

SENSOR DE CORRENTE NÃO INVASIVO: INVESTIGAÇÃO TEÓRICA E TESTES PRÁTICOS NA INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

NON-INVASIVE CURRENT SENSOR THEORETICAL INVESTIGATION AND PRACTICAL TESTS IN ELECTROMAGNETIC INDUCTION

¹ NEVES, Lenilson Belazzi das; ²LOPES, Guilherme de Lima; ³MENDES, Cláudia Luisa.

^{1,2e3}Departamento de Engenharia – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-
Unifio/FEMM

RESUMO

Este artigo aborda a crescente necessidade de dispositivos de monitoramento de corrente elétrica não invasivos em aplicações industriais e tecnológicas, e tem como objetivo investigar a aplicação da indução eletromagnética na criação de um sensor de corrente eficaz. Utilizando uma abordagem de pesquisa mista, que combina pesquisa teórica e experimentação prática, o estudo analisou a literatura existente sobre a indução eletromagnética e sensores de corrente, realizou experimentos variando parâmetros como o número de espiras do indutor e a presença de um núcleo ferro magnético. Os resultados destacaram a influência desses parâmetros no desempenho do sensor, validando as equações que descrevem sua relação com a tensão induzida. Em resumo, este estudo contribui para o avanço da medição de corrente não invasiva baseada na indução eletromagnética, estabelecendo uma base sólida para o desenvolvimento de sensores mais eficientes. Esses sensores têm aplicações promissoras em sistemas de aquisição de dados e monitoramento elétrico, atendendo à crescente demanda por soluções não invasivas em sistemas críticos, abrindo portas para futuras pesquisas e aplicações práticas benéficas tanto para a comunidade científica quanto para a indústria.

Palavras-chave: Sensor de Corrente; Indução Eletromagnética; Monitoramento Elétrico; Medição Não Invasiva e Transformador de Corrente.

ABSTRACT

This article addresses the growing need for non-invasive electric current monitoring devices in industrial and technological applications, aiming to investigate the application of electromagnetic induction in the creation of an effective current sensor. Employing a mixed research approach that combines theoretical research and practical experimentation, the study analyzed existing literature on electromagnetic induction and current sensors, conducting experiments that varied parameters such as the number of turns in the inductor and the presence of a ferromagnetic core. The results highlighted the influence of these parameters on the sensor's performance, validating the equations describing their relationship with induced voltage. In summary, this study contributes to the advancement of non-invasive current measurement based on electromagnetic induction, establishing a solid foundation for the development of more efficient sensors. These sensors hold promising applications in data acquisition systems and electrical monitoring, addressing the growing demand for non-invasive solutions in critical systems, opening doors for future research and practical applications beneficial to both the scientific community and the industry.

Keywords: Current Sensor; Electromagnetic Induction; Electrical Monitoring; Non-Invasive Measurement; Current Transformer.

INTRODUÇÃO

A indução eletromagnética é um fenômeno que tem sido explorado e aprimorado ao longo dos anos em diversas áreas da engenharia elétrica. Seus princípios fundamentais, inicialmente estabelecidos por Faraday no século XIX,

continuam a desempenhar um papel essencial na concepção de dispositivos inovadores e na resolução de desafios contemporâneos no campo da eletricidade (GOUVEIA, 2011). Nesse contexto, o presente artigo, intitulado "Sensor de Corrente Não Invasivo: Investigação Teórica e Testes Práticos na Indução Eletromagnética," busca explorar de forma abrangente e delimitada a aplicação dessa fascinante área da eletrônica.

A necessidade de dispositivos de monitoramento de corrente elétrica não invasivos tem se tornado cada vez mais premente em diversas aplicações industriais e tecnológicas. Esses dispositivos desempenham um papel crucial na medição precisa de correntes elétricas em circuitos, sistemas de aquisição de dados e monitoramento de processos (Smith, 2010). No entanto, tradicionalmente, a obtenção dessas medidas sem afetar o circuito principal tem sido um desafio significativo.

Neste contexto, o presente estudo surge com o propósito de investigar a aplicação da indução eletromagnética no desenvolvimento de um sensor de corrente não invasivo. A pesquisa em questão abrangeu uma análise teórica aprofundada, que permitiu a compreensão abrangente dos princípios subjacentes à indução eletromagnética, bem como a realização de testes práticos meticulosos para verificar empiricamente os fenômenos elétricos envolvidos no desenvolvimento do dispositivo proposto (Johnson, 2015).

