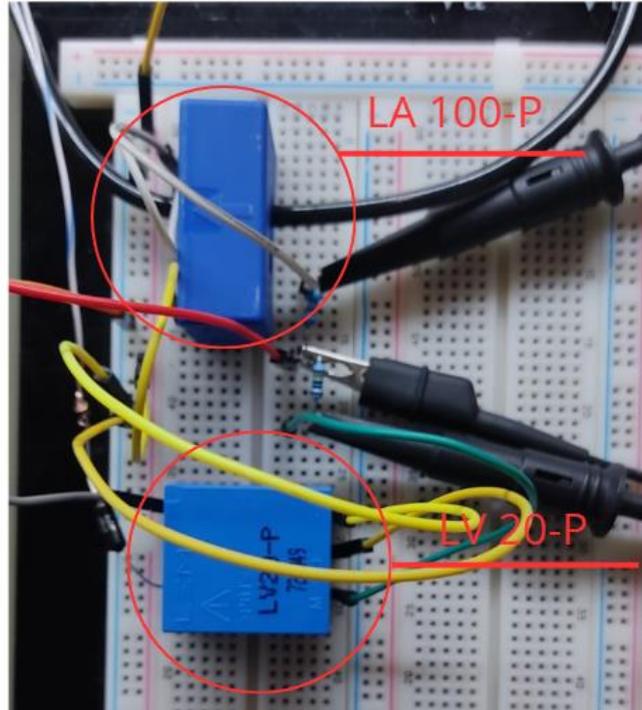
Figura 12: Saídas condicionadas simuladas no *software* Multisim



Fonte: adaptado de Multisim, 2024.

4.2 MONTAGEM EM PROTOBOARD E VALIDAÇÃO

O circuito foi verificado em protoboard com uma carga resistiva de 127 V e 13,27 A, utilizando o sensor de corrente LA 100-P e o sensor de tensão LV 20-P (Figura 13). Foram aplicados resistores de 68,3 Ω (corrente), 140 Ω (tensão) e 47,6 k Ω (R_m).

Figura 13: Circuito de teste dos sensores LA 100-P (corrente) e LV 20-P (tensão)

Fonte: os autores, 2024.

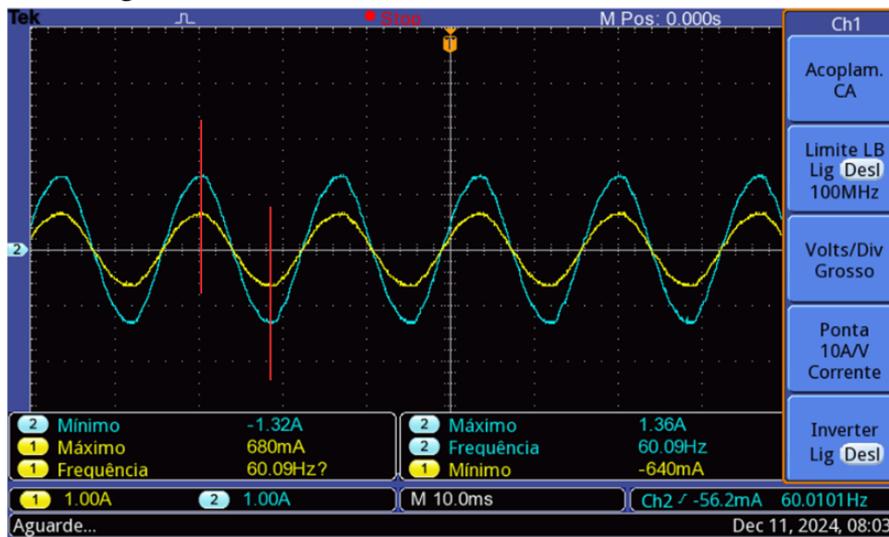
O valor dos resistores utilizados para o teste da placa foram $68,3 \Omega$ para o sensor de corrente, 140Ω para o sensor de tensão e 47600Ω para o resistor R_m na entrada do sensor de tensão. Por meio de (1) e (2), são demonstrados os valores esperados na saída do osciloscópio:

$$V_o = \frac{N_p}{N_s} \times I_{in} \times \sqrt{2} \times R_1 = \frac{1}{2000} \times 13,27 \times \sqrt{2} \times 68,3 = \pm 640 \text{ mV} \# \quad (1)$$

$$V_o = \frac{N_p}{N_s} \times \frac{V_{in}}{R_m} \times \sqrt{2} \times R_1 = \frac{2500}{1000} \times \frac{127}{47600} \times \sqrt{2} \times 140 = \pm 1,32 \text{ V} \# \quad (2)$$

