

SISTEMA DE MEDIÇÃO MULTIVARIÁVEL PARA MONITORAMENTO DE SINAIS SENOIDAIS DE CORRENTE E TENSÃO ELÉTRICA

Data de submissão: 20/02/2025

Data de aceite: 05/03/2025

Ariel Souza Medeiros

Evandro Ailson de Freitas Nunes

<http://lattes.cnpq.br/8374333578947971>

INTRODUÇÃO

Os recursos, possibilidades e aplicações trazidos para a sociedade moderna através da evolução dos estudos na área da eletricidade, são de valor intelectual, financeiro e material inestimáveis. Nesse âmbito, a energia elétrica se tornou um insumo fundamental, deixando o ser humano cada vez mais dependente da continuidade e existência do serviço, de maneira que formas alternativas de obtenção de energia elétrica são temas em alta nos últimos anos, e mantêm a comunidade científica empenhada no desenvolvimento de maneiras mais eficientes do seu consumo (JAIN, C.; SINGH, B., 2015).

Na década de 70, o consumidor residencial possuía uma carga quase que inteiramente resistiva, salvo raras exceções

(MEHL, E. L. M., 2012). Mas, com o advento e popularização dos circuitos eletrônicos, esse padrão mudou significativamente, de modo que a qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor tornou-se também uma prioridade. O aumento da complexidade de funções que são exigidas das cargas elétricas, desde o uso doméstico como industrial, contribuiu para o incremento da sensibilidade dessas cargas frente às condições de operação do sistema elétrico (DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A., 2017).

Outro fator notável é a crescente de fontes de energia elétrica renováveis. É conhecido pela bibliografia que os inversores de sistemas fotovoltaicos utilizam corrente contínua para o chaveamento em altas frequências de transistores, que acabam por adicionar harmônicos de tensão e corrente junto ao sinal fundamental (SCHMIDT, F. H. G. *et al.*, 2022). Também é identificado obstáculos na energia eólica, onde os geradores possuem rápida variação de tensão de saída, ocasionando flutuações de tensão

que são prejudiciais para o sistema elétrico de potência, ou na geração por marés, que possuem grandes flutuações de energia, gerando problemas como variações de frequência, distorções harmônicas entre outras (DO CARMO BORGES, W. B.; OLESKOVICZ, M.; JÚNIOR, B. R. P., 2022).

Alguns exemplos de problemas que afetam a qualidade da energia elétrica, também chamados de distúrbios elétricos, são o desequilíbrio de tensão, flutuações de tensão, harmônicos e fator de potência (ANEEL, 2021). Esses distúrbios podem ocasionar em perdas significativas, como queima das cargas e mau funcionamento dos mesmos. A maioria desses distúrbios afetam diretamente a forma de onda dos sinais de tensão e correntes que fluem em um sistema elétrico. Por isso, um monitoramento preciso desses sinais é necessário, pois embasa as ações de engenharia adequadas para a identificação e solução dos problemas causadores dos distúrbios.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de medição de sinais senoidais de corrente e tensão de um sistema trifásico genérico, que possa monitorar o fluxo energético no segmento do circuito elétrico em que for inserido, além de possibilitar ações de controle, por meio de sistemas embarcados que necessitem de condicionamento de sinais adequado.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, foi conduzida uma revisão da literatura, focada nos princípios fundamentais de medição. A bibliografia consultada foi diversificada, abrangendo tanto artigos científicos quanto trabalhos de conclusão de curso. Durante o processo de leitura, foi realizada uma síntese paralela dos artigos, destacando-se os aspectos positivos e negativos de cada um.

O módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2021) estabelece os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica, avaliados em termos da qualidade do produto, do serviço e da qualidade comercial, além do acompanhamento da segurança do trabalho e das instalações. Para cada procedimento, são definidos conceitos e a base de cálculo para a observação de fenômenos que podem afetar a qualidade da energia elétrica distribuída. Na maioria das equações, é necessário o conhecimento dos valores eficazes, mínimos, médios e máximos da componente fundamental dos sinais de corrente e tensão. Logo, a confiabilidade das estimativas dos indicadores é diretamente associada ao sistema de sensoriamento a ser utilizado.

