



INSTITUTO FEDERAL

Rio Grande do Sul
Campus Restinga



Tecnologia em
**ELETRÔNICA
INDUSTRIAL**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO RIO GRANDE DO SUL
CAMPUS RESTINGA**

DIRCEU PEREIRA JUNIOR

**CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE TENSÕES E CORRENTES PARA
MEDIÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS EMBARCADOS**

**Porto Alegre
2024**

DIRCEU PEREIRA JUNIOR

**CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE TENSÕES E CORRENTES PARA
MEDIÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS EMBARCADOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Tecnólogo em Eletrônica Industrial.
Orientador: Prof. Matheus Perin

**Porto Alegre
2024**

CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE TENSÕES E CORRENTES PARA MEDIÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS EMBARCADOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Tecnólogo em Eletrônica Industrial.
Orientador: Prof. Matheus Perin

Aprovado em ____, _____

Orientador - Professor Matheus Perin – IFRS – Campus Restinga

Membro da Banca – Professor Rodrigo Wolff Porto – IFRS – Campus Restinga

Membro da Banca – Professor Alexsandro Bonatto – IFRS – Campus Restinga

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Júlio Xandro Heck

Pró-Reitor de Ensino: Prof. Fábio Azambuja Marçal

Diretor-geral do *Campus* Restinga: Prof. Rudinei Müller

Coordenador do CST em Eletrônica Industrial: Prof. Matheus Perin

Bibliotecária-chefe do *Campus* Restinga: Paula Porto Pedone

Dedico este trabalho ao meu falecido pai Dirceu Pereira, que me tornou o homem que eu sou. Também a minha mãe Dra. Sandra M Almeida Teles que sempre se dispôs em toda minha vida estando presente em todos os momentos mais importantes incluindo este artigo e a minha família que sempre apoiaram os estudos.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e dedicação de muitas pessoas e a instituição. Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Restinga, um lugar que não apenas oferece ensino de qualidade, mas também proporciona um ambiente acolhedor e inspirador para o desenvolvimento acadêmico e pessoal de seus estudantes. Aos professores e colaboradores do campus, que diariamente se esforçam para fornecer a melhor educação possível, meu sincero muito obrigado.

Agradeço aos meus colegas de curso, com quem tive a honra de compartilhar experiências, desafios e vitórias ao longo dessa jornada. Os projetos e trabalhos realizados em conjunto não só enriqueceram meu aprendizado, mas também fortaleceram laços de amizade e cooperação que levarei para a vida toda.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Matheus Perin, por sua orientação precisa, paciência e incentivo durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e dedicação foram fundamentais para a conclusão deste projeto.

Por fim, não poderia deixar de agradecer à minha mãe, Sandra Maria Almeida Teles, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor, apoio incondicional e motivação em todos os momentos da minha vida. Sua presença e dedicação foram essenciais para que eu alcançasse mais esta conquista.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um circuito para condicionamento de grandezas elétricas, visando a medição precisa de tensões e correntes em sistemas elétricos. O circuito projetado adapta a tensão de fase de até 220 volts eficazes para um sinal compatível com os conversores A/D de microcontroladores, garantindo a integridade dos dados adquiridos e a segurança dos dispositivos. Além disso, a corrente de fase é convertida em um sinal de tensão proporcional, adequado para leitura direta pelos conversores A/D.

Os resultados experimentais confirmaram que o circuito desenvolvido é capaz de ajustar adequadamente as tensões e correntes para os níveis operacionais esperados, garantindo medições precisas. O uso do amplificador isolador AMC1200 foi essencial para garantir a isolamento galvânica e o condicionamento dos sinais. A solução proposta demonstrou-se eficaz, robusta e de baixo custo, sendo aplicável em sistemas de medição e controle industrial.

Palavras chave: medição de tensão elétrica. Medição de corrente elétrica. Amplificador isolador.

Abstract

This work presents the development of a circuit for conditioning electrical quantities, aiming at the precise measurement of voltages and currents in electrical systems. The designed circuit adapts phase voltages up to 220 volts RMS to a signal compatible with the A/D converters of microcontrollers, ensuring data integrity and device safety. Additionally, the phase current is converted to a proportional voltage signal suitable for direct acquisition by the A/D converters. The experimental results confirmed that the developed circuit is capable of appropriately adjusting the voltages and currents to the expected operational levels, ensuring accurate measurements. The use of the AMC1200 isolator amplifier was crucial in providing galvanic isolation and signal conditioning. The proposed solution proved to be effective, robust, and low-cost, making it suitable for measurement and industrial control systems.

Keywords: *voltage measurement. Current measurement. Isolating amplifier.*

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 METODOLOGIA..... | 12 |
| 2.1. Condicionamento das Tensões Utilizando Divisores de Tensão | 12 |
| 2.2. Condicionamento das Correntes Utilizando um Circuito com Resistor Shunt..... | 15 |
| 3 DESENVOLVIMENTO..... | 16 |
| 3.1 Amplificador isolador | 16 |
| 3.2 Teste dos circuitos projetados | 17 |
| 3.3 Projeto da placa de circuito impresso | 20 |
| 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 22 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 28 |
| 6 REFERÊNCIAS | 30 |

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no mundo vem a cada ano aumentando, dada a demanda crescente das atividades industriais. Portanto, é crucial considerar a relevância da eficiência energética dos dispositivos e equipamentos eletroeletrônicos para preservação e uso eficiente dos recursos naturais. Os motores elétricos são responsáveis pela maior parcela da demanda global por energia elétrica (AIE, 2024). Desta forma, medidas eficazes para monitoramento e controle do consumo de energia elétrica de motores são importantes para avaliar o desempenho e eficiência energética das atividades produtivas

“A eficiência energética é essencial para reduzir o consumo de energia nas indústrias brasileiras e minimizar o impacto ambiental. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) as indústrias brasileiras utilizam 30% de energia elétrica e respondem por quase 40% da eletricidade consumida no Brasil.

Equipamentos como bombas, motores, compressores, refrigeradores, sistemas de iluminação e ar-condicionado dos ambientes, juntos são responsáveis pela grande demanda de energia e na eficiência geral do sistema elétrico das indústrias. Diante desse cenário, é importante avaliar e implementar medidas para otimizar seu desempenho e reduzir o consumo de energia.” (Moroz Assessoria, 2024)¹

Além disso, é crucial destacar a importância de medir a potência de cargas industriais com o propósito de visar o controle da eficiência energética. Nas indústrias, onde o consumo de energia elétrica é substancial, a medição precisa da potência das cargas é essencial para identificar oportunidades de economia de energia e otimização do uso dos recursos elétricos. Ao monitorar e controlar a potência das cargas, as empresas podem reduzir custos operacionais, minimizar desperdícios de energia e contribuir para a preservação do meio ambiente.

Além da análise da eficiência dos motores elétricos, outro parâmetro importante para o uso racional da energia elétrica é o fator de potência, cuja definição traz o quanto de potência elétrica efetivamente se converte em energia mecânica e em calor.

Segundo EQUIPE NEPIN (2024) o fator de potência pode ser compreendido como a proporção entre a potência ativa e a potência aparente. O fator de potência não deve ser confundido com a eficiência de um motor elétrico. Um baixo fator de potência, por exemplo, pode indicar que do total de energia elétrica direcionada ao motor, uma pequena parcela é

¹ Segundo a Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), os motores elétricos são responsáveis pelo consumo de 68% da energia elétrica das fábricas

convertida em energia mecânica e demais perdas. A outra parcela de energia elétrica é devolvida à fonte de energia, resultando em maior consumo na instalação. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece regulamentações para manter o fator de potência elevado, visando à redução do consumo de energia e à otimização do uso dos recursos elétricos. De acordo com a Resolução nº 456 da ANEEL estabelece-se o valor de 0,92 para o fator de potência no cálculo das perdas do Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT) (ANEEL, 2021, pg. 3). Portanto, a medição do fator de potência é essencial para otimizar o uso da energia elétrica, reduzir custos e melhorar a eficiência do sistema elétrico como um todo. Diante dos desafios apresentados pelos altos valores de consumo e pela importância do fator de potência, é fundamental destacar a importância da eficiência energética. A medição do consumo de energia e do fator de potência constitui o primeiro passo para identificar e reduzir as perdas, contribuindo assim para a sustentabilidade e economia de recursos energéticos.