Os valores esperados, obtidos pelas Equações (1) e (2), mostraram boa concordância com as medições experimentais (Figura 14), confirmando a linearidade e a confiabilidade dos sensores, bem como a coerência entre as formas de onda de tensão e corrente em um circuito puramente resistivo. Esses testes práticos possibilitaram pequenos ajustes e validaram o desempenho dos sensores para as aplicações pretendidas.

Figura 14: Sinal de saída do sensor de corrente LA 100-P

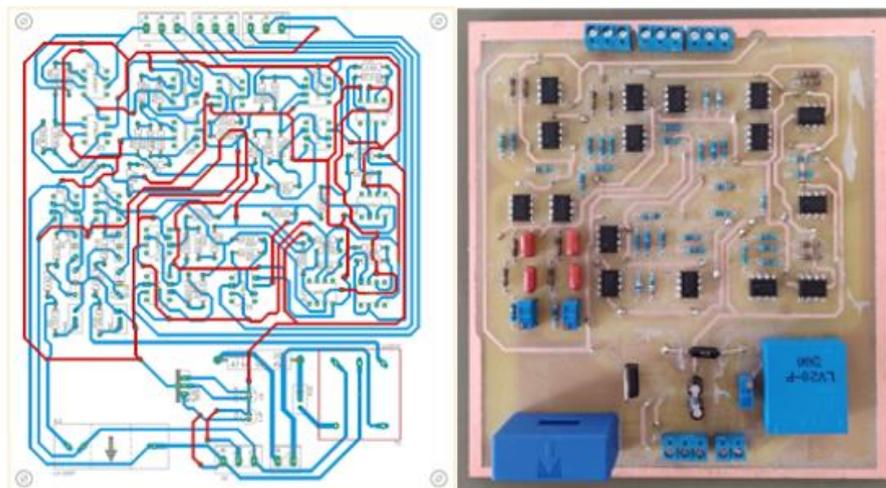


Fonte: os autores, 2024.

4.3 DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

O esquema e o layout da placa foram desenvolvidos no Eagle, partindo de um circuito previamente validado no Multisim. O layout, conforme Figura 15, exigiu cobre em ambas as faces, agrupando os componentes na face superior. A interconexão com a face inferior foi feita aproveitando os próprios fios dos terminais dos resistores como vias, otimizando recursos e garantindo boa condutividade. Os detalhes finais podem ser consultados nos apêndices (A, B e C), com toda a documentação de conexões e posicionamento.