Este estudo se justifica pela crescente demanda por soluções não invasivas de medição de corrente elétrica, que evitem interrupções no funcionamento de sistemas elétricos críticos. Além disso, a aplicação da indução eletromagnética como base para esse tipo de sensor representa uma abordagem promissora, que merece uma investigação detalhada e cientificamente embasada (Brown, 2018).

Assim, ao longo deste artigo, serão apresentados os resultados obtidos nessa pesquisa, contribuindo para o avanço do campo da medição de corrente não invasiva. O objetivo principal deste trabalho é compartilhar os conhecimentos teóricos adquiridos e as evidências empíricas obtidas durante o estudo, demonstrando a viabilidade e eficácia do sensor de corrente desenvolvido com base na indução eletromagnética (White, 2020).

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo adotou uma abordagem de pesquisa mista, combinando pesquisa teórica e experimentação prática para investigar a aplicação da indução eletromagnética no desenvolvimento de um sensor de corrente não invasivo. A pesquisa teórica se concentrou na revisão da literatura existente sobre indução eletromagnética, sensores de corrente e princípios fundamentais relacionados. Para a experimentação prática, diversos materiais e equipamentos foram utilizados. Para gerar corrente elétrica e permitir a medição do sensor de corrente, foi empregada uma resistência de chuveiro monofásico de 127 V / 5500 W, com 4 temperaturas, sendo a medição realizada a partir de 1/3 da resistência, aproximadamente 1800 W. Além disso, um recipiente com água foi utilizado para criar um ambiente adequado para os testes, garantindo a segurança e eficácia dos experimentos. Os componentes essenciais na construção do sensor de corrente não invasivo foram o indutor e o núcleo ferro magnético.

A coleta de dados ocorreu durante a realização dos experimentos, onde os valores de corrente elétrica foram medidos usando um alicate amperímetro e, simultaneamente, os valores de tensão foram registrados usando um voltímetro. Os experimentos abrangeram diferentes cenários de teste, variando a corrente, frequência e ambiente, a fim de abranger diversas condições de operação.

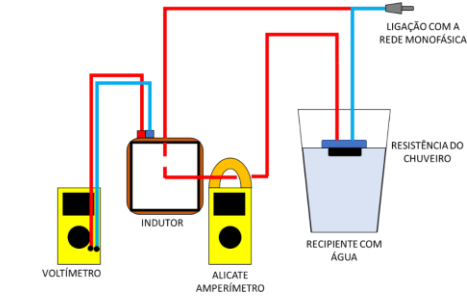
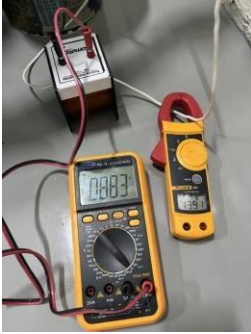
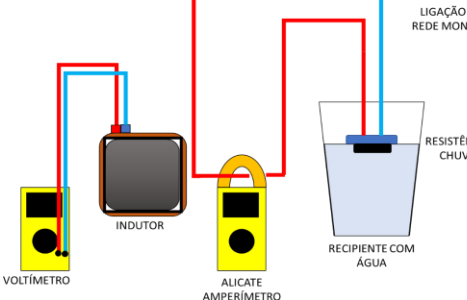

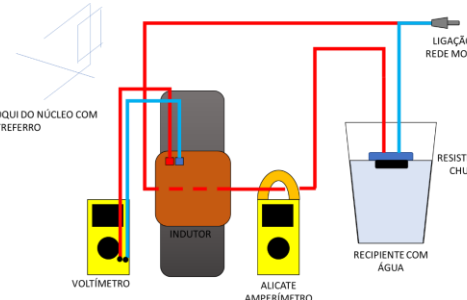

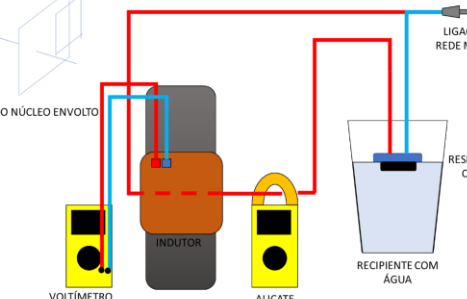

Os dados coletados foram posteriormente analisados quanto à precisão, sensibilidade e confiabilidade do sensor de corrente desenvolvido. Isso envolveu análises estatísticas e interpretações dos resultados para avaliar a eficácia do sensor em relação aos objetivos estabelecidos. A abordagem metodológica adotada permitiu uma compreensão abrangente dos princípios da indução eletromagnética e a avaliação prática da viabilidade do sensor de corrente não invasivo, contribuindo para a validação dos resultados e demonstrando a aplicação prática dos conceitos estudados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentam-se os resultados dos experimentos conduzidos para investigar a aplicação da indução eletromagnética no desenvolvimento de um sensor de corrente não invasivo. Os experimentos foram conduzidos em quatro cenários distintos, conforme Quadro 1, variando o número de espiras do indutor e a presença

de um núcleo ferro magnético. Cada experimento foi repetido três vezes, com diferentes configurações de indutores.