Atualmente, dispositivos de medição industrial são majoritariamente constituídos por sistemas eletrônicos digitais que trabalham com faixas de tensão da ordem de 5 volts ou menos. Assim, antes da etapa de aquisição digital das grandezas elétricas que se deseja analisar, é necessário realizar o condicionamento destas grandezas para sinais com amplitude de tensão compatível. No caso da medição de tensão, uma alternativa simples e de baixo custo, porém eficaz, é o uso de divisores de tensão (SADIKU, 2013). Outra opção seria o uso de transformadores, mas a desvantagem destes dispositivos é o tamanho e custo mais elevados. Para a medição de corrente elétrica existem diversas alternativas, com destaque para transformadores de corrente (ELETROSTUTORIALS, 2024), sensores de efeito hall (BALBINOT, 2019) e resistores *shunt* (BALBINOT, 2019). A última opção se destaca pela simplicidade e menor custo envolvido.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma placa para isolamento e condicionamento de tensões e correntes elétricas visando a aquisição de suas formas de onda através de dispositivos eletrônicos tais como microcontroladores, placas de aquisição de dados, Dispositivos Lógicos Programáveis (FPGAs), *data loggers* e sistemas embarcados em geral. Dada a faixa de tensões com as quais estes dispositivos trabalham, é necessário converter as tensões e correntes que se deseja medir para sinais de tensão com amplitude adequada e proporcionais às grandezas medidas. Adicionalmente, é também desejável proteger os dispositivos de aquisição de dados através de uma etapa de isolamento elétrica entre os sinais de entrada e os sinais de saída.

Potenciais aplicações da placa de condicionamento proposta incluem analisadores de energia elétrica, medidores de fator de potência, wattímetros e sistemas de caracterização e estimação de parâmetros de máquinas elétricas, entre outros.

2 METODOLOGIA

Propôs-se o desenvolvimento do circuito de condicionamento através das seguintes etapas:

1. pesquisa e seleção de um amplificador isolador para garantir isolamento galvânica entre as grandezas de entrada e os sinais de saída do circuito, visando a proteção do sistema de aquisição de sinais;

2. cálculo de um divisor de tensão para diminuição e adequação do valor da tensão de fase a ser medida para valores compatíveis com os limites de operação dos conversores A/D de microcontroladores. Como base, utilizou-se a faixa de operação de 3,3 volts.

3. cálculo de um resistor *shunt* para obtenção de um valor de tensão proporcional à corrente de fase que se deseja medir, utilizando como base um sistema que opera a 3,3 volts;

4. desenvolvimento de um circuito eletrônico baseado em amplificadores isoladores para que os sinais de tensão e corrente das duas etapas anteriores sejam eletricamente isolados das grandezas de entrada e também não possuam valores negativos e possam ser lidos pelo conversor A/D do dispositivo de medição.

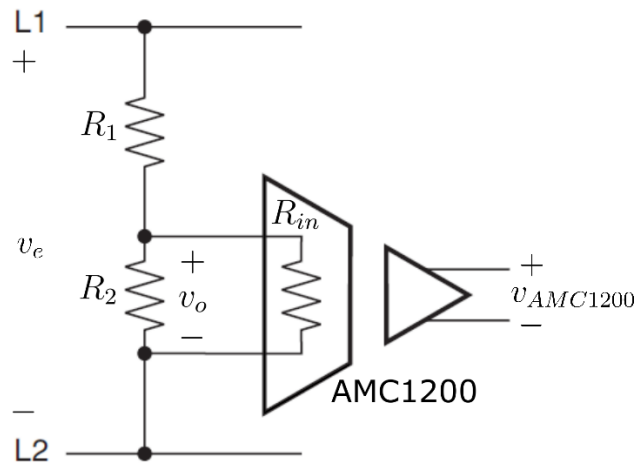
5. simulação do circuito desenvolvido para verificação do seu funcionamento e possíveis ajustes;

6. desenho e fabricação de uma placa de circuito impresso que implemente o circuito desenvolvido.

2.1. Condicionamento das Tensões Utilizando Divisores de Tensão

O segundo passo envolve o condicionamento das tensões por meio de divisores de tensão, que são circuitos simples compostos por resistores. Esses divisores permitem ajustar a amplitude da tensão de entrada para níveis compatíveis com o sistema de aquisição de dados. Este processo é crucial para garantir que as tensões medidas estejam dentro da faixa operacional dos dispositivos de medição e processamento, prevenindo saturações ou danos aos componentes.

Figura 1- Circuito para medição de tensão.



Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2012).

Conforme ilustrado na Figura 1, o circuito de medição de tensão foi projetado a partir de um divisor de tensão para assegurar a compatibilidade com o sistema de aquisição de dados. Considerando que R_{eq} é a resistência equivalente entre R_2 e a resistência interna do AMC1200, R_{in} , a tensão de saída do divisor de tensão é dada por:

$$v_o = v_e \cdot \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_1}. \quad (1)$$

Na expressão anterior, v_o representa a tensão de saída e v_e é a tensão de entrada do circuito. Esta expressão pode ser reescrita conforme segue, de forma a deixar R_{eq} em evidência.

$$R_{eq} = v_o \cdot \frac{R_1}{v_e - v_o}. \quad (2)$$

Conforme explicado, a tensão de entrada do AMC1200 pode excursionar entre $\pm 250 \text{ mV}$. Assim, a tensão de entrada de 220V eficazes deve ser reduzida para este limite através da escolha de R_{eq} . Fixando R_1 em $1 \text{ M}\Omega$ e assumindo que o valor máximo admitido para v_e é 320V, a partir da equação (2) tem-se que:

$$R_{eq} = 781,86 \Omega. \quad (3)$$

Considerando agora que

$$R_{eq} = \frac{R_2 \cdot R_{in}}{R_2 + R_{in}}, \quad (4)$$

o valor da resistência do resistor R_2 pode ser obtida de:

$$R_2 = \frac{R_{in} - R_{eq}}{R_{in} \cdot R_{eq}}. \quad (5)$$

Substituindo os valores de R_{eq} e R_{in} na equação (5), obtém-se

$$R_2 = 781,86 \Omega. \quad (6)$$

Considerando os valores comerciais de resistores disponíveis, definiu-se $R_2 = 750\Omega$. Desta forma, o valor final de R_{eq} e a faixa de excursão de v_o para uma entrada de $\pm 320V$ são:

$$R_{eq} = 730,44 \Omega \quad (7)$$

$$v_o = \pm 233,57 mV. \quad (8)$$

Da equação (8) é possível constatar que a faixa de operação do AMC1200 de $\pm 250 mV$ é respeitada com os valores projetados para R_1 e R_2 .

As potências dissipadas pelos resistores do divisor de tensão podem ser calculadas a partir do cálculo da corrente consumida por estes componentes:

$$i = \frac{v_e}{R_1 + R_{eq}} = 319,77 \mu A \quad (9)$$

$$p_{R_1} = R_1 \cdot i^2 = 102,25 \mu W \quad (10)$$

$$p_{R_{eq}} = R_{eq} \cdot i^2 = 74,69 \mu W. \quad (11)$$

Nas últimas expressões, p_{R_1} e $p_{R_{eq}}$ representam a potência consumida por R_1 e por R_{eq} . Dados os valores obtidos, pode-se concluir que a potência de 0,25 W é adequada para os resistores R_1 e R_2 .

2.2. Condicionamento das Correntes Utilizando um Circuito com Resistor Shunt

Na sequência do projeto, o condicionamento das correntes foi realizado através de um circuito com resistor *shunt*. Este método permite a medição indireta da corrente elétrica através da queda de tensão gerada no resistor *shunt*, que é proporcional à corrente que passa por ele. Esse sinal de tensão é então enviado para o sistema de aquisição de dados, onde é processado. A utilização do resistor *shunt* oferece uma solução eficaz e de baixo custo para monitorar correntes em diversos tipos de circuitos.