Figura 15: Layout da placa de circuito impresso e placa finalizada

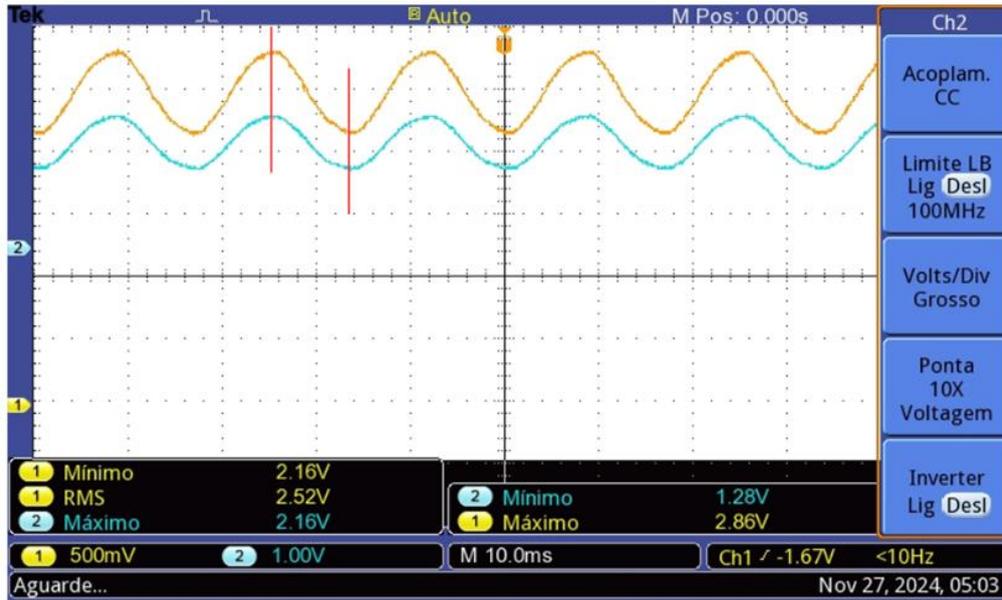


Fonte: os autores, 2024.

4.4 VALIDAÇÃO DA PLACA

Os testes utilizaram uma churrasqueira elétrica de 127 V e 12,8 A, possibilitando avaliar o comportamento do circuito em condições próximas aos reais. Os sensores LA 100-P e LV 20-P (efeito Hall) forneceram sinais adequados nos três modos de saída (0-3,3 V, 0-5 V e -10-10 V). O osciloscópio, destacado na Figura 16, confirmou ondas senoidais com leve offset DC e ausência de defasagem entre tensão e corrente, demonstrando consistência e alinhamento ao projeto. Todas as saídas apresentaram o desempenho previsto, validando a funcionalidade e precisão do sistema.

Figura 16: Sinal de corrente (amarelo) e sinal de tensão (azul) vistos pelo osciloscópio



Fonte: os autores, 2024.

4.5 COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÃO E DADOS COLETADOS

Os valores de saída de cada sensor foram obtidos por simulações no Multisim e validados com cálculos teóricos (equações 1, 2 e 3), conforme destacado na Tabela 1. Cada saída do circuito de condicionamento foi testada individualmente em um circuito operando com 127 V e 12,8 A, e os resultados experimentais foram comparados com os simulados, evidenciando as discrepâncias percentuais apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Valores obtidos pela simulação, experimento e comparativo percentual

LA 100-P	0~3.3V	0~5V	10~10V	LV 20-P	0~3.3V	0~5V	10~10V
Mín (V) Simulação	1,880	2,820	1,280	Mín (V) Simulação	2,090	3,135	2,540
Máx (V) Simulação	1,453	2,180	-1,280	Máx (V) Simulação	1,243	1,865	-2,540
Mín (V) Experimental	1,900	2,860	1,360	Mín (V) Experimental	2,080	3,160	2,480

DESENVOLVIMENTO DE PLACA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS TRIFÁSICOS DE TENSÃO E CORRENTE
PARA USO NOS LABORATÓRIOS DO UNIPAM

Máx (V)				Máx (V)			
Experimental	1,420	2,160	-1,360	Experimental	1,200	1,840	-2,480
Mín (%)	1,07 %			Mín (%)			
Comparativo		1,42%	6,26%	Comparativo	-0,48%	0,80%	-2,36%
Máx (%)	-2,30%			Máx (%)			
Comparativo		-0,92%	-6,26%	Comparativo	-3,49%	-1,34%	-2,36%

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Os resultados demonstram que, na maioria dos casos, as diferenças entre os valores simulados e medidos permaneceram dentro de uma margem aceitável, validando a precisão do circuito de condicionamento e sua capacidade de reproduzir os resultados esperados em condições reais de operação. No entanto, para o circuito de condicionamento do sensor de corrente, especificamente na saída configurada para -10 V a 10 V, foi observada uma variação de 6,26% em relação aos valores simulados.

Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que, nas simulações, os componentes são considerados ideais, enquanto no circuito físico, as características reais dos componentes impactam diretamente no desempenho. Por exemplo, os resistores utilizados na montagem da placa possuem uma tolerância nominal de 1%, o que já contribui para pequenas divergências nos resultados. Durante a análise prática, foi identificado que alguns resistores, mesmo especificados com tolerância de 1%, apresentaram margens de erro variando entre 3%, 4% e até 5%. Essa discrepância maior em alguns componentes explica, em parte, a variação observada na saída de -10 V a 10 V do sensor de corrente.

Embora essa variação seja relativamente pequena, ela destaca a importância de considerar as características reais dos componentes durante o projeto e a montagem, além de reforçar a necessidade de medições adicionais para ajustar e otimizar o desempenho do circuito em aplicações práticas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A criação de um sistema para capturar sinais de tensão e corrente em três fases com focos em acessibilidade e precisão mostra-se uma solução original e eficiente para os desafios encontrados em laboratórios acadêmicos e ambientes industriais. O projeto obteve resultados consistentes tanto em simulações quanto em testes práticos e se destacou pela inclusão de sensores de efeito Hall, circuitos de condicionamento de sinais e filtros ativos que asseguram medidas confiáveis.

Os resultados práticos confirmaram uma consistência com os números previstos na simulação e mostraram uma discrepância máxima de 6,26%, decorrente das variações dos materiais empregados, que não ideais assim como são em um *software* de simulação. Tais resultados comprovam o funcionamento da placa em situações do mundo real, tornando-a uma ferramenta essencial para o ensino de engenharia elétrica e para pesquisas aplicáveis.

Portanto, o sistema proposto não só atende às necessidades específicas de medição e aquisição de dados trifásicos, mas também marca um avanço significativo na otimização dos processos laboratoriais. Isso serve como base para futuras

implementações e melhorias, tanto no ambiente acadêmico quanto no industrial, promovendo a progressão em projetos que requerem medições confiáveis e adaptação tecnológica. Desse modo, este estudo contribui para fortalecer a prática experimental e preparar engenheiros capazes de enfrentar os desafios contemporâneos da engenharia elétrica.

Com base no desenvolvimento apresentado neste trabalho, surgem diversas oportunidades para a expansão e o aprimoramento do sistema. Entre as possibilidades, destacam-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- propor estudos para desenvolver a integração da placa de aquisição de sinais trifásicos com sistemas supervisórios baseados em Internet das Coisas (IoT), possibilitando a transmissão de dados em tempo real para plataformas de monitoramento remoto.
- realizar estudos para redução do tamanho físico da placa e estudar uma forma de implementar um filtro ativo que apresente um resultado melhor para a defasagem próximo da frequência de corte. Uma maneira de reduzir o tamanho da placa seria utilizando divisores de tensão após somar o sinal de saída com *offset* DC de 5V.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. H., *et al.* **Development of ESP32-based Wi-Fi Electronic Nose System for Monitoring LPG Leakage at Gas Cylinder Refurbish Plant.** 2018. International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA), Kuching, Malaysia, 2018, p. 1-5.

ALMEIDA, A. M. A. **Estudo e Implementação de sensores de corrente.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

BOYLESTAD, R., NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos,** 11. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 2013.

COSTA, M. R. **Medição de tensões e correntes - classe 15 kv - por sistemas eletro-ópticos e magneto-ópticos.** 1996. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 1996.

DU, J.; LI, W.; GUO, J. Design of LabVIEW Based General Data Acquisition System. **IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC),** Chengdu, China, 2017, pp. 1235-1239.

ELETROGATE. **Wireless e IoT – ESP32.** Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-wifi-esp32s-bluetooth-38-pinos>.

EMILIO, M. D. P. **Data Acquisition Systems: from fundamentals to applied design.** New York: Ed. Springer, 2013.