Dentre os sensores encontrados na revisão bibliográfica, são citados frequentemente o sensor de tensão ZMPT101B e o sensor de corrente SCT 013 da empresa YHDC (BREDA, J. D.; MEDEIROS, J. M.; DE ARAÚJO, J. V. G., 2019). No presente trabalho, será desenvolvido um analisador de energia elétrica de baixo custo, similar ao proposto por

Stapenhorst (2021), no formato de bancada com alimentação própria, sem dependência e bateria externa.

O Sensor de corrente SCT 013 000, escolhido para utilização neste projeto, é um transformador de corrente (TC) do tipo janela, cuja ilustração pode ser observada na Figura 1. Um TC é um equipamento fundamental para medição e proteção, que atua abaixando a corrente da carga no seu enrolamento primário, fornecendo uma corrente de menor amplitude, porém análoga, no seu secundário (MAMEDE FILHO, J., 2013).



Figura 1 - Sensor de corrente SCT 013 000.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O sensor de tensão ZMPT101B utilizado neste projeto é um transformador de potencial que converte valores de tensão da rede para uma faixa de valores mais adequados para ferramentas de medição e proteção (MAMEDE FILHO, J., 2013). O seu enrolamento primário é composto de diversos enrolamentos de fio, em contraposição do seu secundário. Esta configuração permite a redução dos níveis de tensão de maneira análoga no secundário, ainda que compartilhe as mesmas características e informações presentes na onda de entrada no primário. Um exemplar desse sensor de tensão pode ser observado na Figura 2.

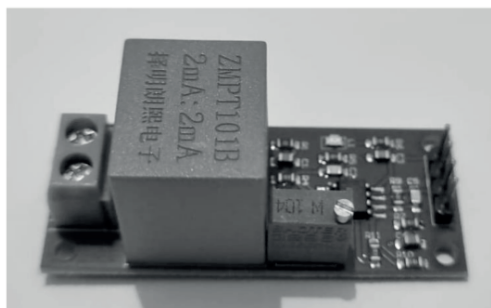


Figura 2 - Sensor de tensão ZMPT101B.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O condicionamento de sinais de corrente é realizado por meio de um divisor de tensão acoplado, para que este pudesse ter valores adequados para serem lidos, além de um resistor de carga, já que o sinal de saída do sensor é um valor de corrente, que quando circula por um resistor, gera um sinal de tensão. O sensor de corrente fornece em sua saída um sinal de tensão já otimizado para a leitura em plataformas de microcontroladores. O sistema também utiliza um módulo *real time control* (RTC) para contagem de tempo no circuito, associando as medições a uma faixa temporal, que é um perfil desejado para aplicações que requerem análise em tempo real, também conhecidas como *on-line*. Para possibilitar a análise offline dos sinais elétricos, o sistema de medição dispõe de um módulo de cartão SD, a fim de armazenar os dados de ensaios desejados. Um exemplar do módulo RTC e de cartão SD podem ser observados na figura 3.

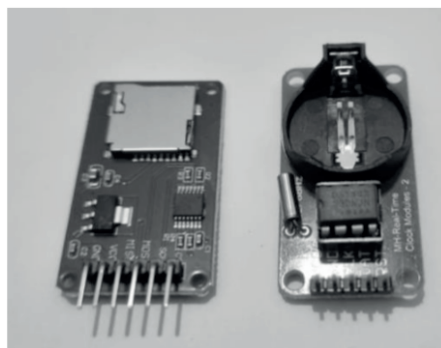


Figura 3 - Módulo de cartão SD e RTC.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a determinação dos materiais a serem utilizados, é necessário o estudo dos sensores, que engloba o teste de desempenho e posterior calibração. Esta parte é fundamental para garantir a segurança do equipamento utilizado para o processamento de dados. O microcontrolador utilizado neste projeto é o Arduino Uno, uma plataforma de código aberto de fácil usabilidade e disponibilidade que teve como propósito o seu uso profissional em dispositivos interativos com o ambiente por meio de transdutores (ISMAILOV, A. S.; JO'RAYEV, Z. B., 2022). Na Figura 4 é possível observar a estrutura utilizada para o teste de desempenho dos sensores, que conta com multímetros, alicates amperímetros e um osciloscópio.