Conforme ilustrado na Figura 2, o circuito de medição de corrente foi projetado para garantir a precisão e segurança na aquisição de dados. A resistência do R_{shunt} é calculada a partir da relação entre a tensão máxima do AMC1200, v_{max} , e a corrente máxima que se deseja medir, i_{max} , que foi definida como 1,5 A eficazes:

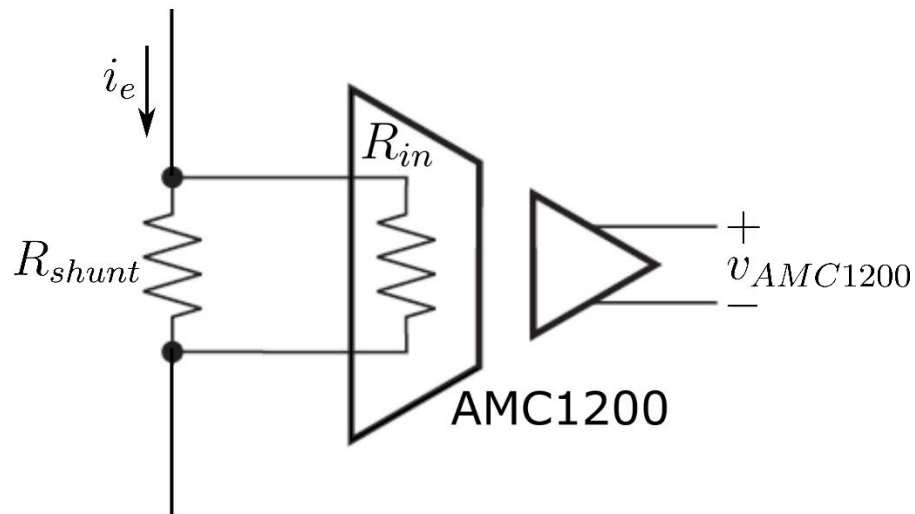
$$R_{shunt} = \frac{v_{max}}{i_{max}} = 117,85 m\Omega. \quad (12)$$

Considerando os valores comerciais disponíveis e de forma a adicionar uma margem de segurança, definiu-se $R_{shunt} = 100 m\Omega$. Considerando também que o valor de R_{in} é muito maior que o valor de R_{shunt} , pode-se assumir que a resistência equivalente da associação destes dois resistores em paralelo é igual a R_{shunt} . Assim, a potência consumida por R_{shunt} é calculada conforme segue.

$$p_{R_{eq}} = R_{shunt} \cdot i_{max}^2 = 450 mW \quad (13)$$

Desta forma, pode-se utilizar um resistor com 0,5 W de potência para R_{shunt} .

Figura 2- Circuito para medição de corrente.



Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2012).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Amplificador isolador

Após pesquisa em sites de fabricantes de circuitos integrados, optou-se pela utilização do amplificador isolador AMC1200 (<https://www.ti.com/product/AMC1200>) da Texas Instruments (TI) pelo seu baixo custo em relação às outras opções disponíveis. Por exemplo, o AMC1200 tem um preço médio de R\$2,00 em sites como o AliExpress, em contraste com o valor médio de R\$60,00 cobrado no amplificador isolador ISO124P (<http://www.ti.com/product/ISO124>), o qual é muito utilizado neste tipo de aplicação. Além do baixo custo, o AMC1200

“O **AMC1200** é um amplificador de isolamento de precisão com saída separada da circuitaria de entrada por uma barreira de dióxido de silício (SiO_2), proporcionando alta resistência à interferência magnética. Esta barreira é certificada para fornecer isolamento galvânico de até 4000 volts de pico, de acordo com as normas UL1577 e IEC60747-5-2. Quando utilizado

com fontes de alimentação isoladas, o dispositivo evita que correntes de ruído em uma linha de alta tensão de modo comum entrem no terra local, causando interferências ou danos a circuitos sensíveis.

O **AMC1200** é otimizado para conexão direta a resistores shunt ou outras fontes de sinal de baixa tensão, com uma faixa de entrada de ± 250 mV. O dispositivo oferece baixa não linearidade (0,075% máx. a 5 V), baixo erro de desvio (1,5 mV máx.) e baixo ruído (3,1 mVRMS típico). Ele é projetado para alta rejeição de modo comum (108 dB) e opera com uma tensão de alimentação de 3,3 V no lado de baixa tensão.

Este amplificador é totalmente especificado para operação em uma faixa de temperatura industrial estendida de -40°C a 105°C e está disponível em um pacote tipo SMD (Surface Mounted Device), gullwing-8." (AMC1200-TI, pg. 1, 2012)

se mostrou uma ótima opção para o projeto por possuir as seguintes características:

- tensão de pico de isolamento de 4000 V;
- imunidade a transientes de pelo menos 10 kV/ μs ;
- baixa não linearidade, de no máximo 0,075%;
- baixo erro de offset, de no máximo 1,5 mV;
- largura de banda mínima do sinal de entrada igual a 60 kHz;
- tensões de entrada de até ± 250 mV;
- ganho fixo igual a 8;
- saída já adequada para sistemas de aquisição que operam em 3,3 V (valor médio igual a 1,29 V) e 5V (valor médio igual a 2,55 V).

Assim, além de prover isolamento elétrica entre a entrada e a saída, o AMC1200 também já realiza o condicionamento dos sinais removendo os valores negativos dos sinais de entrada através da soma de um valor fixo de tensão positiva.

Com base na folha de dados do AMC1200, os dois circuitos divisor de tensão e resistor *shunt* foram dimensionados para serem utilizados junto com o amplificador, a fim de obter os valores de tensão e corrente e proporcionar níveis de sinais adequados para as leituras dos conversores A/D.

3.2 Teste dos circuitos projetados

Os circuitos desenvolvidos nas etapas anteriores foram implementados no software de simulação TINA-TI para verificação do seu funcionamento. As Figuras 3 e 4 mostram,

respectivamente, os circuitos de medição de tensão e corrente que foram implementados no software TINA-TI.

Na Figura 5 é mostrada a tensão de entrada do circuito, configurada como sendo igual a 220 V eficazes com frequência de 60 Hz, enquanto a Figura 6 mostra as tensões de entrada e de saída do AMC1200. De forma geral, pode-se concluir que o circuito realizou a tarefa para a qual foi projetado, pois ajustou a tensão de entrada para uma faixa de valores adequada para sistemas que operam com tensões de 3,3 volts.

Conclusões semelhantes são obtidas analisando as Figuras 5 e 6, onde são mostradas a corrente de entrada (1,5 A eficazes com frequência de 60 Hz) e tensões de entrada e saída do AMC1200. O circuito realizou a tarefa para a qual foi projetado, convertendo a corrente para uma tensão adequada para leitura em sistemas de medição que operam com 3,3 volts.

Figura 3- Circuito para tensão projetado no simulador *Tina-TI*.

Fonte: o próprio autor (2024).