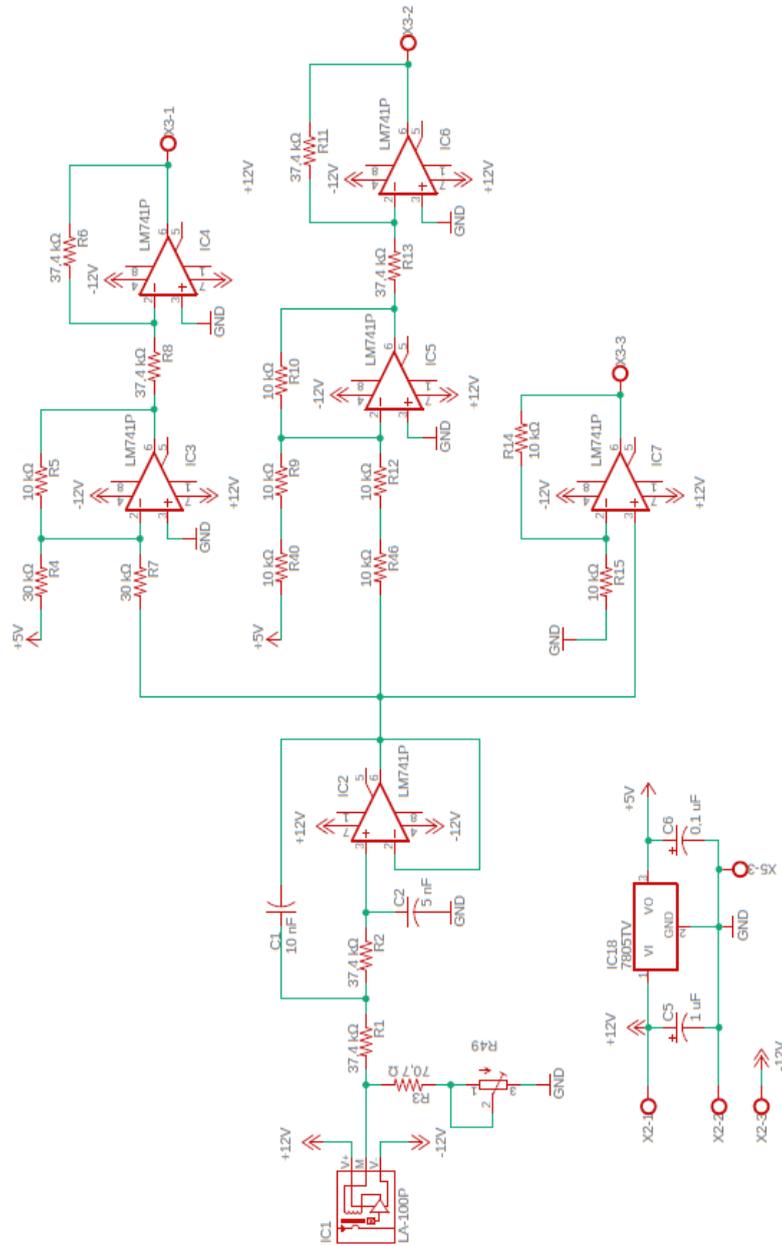
- ESTEVES, F. J. A. M. **Development and Implementation of a Data Acquisition System for Teaching Purposes**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade de Lisboa, 2015.
- FARIA, V. H. C. **Sistema automatizado de ensaio de transformadores aplicando o labview**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Centro Universitário de Patos de Minas, Patos de Minas, 2019.
- MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.
- MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors: physics, designs, and applications**. 5. ed. New York: Ed. Springer, 2016.
- IEC. **IEC 61010-1: Safety Requirements for Electrical Equipment for Measurement, Control, and Laboratory Use - Part 1: General Requirements**. International Electrotechnical Commission, 2010.
- JARDINI, J. A. **Sistemas elétricos de potência: automação**. São Paulo: EPUSP, 1999. v. 100.
- KATDARE, H.; WARKE, M.; VAIDYA, P. **Design and Construction of Low Cost High-Performance Transducer Signal Processing and Data Acquisition System**. 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)(48184), Tirunelveli, India, 2020, pp. 48-52.
- LEM. **Transdutores de tensão – Linha industrial**. Disponível em: <https://www.amds4.com.br/produto/477/1/LEM-LV-20-P>.
- LOPES, V. J. S **Instrumentação virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica**. 2007. 108f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **NI Multisim** [Software]. Austin, TX, EUA, 2024.
- NEVES, B. L. **Instrumentação virtual aplicada ao monitoramento de máquinas elétricas rotativas**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
- PARK, J.; MACKAY, S. **Practical data acquisition for instrumentation and control systems**. Burlington: Ed. Elsevier, 2003.