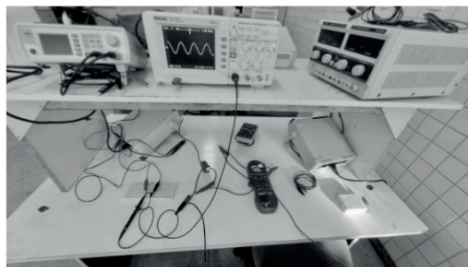


Figura 4 - Estrutura dos testes dos sensores de corrente.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na figura 5(a), é possível ver o esquema de teste utilizado para o sensor de tensão, que consiste na aplicação de uma fonte externa de tensão, obtendo na saída do sensor um sinal análogo à entrada, que será medido pelo osciloscópio. A figura 5(b) apresenta o esquema realizado para o sensor de corrente, onde, por meio de um circuito externo composto por uma fonte de tensão e um elemento resistivo, será aferida a corrente. Na saída do sensor, o sinal é enviado a um osciloscópio. Estão disponíveis 3 exemplares de cada um dos sensores, com o objetivo de medir sistemas trifásicos com canais independentes entre si.

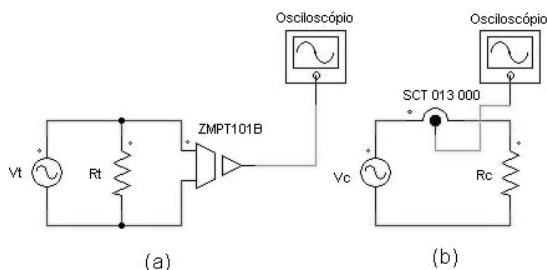


Figura 5 - Esquema simplificado do teste dos sensores.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sensores de tensão foram testados conforme visto na figura 5(a). A variável V_t corresponde ao sinal de entrada alternado sem *offset* de 30 V de amplitude máxima, tendo como saída do sensor uma tensão eficaz de 91,9 mV, como visto na figura 6. Esse valor é passível de ajuste por meio de um *trimpot* presente no sensor. Também é observado um *offset* inerente ao sensor no valor de 2,53 mV. Notou-se também presença de valores negativos de tensão com valor mínimo de -132 mV, sendo necessária a implementação de uma componente contínua, cujo objetivo é adicionar um *offset* de 2,5 V ao sinal, para viabilizar a leitura mediante o arduino.

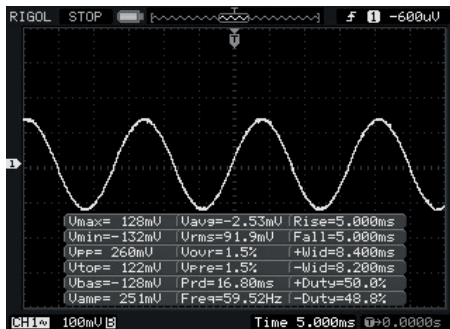


Figura 6 - Sinal de saída do sensor de tensão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os testes para o sensor de corrente foram arranjados de maneira semelhante ao descrito na figura 5(b). Tem-se V_t representa o sinal de tensão alternada e sem *offset* da fonte, com valor de amplitude máxima de 15 V, e R_t representa uma carga resistiva de 25 Ohms e 100 W. Quando integrado ao circuito, o sensor produz um sinal de corrente na saída. Com a finalidade de medir este valor, na saída do sensor foi acoplada em um resistor de carga de 100 Ohms. Por meio dessa configuração, foi possível obter um sinal de tensão proporcional à corrente de saída do sensor com valor eficaz de 92,5 mV, apresentando também um *offset* inerente ao sensor com valor de -2,05mV, como pode ser observado na figura 7. Com o valor de tensão eficaz em mãos, por meio da Lei de Ohm, é possível calcular a corrente de saída do sensor. Com isso, o erro percentual encontrado é de 0,03%, quando comparado com o valor obtido no alicate amperímetro, que apresenta apenas 1 casa decimal de precisão para valores nessa escala.