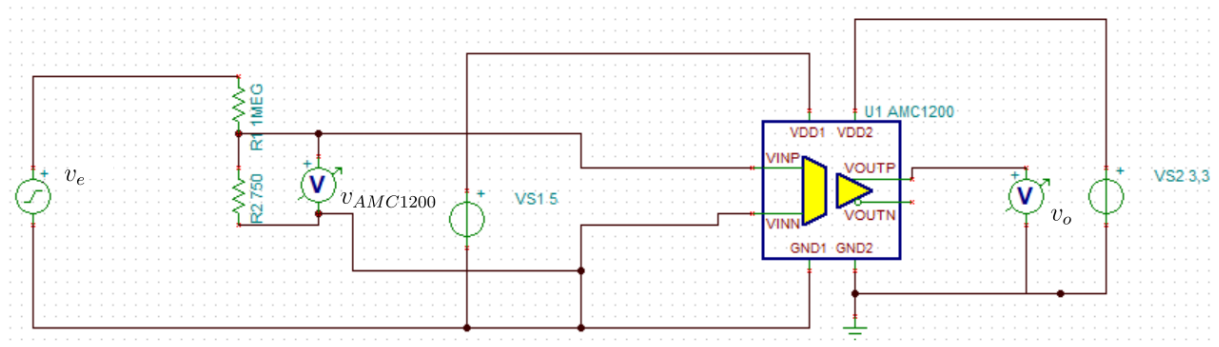
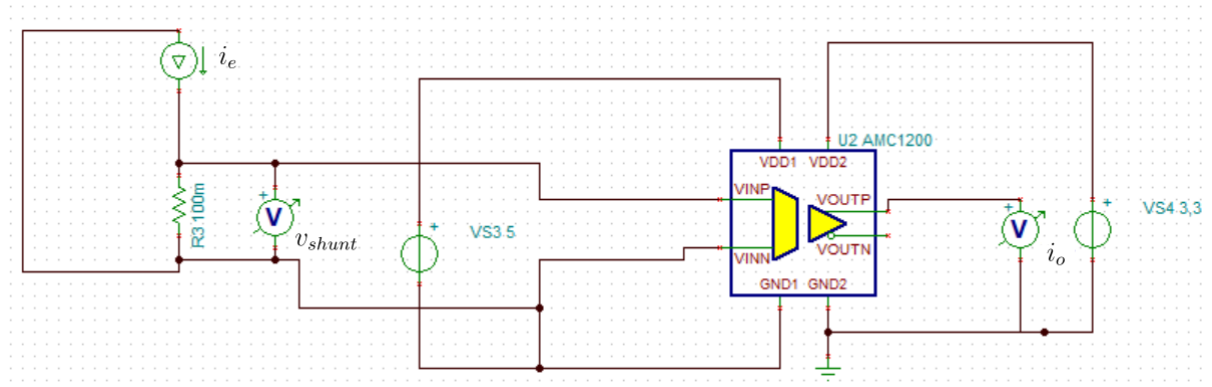
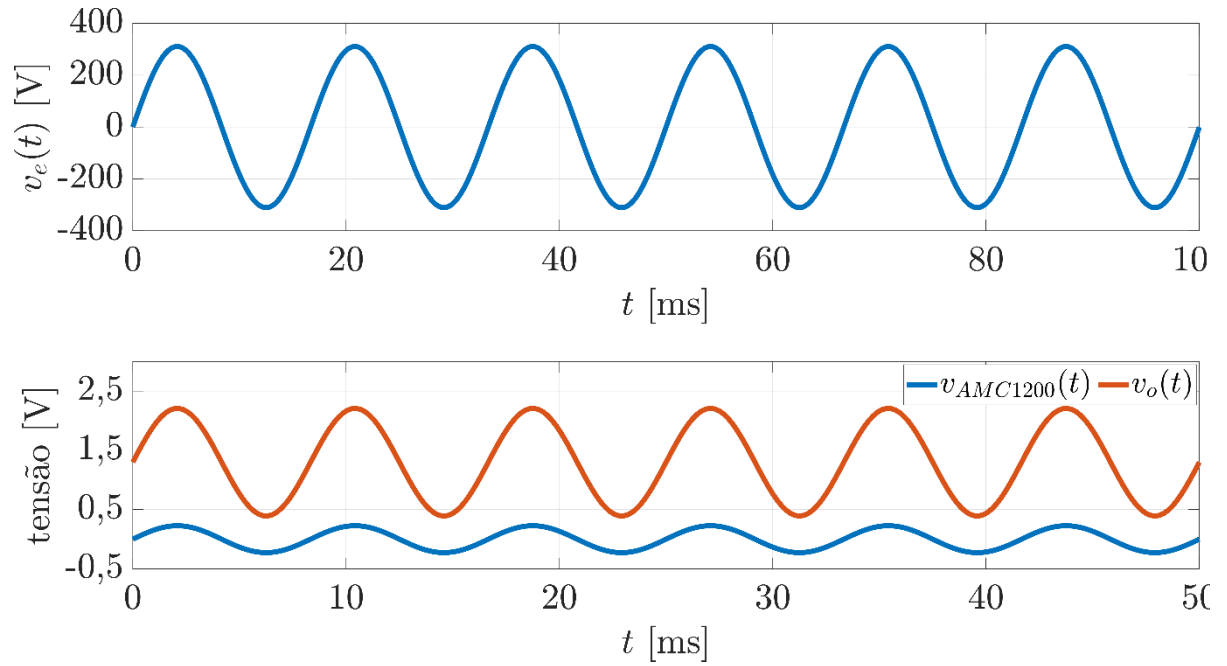


Figura 4- Circuito para corrente projetado no simulador *Tina-TI*.



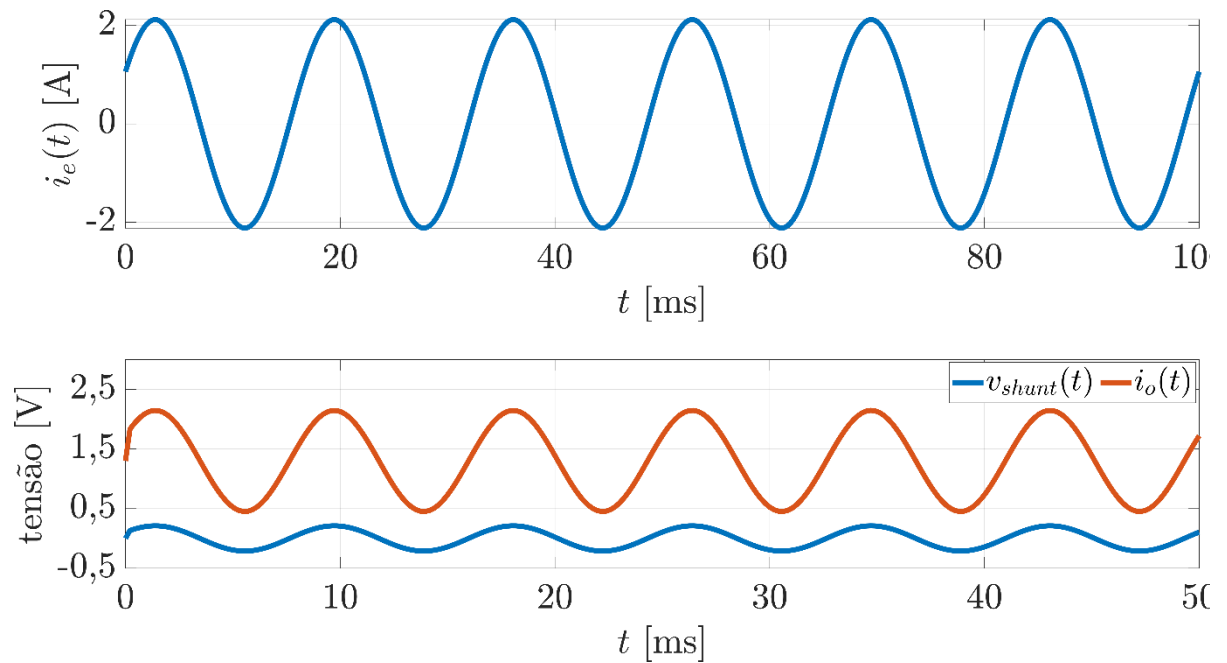
Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 5 - Tensões de entrada e saída simulados no Tina-TI



Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 6 - Correntes de entrada e saída simulados no Tina-TI.