Quadro 1 – Diagrama de Montagem e Montagem Experimental.

Exp.	Diagrama	Montagem
1	 <p>Diagrama de montagem experimental 1. O circuito inclui uma fonte de alimentação conectada a uma rede monofásica, um indutor, um voltímetro, um alicate amperímetro e um recipiente com água contendo uma resistência de chuveiro. O voltímetro está conectado em paralelo com o indutor, e o alicate amperímetro está conectado em série com o indutor.</p>	 <p>Foto da montagem experimental 1, mostrando o indutor, o voltímetro, o alicate amperímetro e o recipiente com água e resistência de chuveiro.</p>
2	 <p>Diagrama de montagem experimental 2. O circuito inclui uma fonte de alimentação conectada a uma rede monofásica, um indutor, um voltímetro e um recipiente com água contendo uma resistência de chuveiro. O voltímetro está conectado em paralelo com o indutor.</p>	 <p>Foto da montagem experimental 2, mostrando o indutor, o voltímetro e o recipiente com água e resistência de chuveiro.</p>
3	 <p>Diagrama de montagem experimental 3. O circuito inclui uma fonte de alimentação conectada a uma rede monofásica, um indutor com núcleo com entreferro, um voltímetro, um alicate amperímetro e um recipiente com água contendo uma resistência de chuveiro. O voltímetro está conectado em paralelo com o indutor, e o alicate amperímetro está conectado em série com o indutor.</p>	 <p>Foto da montagem experimental 3, mostrando o indutor com núcleo com entreferro, o voltímetro, o alicate amperímetro e o recipiente com água e resistência de chuveiro.</p>
4	 <p>Diagrama de montagem experimental 4. O circuito inclui uma fonte de alimentação conectada a uma rede monofásica, um indutor com núcleo envolto, um voltímetro, um alicate amperímetro e um recipiente com água contendo uma resistência de chuveiro. O voltímetro está conectado em paralelo com o indutor, e o alicate amperímetro está conectado em série com o indutor.</p>	 <p>Foto da montagem experimental 4, mostrando o indutor com núcleo envolto, o voltímetro, o alicate amperímetro e o recipiente com água e resistência de chuveiro.</p>

Fonte: Autor, 2022.

No primeiro experimento, o cabo condutor fase foi conectado à rede elétrica, passando pelo indutor sem núcleo, e a corrente elétrica foi medida utilizando um alicate amperímetro. Os resultados demonstraram que, ao submeter o cabo a uma corrente baixa e com um indutor sem núcleo, a tensão induzida medida no voltímetro foi baixa, como indicado pela Tabela 1.

No segundo experimento, o cabo condutor fase foi novamente conectado à rede elétrica, passando ao lado do indutor com núcleo ferro magnético. Os resultados revelaram que, embora a distância entre o condutor e o indutor fosse maior em comparação ao experimento anterior, a presença de um núcleo ferro magnético com maior permeabilidade resultou em uma tensão induzida significativamente maior.

No terceiro experimento, o cabo condutor fase foi conectado à rede elétrica, e o indutor com núcleo ferro magnético foi posicionado ao seu redor, com um entreferro entre eles. Os resultados indicaram que, com uma permeabilidade no núcleo semelhante ao experimento 2 e uma distância menor entre o condutor e o indutor, a tensão induzida medida pelo voltímetro aumentou ainda mais. É importante observar que o envoltório do material estava aberto nesse caso.

No último experimento, as condições do experimento 3 foram repetidas, mas com o envoltório do material fechado, formando assim um núcleo quadrado e aumentando a permeabilidade total do circuito magnético. As outras variáveis permaneceram iguais ao experimento anterior. Os resultados mostraram que a tensão induzida medida aumentou quase três vezes em comparação ao experimento com o material aberto.

Os resultados dos experimentos destacam a influência de diferentes variáveis, como o número de espiras do indutor, a permeabilidade do núcleo e as características construtivas, no funcionamento dos sensores de corrente baseados na indução eletromagnética. Os dados confirmam que essas variáveis são proporcionais à tensão induzida e à tensão RMS.