SCHERZ, P.; MONK, S. **Practical Eletronics for Inventors**. 4. ed. New York: Ed. McGraw-Hill, 2016.

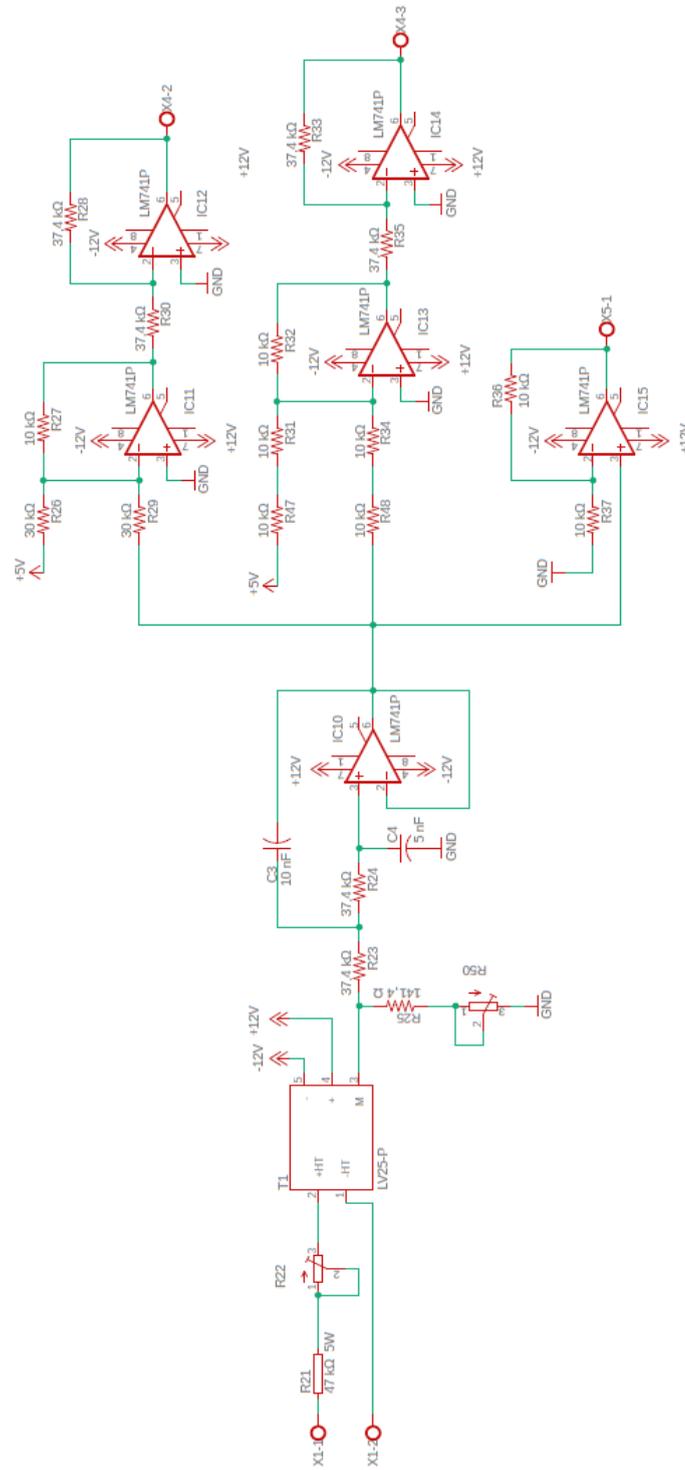
TEXAS INSTRUMENTS. **Operational Amplifiers (op amps)**. Disponível em: <https://www.ti.com/product/LM741>.

WEEDY, Brian M. *et al.* **Electric Power Systems**. United Kingdom. Ed. Wiley, 2012.

APÊNDICE A – CIRCUITO SENSOR DE CORRENTE



APÊNDICE B – CIRCUITO SENSOR DE TENSÃO



APÊNDICE C – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