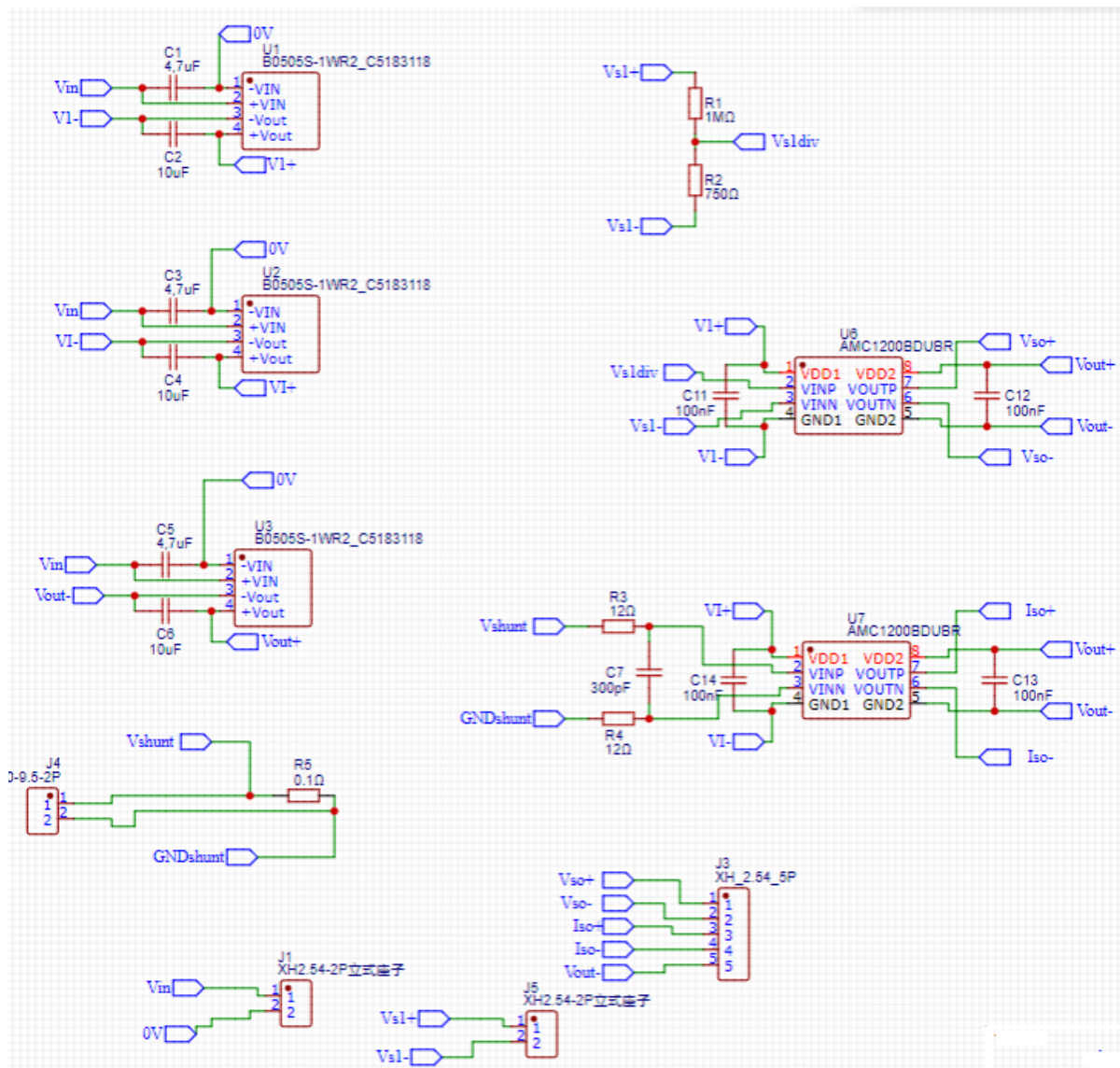
Fonte: o próprio autor (2024).

3.3 Projeto da placa de circuito impresso

A partir da validação da topologia proposta através de simulações e com base nos circuitos desenvolvidos nas subseções anteriores, projetou-se o circuito cujo esquemático é mostrado na Figura 7. As Figuras 8 e 9 mostram a placa de circuito impresso projetada a partir do esquemático utilizando o software EasyEDA. Foram utilizados resistores com 1% de tolerância, de acordo com informação do fabricante.

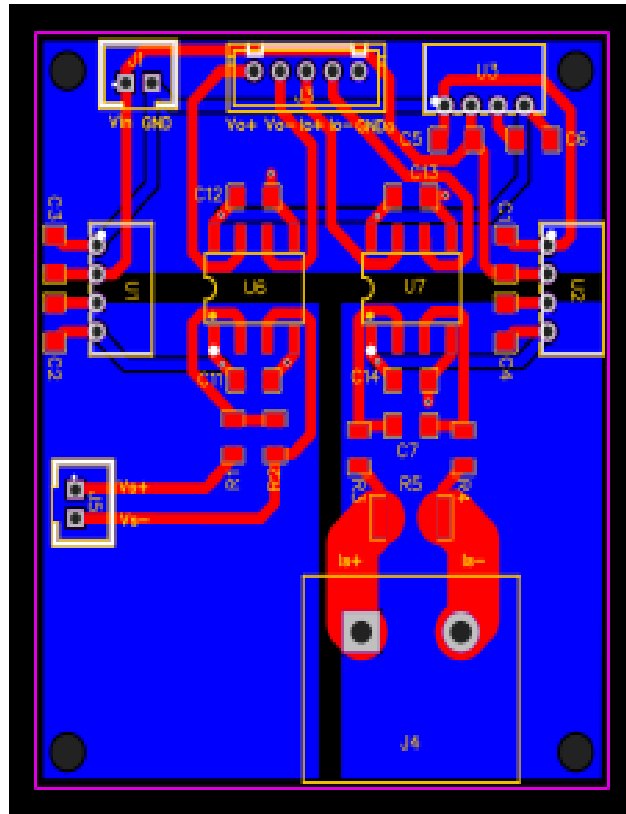
Por fim, a placa de circuito impressa projetada foi fabricada e montada conforme mostrado na Figura 10.

Figura 7- Esquemático do circuito desenhado no EasyEDA



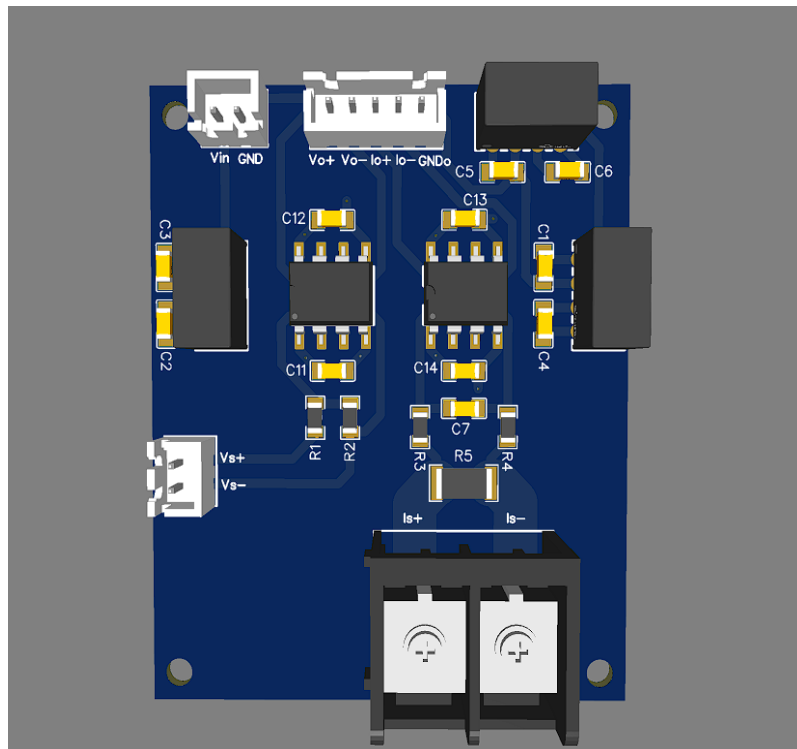
Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 8- Placa de circuito impresso(PCB) EasyEDA



Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 9- Placa de circuito impresso 3D (PCB) do EasyEDA



Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 10- Placa de circuito impresso montada.