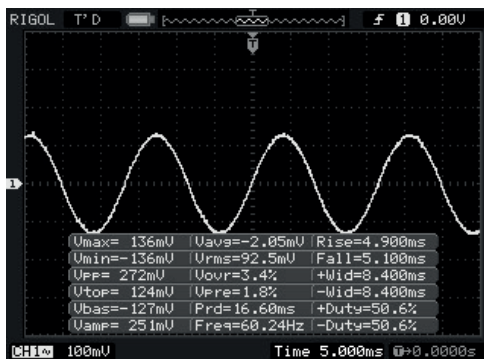


Figura 7 - Sinal de saída do resistor de carga do sensor de corrente.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

CONCLUSÕES

Diante do exposto, os sensores adquiridos foram devidamente testados e seu pleno funcionamento e fidelidade foram constatados, necessitando apenas soluções que adicionem um componente contínuo ao sinal de saída para leitura correta do arduino. Como alternativa, pretende-se futuramente transformar o projeto em uma bancada de medições para o laboratório do IFBA Campus Paulo Afonso, retornando os frutos deste projeto para a comunidade acadêmica.

Os próximos passos consistem em simular os circuitos para o estudo dos sinais gerados, a fim de melhor condicioná-los para a adequada aferição das grandezas por meio do arduino. Ademais, será possível o cálculo da potência consumida por cada parte do sistema, o que possibilita o desenvolvimento de uma fonte de alimentação mais adequada para o circuito. Após esse processo, se dá início à montagem do equipamento.

Como sugestões futuras de desenvolvimento do trabalho, após a aferição e armazenamento dos dados, podem ser feitas diversas análises dos resultados no que abrange a qualidade de energia elétrica, sendo um processo enriquecedor tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo fomento da bolsa de iniciação científica, bem como ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Campus Paulo Afonso, pela infraestrutura dos laboratórios e fomento do conhecimento adquirido e incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica.** 2021.

BREDA, J. D.; MEDEIROS, J. M.; DE ARAÚJO, J. V. G. **Desenvolvimento de um Medidor de Consumo de Energia Elétrica em Tempo Real por meio de Medidor não Invasivo de Corrente Utilizando a Plataforma Arduino.** In: ANAIS DO 14º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 2019, Ouro Preto. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2019. Disponível em: Acesso em: 02 Abr. 2024.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Qualidade de energia elétrica: conceitos, normas e técnicas de análise.** In: XVIII SNPTÉE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005, Curitiba. Anais do XVIII SNPTÉE. Curitiba: ELETROSUL, 2005. p. 1-10. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a1.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.

DO CARMO BORGES, William Brasileiro; OLESKOVICZ, Mário; JÚNIOR, Benvindo Rodrigues Pereira. **mulações Digitais em Tempo Real Considerando Geração Eólica Aplicadas em Problemas de Qualidade da Energia Elétrica: o Estado da Arte. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 2, n. 1, 2022.**

ISMAILOV, Alisher Shakirovich *et al.* **Study of arduino microcontroller board.** Science and Education, v. 3, n. 3, p. 172-179, 2022.

JAIN, Chinmay; SINGH, Bhim. Single-phase single-stage multifunctional grid interfaced solar photovoltaic system under abnormal grid conditions. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 9, n. 10, p. 886-894, 2015.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos.** Grupo Gen-LTC, 2013.

MEHL, Ewaldo LM. Qualidade da energia elétrica. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ–UFPR**, p. 21, 2012.

SCHMIDT, Fernando HG et al. Estudo da Influência de Distorções Harmônicas Inseridas por Sistemas Fotovoltaicos no Fator de Potência da Rede Elétrica de Distribuição. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 2, n. 1, 2022.

STAPENHORST, Paulo Josué. **Desenvolvimento de um analisador de energia elétrica de baixo custo com Arduino.** 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 06 dez. 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/3331>.