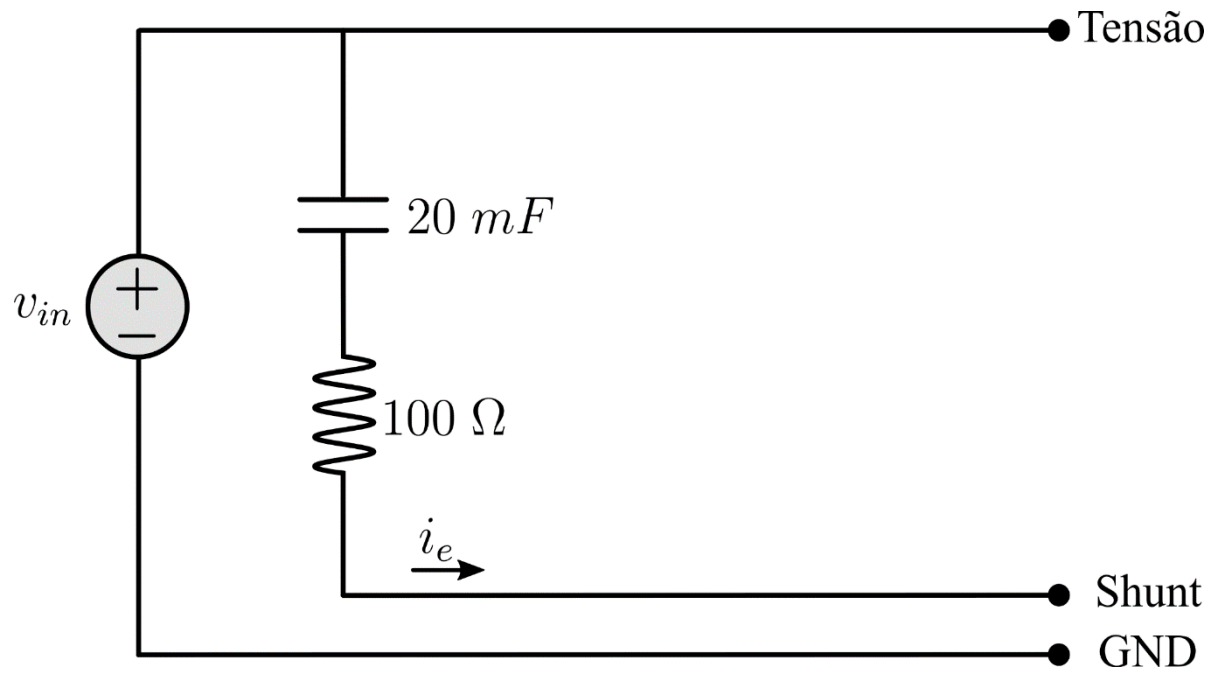
Fonte: o próprio autor (2024).

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com todas as simulações e projetos validados, foram realizados testes experimentais em bancada para confirmar o propósito do trabalho. Para garantir a integridade do circuito, utilizou-se um osciloscópio com canais isolados, evitando interferências indesejadas e assegurando a eficácia do circuito projetado.

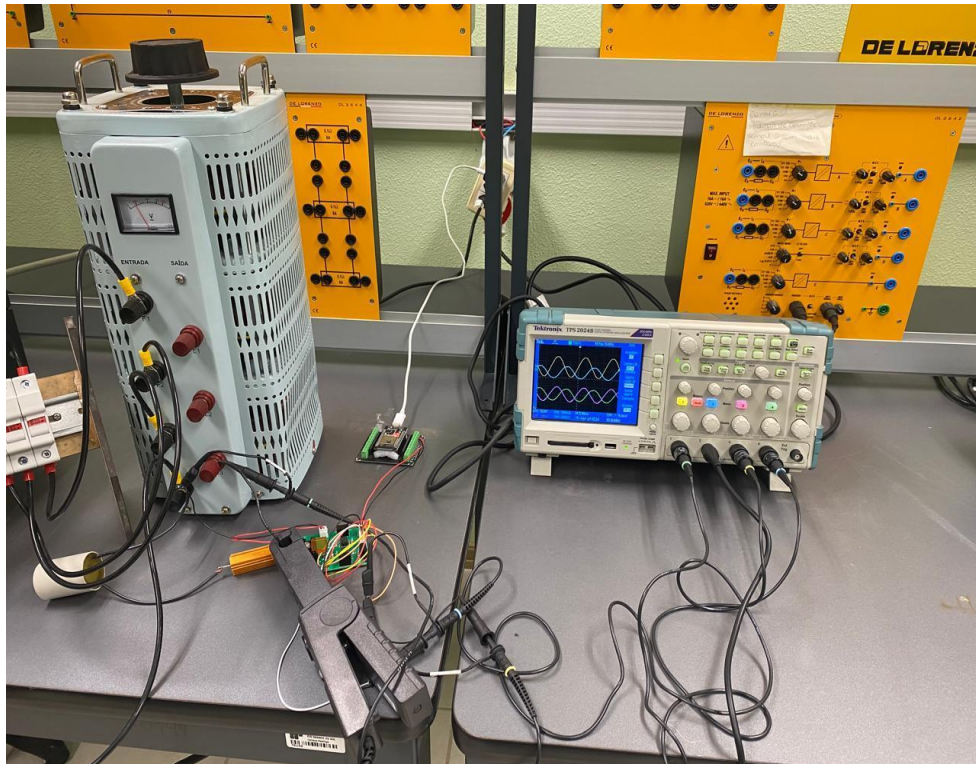
No primeiro experimento foi utilizado o circuito RC conectado à placa do circuito de condicionamento, conforme mostrado na Figura 12. Utilizou-se tensão de entrada igual a 85 V eficazes devido às limitações de potência do resistor do circuito RC. A Figura 11 apresenta a topologia do ensaio realizado, enquanto as Figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, as tensões de entrada e saída e as correntes de entrada e saída para este ensaio. De forma geral, pode-se afirmar que o circuito operou conforme o projetado, diminuindo a tensão de entrada a valores entre 0 e 3,3V e convertendo a corrente de entrada para uma tensão nesta faixa de valores.

Figura 11- Circuito RC utilizado no ensaio.



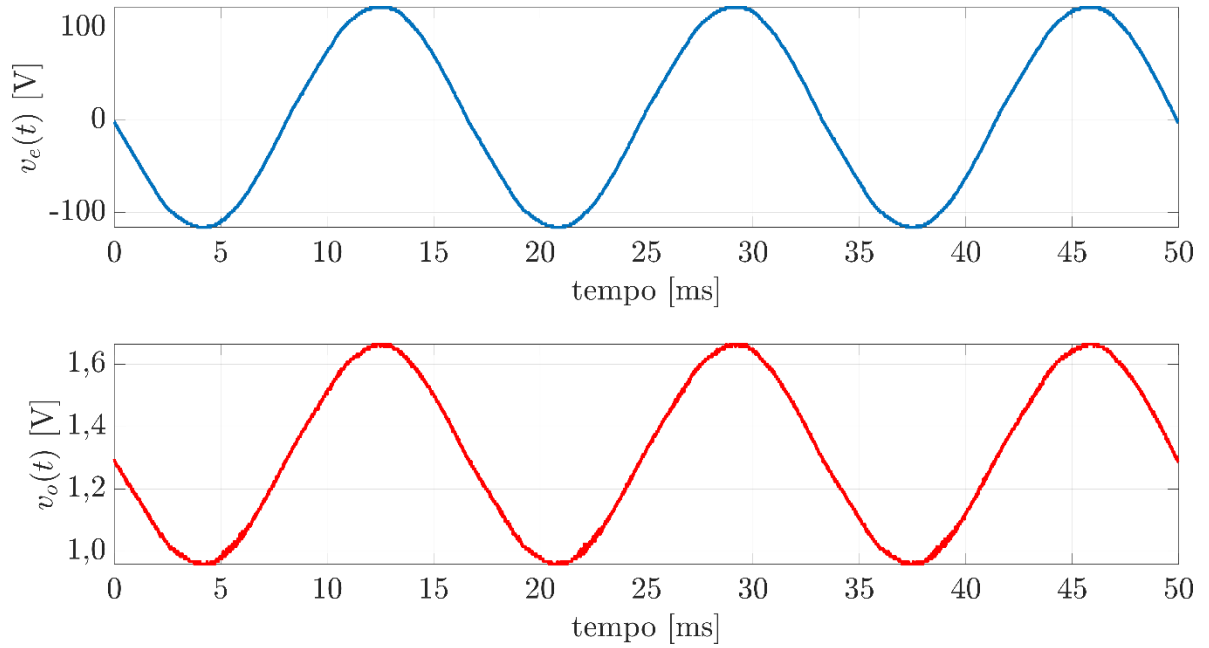
Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 12- Teste de bancada com um circuito de carga RC.



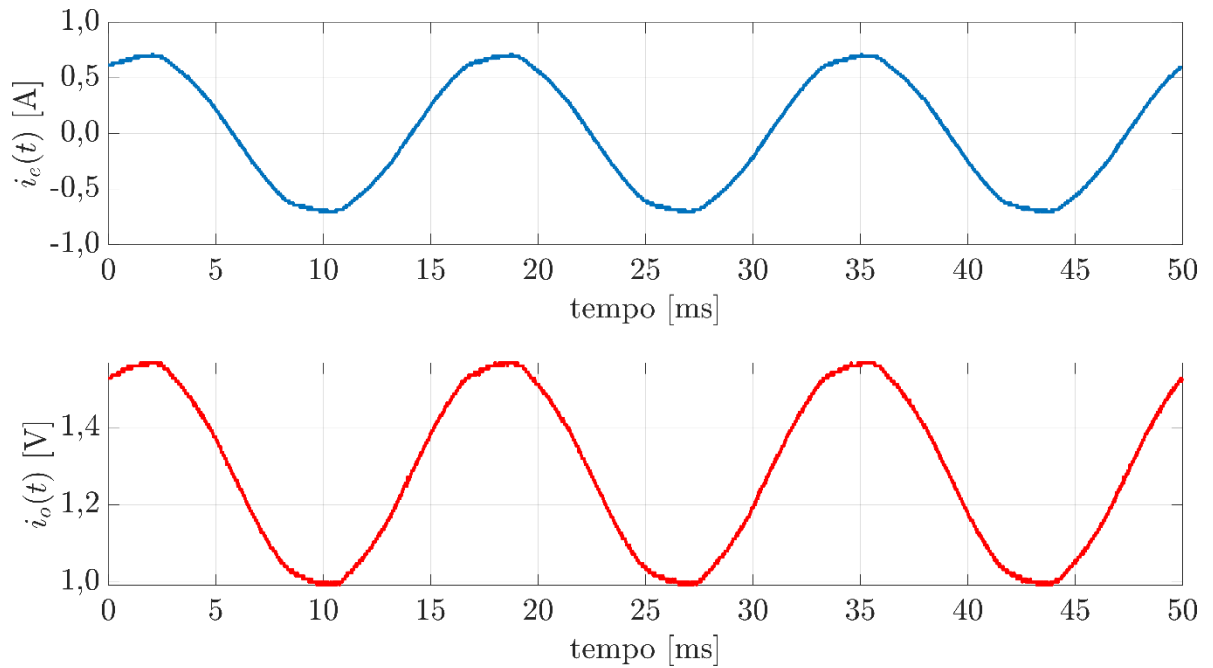
Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 13 - Entrada e saída de tensão do circuito de condicionamento (circuito RC).



Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 14 - Entrada e saída de corrente do circuito de condicionamento (circuito RC).



Fonte: o próprio autor (2024).

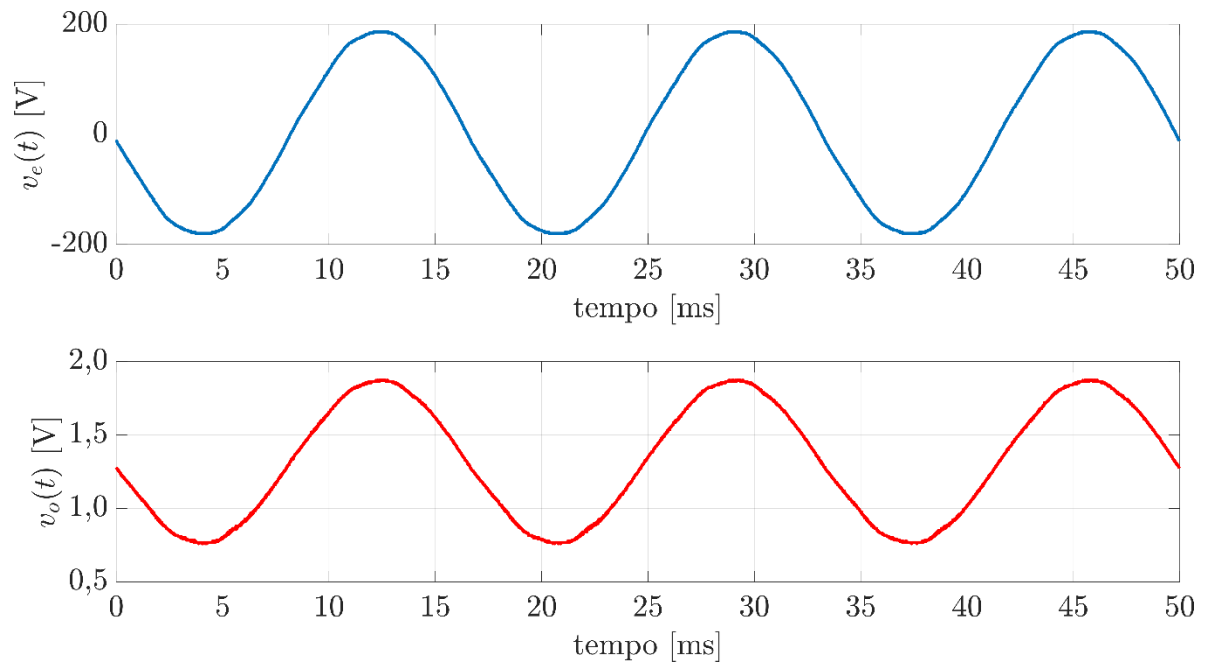
Na sequência, foi realizado um teste adicional utilizando um motor trifásico ligado em estrela sem neutro e alimentado com 127 V, sendo medidas a tensão e corrente de uma das fases. A Figura 15 mostra o ensaio realizado. Já a Figura 16 apresenta a comparação entre as tensões de entrada e de saída do circuito de condicionamento, enquanto a Figura 17 mostra a comparação entre as correntes de entrada e de saída. Novamente pode-se concluir que o circuito de condicionamento funcionou de forma satisfatória, adequando a tensão de entrada a valores entre 0 e 3,3V e convertendo a corrente em um valor de tensão proporcional dentro da faixa de 0 a 3,3V.

Figura 15 - Teste de bancada com um motor de indução trifásico.



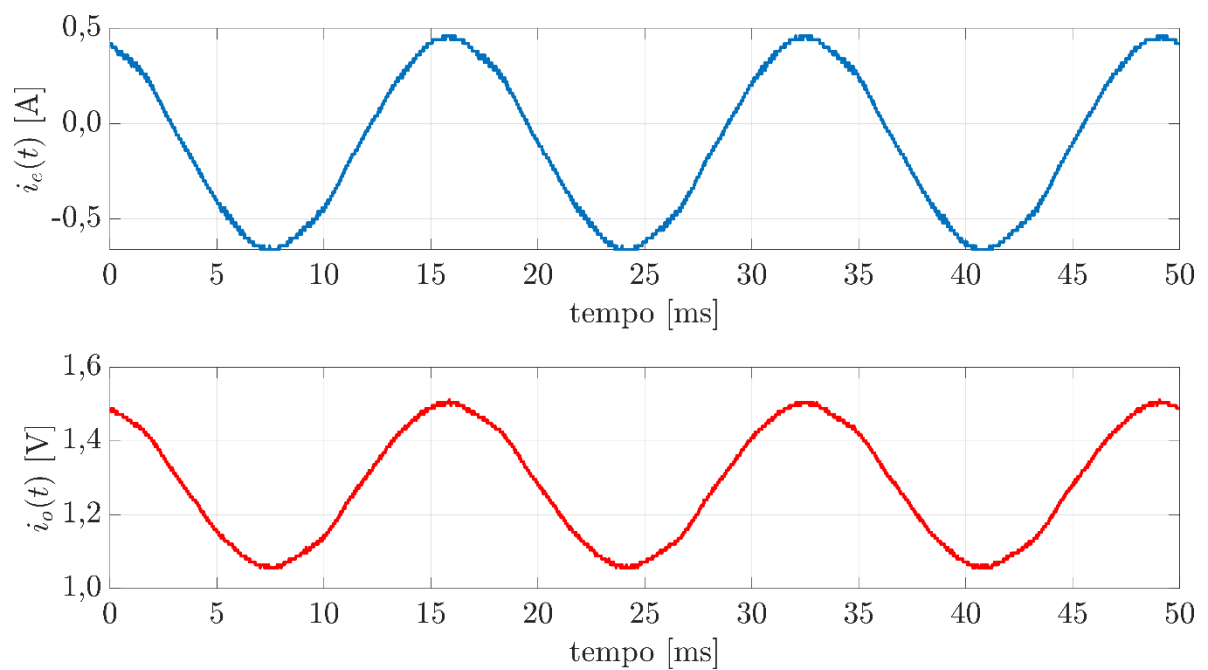
Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 16 - Entrada e saída de tensão do circuito de condicionamento (motor).



Fonte: o próprio autor (2024).

Figura 17 - Entrada e saída de corrente do circuito de condicionamento (motor).



Fonte: o próprio autor (2024).

Tabela 1 - Resultados dos ensaios.

| Ensaio | v_e/v_o | i_e/i_o | v_o médio | i_o médio |
|--------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| circuito RC | 340,42 | 2,47 | 1,31V | 1,28V |
| motor | 344,58 | 2,48 | 1,31V | 1,28V |

Fonte: o próprio autor (2024).

Os valores apresentados na tabela referem-se às medições de entrada e saída nos circuitos de condicionamento de tensão e corrente. A tensão de entrada (v_{in}) corresponde à tensão aplicada ao divisor de tensão, enquanto a tensão de saída (v_o) é o valor ajustado pelo divisor, adequado para ser processado pelo amplificador isolador AMC1200. Para as correntes, a corrente de entrada (i) é a corrente real medida no circuito, e a corrente de saída (i_o) é o sinal de tensão proporcional gerado pelo resistor shunt, também dentro da faixa de operação do AMC1200.

Analisando a Tabela 1, pode-se concluir que o circuito funcionou conforme o projetado. A razão entre a tensão de entrada e a tensão de saída obtida para o circuito RC foi de 344,58, enquanto para o motor foi de 340,42. Já o valor teórico calculado para esta razão assumindo componentes ideais e nenhum ruído nas medições foi de 342,50. Esta diferença entre os valores medidos e o valor teórico pode ser explicada por diversos motivos, entre eles a baixa resolução do osciloscópio utilizado, resultando em erros de quantização; a presença de ruídos de medição, já que os dados não foram filtrados nem tratados; e a faixa de tolerância dos componentes, entre outros.

Resultados semelhantes foram observados comparando as razões entre a corrente de entrada e a tensão proporcional de saída medidas e o valor teórico correspondente. No caso do circuito RC, obteve-se uma razão de 2,47, enquanto no ensaio com o motor obteve-se 2,48, em contraste com o valor teórico de 2,50.

A Tabela 1 também mostra que os valores médios das medições de tensão ficaram na faixa de 1,31 volts, enquanto os valores médios das medições de corrente ficaram em torno de 1,28 volts. Esses valores foram obtidos através de medições com um osciloscópio, sendo que a amostragem foi limitada a uma vez por cada alteração de tensão de entrada. Apesar dessa limitação na amostragem, os valores obtidos estão próximos do valor especificado pelo fabricante, que deveria ser igual a 1,29 volts.

Adicionalmente, foi verificada se há inclusão significativa de distorção harmônica pelo circuito de condicionamento através da análise da Distorção Harmônica Total (DHT) dos sinais de entrada e saída utilizando o critério IEEE Std 519-2022 (IEEE, 2022), onde a DHT é calculada para os 50 primeiros componentes harmônicos a partir da equação que segue, com os resultados sendo apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Distorção Harmônica Total dos sinais de entrada e saída do circuito.

| Ensaio | v_e | v_o | i_e | i_o |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| circuito RC | 1,59% | 1,32% | 2,46% | 2,38% |
| motor | 1,61% | 1,40% | 2,14% | 2,11% |

Fonte: o próprio autor (2024).

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (14)$$

Na última expressão, h_{max} é o número total de harmônicas analisadas, V_h é o valor relativo à harmônica h e V_1 é o valor correspondente à componente fundamental do sinal.

Analisando a Tabela 2, nota-se que o circuito de condicionamento não adiciona distorção harmônica ao sinal de entrada; pelo contrário, ajuda a atenuar a distorção presente. Por exemplo, no ensaio com o circuito RC, a distorção da tensão de entrada foi medida como 1,59% e na saída como 1,32%, enquanto a DHT da corrente de entrada foi medida como 2,46% e a DHT do sinal correspondente à saída de corrente foi 2,38%. Semelhantemente, no ensaio com o motor de indução as distorções harmônicas totais da tensão e corrente de entrada foram 1,61% e 2,14%, enquanto as DHTs dos sinais de saída de tensão e corrente foram, respectivamente, 1,40% e 2,11%. Estes resultados comprovam que o circuito de condicionamento projetado é adequado para ser utilizado em sistemas industriais de medição de tensão e corrente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo desenvolvido propôs o projeto e implementação de um circuito de condicionamento de tensões e correntes para medição utilizando sistemas embarcados, focando em assegurar a precisão e a segurança dos dados adquiridos. A metodologia aplicada, que inclui o uso de amplificadores isoladores, divisores de tensão e resistores shunt, foi eficaz em adaptar os sinais elétricos para níveis compatíveis com os conversores A/D dos microcontroladores, preservando a integridade dos dispositivos de medição.

Os resultados experimentais confirmaram a viabilidade do circuito proposto. Os testes realizados demonstraram que o circuito é capaz de ajustar corretamente as tensões e correntes de entrada para valores adequados, garantindo que os sinais medidos estejam

dentro da faixa operacional esperada. O uso do amplificador isolador AMC1200 mostrou-se particularmente vantajoso, proporcionando isolamento galvânica eficaz e condicionamento adequado dos sinais, além de ser uma solução de baixo custo em comparação com alternativas disponíveis no mercado.

Além disso, os testes com diferentes tipos de carga, como circuitos RC e motores trifásicos, validaram o desempenho do circuito em situações reais de operação, evidenciando a robustez e confiabilidade da solução desenvolvida. A placa de circuito impresso projetada e fabricada também se mostrou eficiente, facilitando a implementação prática do circuito em sistemas de medição industrial.

Em síntese, o estudo alcançou seus objetivos ao desenvolver uma solução eficaz e economicamente viável para o condicionamento de tensões e correntes em sistemas embarcados, contribuindo para o monitoramento e controle de grandezas elétricas em ambientes industriais. A abordagem adotada garante não apenas a precisão das medições, mas também a proteção dos sistemas de aquisição de dados, aspectos fundamentais para aplicações em monitoramento de energia, análise de eficiência energética, e controle de processos industriais.

6 REFERÊNCIAS

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica. **ANEXO VII DA RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST MÓDULO 7 – CÁLCULO DE PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO**. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_6.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2024.

ALEXANDER, C. K; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. - Porto Alegre: AMGH, 2013.

BALBINOT, ALEXANDRE. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 3. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2019.

ELETRONICSTUTORIALS. **The Current Transformer**. Disponível em: <<https://www.electronics-tutorials.ws>>. Acesso em: 03 set 2024.

EQUIPE NEPIN. **Qual a relação entre o fator de potência e a eficiência energética**. Disponível em:<<https://www.nepin.com.br/blog/solucoes-industriais/fator-de-potencia-eficiencia-energetica/>>. Acesso em: 29 ago. 2024.

IEA – Agencia Internacional de Energia. **Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-policy-opportunities-for-electric-motor-driven-systems>>. Acesso em: 04 ago. 2024

IEEE. **IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems**. IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014). 2022.

MOROZ ASSESSORIA. **Motores elétricos são responsáveis pelo consumo de 68% da energia elétrica das fábricas, diz Procel**. Disponível em: <<https://morozcomunicacao.com.br/2024/01/24/motores-eletricos-sao-responsaveis-pelo-consumo-de-68-da-energia-eletrica-das-fabricas-diz-procel/>>. Acesso em: 30 ago. 2024.

OLIVEIRA, Joab de. **Um protótipo para medição monofásica em rede de fator de potência baseado no microcontrolador ESP32**. 2022. Monografia de Graduação - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido. **Sensores de Tensão, Corrente e Potência.** Mossoró RN, 2016. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/18574013/sensores-de-tensao-corrente-e-potencia>>. Acesso em: 29 ago 2024.