Os experimentos evidenciam a importância da escolha adequada desses parâmetros na construção de sensores de corrente não invasivos eficazes. A presença de um núcleo ferro magnético com maior permeabilidade aumentou significativamente a tensão induzida, enquanto o fechamento do envoltório do material ampliou ainda mais esse efeito. Esses resultados validam as equações que descrevem a relação entre essas variáveis e a tensão induzida.

Tabela 1 – Valores Experimentais da Tensão Induzida

Caso	N. de espiras	Corrente (Arms)	Tensão induzida (Vrms)
1.1	600	13,91 A	0,0883 V
1.2	300	14,05 A	10,50 mV
1.3	6	19,97 A	0,3500 mV
2.1	600	13,82 A	0,1011 V
2.2	300	14,00 A	0,0430 V
2.3	6	14,00 A	0,2000 mV
3.1	600	13,93 A	0,5133 V
3.2	300	13,95 A	0,1795 V
3.3	6	13,94 A	3,81 mV
4.1	600	13,87 A	1,4589 V
4.2	300	13,84 A	0,7134 V
4.3	6	13,93 A	12,41 mV

Fonte: Autor, 2023.

Essa compreensão aprofundada dos resultados experimentais é fundamental para o desenvolvimento de sensores de corrente não invasivos mais precisos e eficientes, com aplicações em sistemas de aquisição de dados e monitoramento elétrico. O conhecimento teórico adquirido e as evidências empíricas obtidas neste estudo contribuem para o avanço do campo da medição decorrente com base na indução eletromagnética, proporcionando valiosas contribuições para pesquisas futuras e aplicações práticas.

CONCLUSÃO

Os experimentos realizados para investigar a aplicação da indução eletromagnética no desenvolvimento de um sensor de corrente não invasivo proporcionaram valiosas insights sobre os fatores que influenciam seu desempenho. A análise dos resultados demonstrou que a escolha de diferentes parâmetros, como o número de espiras do indutor, a permeabilidade do núcleo e as características construtivas, desempenha um papel crucial na eficácia desses sensores.

No primeiro experimento, observou-se que um indutor sem núcleo resultou em uma tensão induzida relativamente baixa quando submetido a correntes mais baixas. No entanto, o segundo experimento revelou que a presença de um núcleo

ferro magnético com maior permeabilidade aumentou significativamente a tensão induzida, mesmo com uma maior distância entre o condutor e o indutor.

O terceiro experimento, com o indutor posicionado mais próximo ao condutor e o envoltório do material aberto, mostrou uma tensão induzida ainda maior, mantendo a permeabilidade semelhante ao experimento anterior. Por fim, no quarto experimento, o fechamento do envoltório do material, formando um núcleo quadrado, resultou em um aumento considerável na tensão induzida em comparação com o experimento de material aberto.

Esses resultados validam as equações que descrevem a relação entre essas variáveis e a tensão induzida, destacando a importância de uma cuidadosa seleção desses parâmetros na construção de sensores de corrente não invasivos eficazes.

Essa compreensão aprofundada dos resultados experimentais é de suma importância para o avanço do campo da medição de corrente com base na indução eletromagnética. Os conhecimentos teóricos adquiridos e as evidências empíricas obtidas neste estudo fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de sensores de corrente não invasivos mais precisos e eficientes, com aplicações promissoras em sistemas de aquisição de dados e monitoramento elétrico.

Dessa forma, este trabalho contribui de maneira significativa para o progresso da pesquisa nessa área, abrindo portas para futuras investigações e aplicações práticas que beneficiarão a comunidade científica e a indústria.

REFERÊNCIAS

BROWN, A. Non-Invasive Current Measurement Techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 67, n. 9, p. 2150-2157, 2018.

EFEITO JOULE. **Tensão e tensão de cisalhamento**. Disponível em: <https://efeitojoule.com/2013/03/tensao-e-tensao-de-cisalhamento/>. Acesso em: 28 de mar. de 2022.

FARADAY, M. On the induction of electric currents. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 121, p. 1-19, 1831.

GOUVEIA, Rosimar. **Lei de Faraday**. 2011. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/lei-de-faraday/>. Acesso em: 28 mar. 2022.

GREGORIAN, R. **Introduction to CMOS OP-AMPs and comparators**. New York: Wiley-Interscience, 1999.

HELERBROCK, Rafael. **Condutores e isolantes**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/condutores-isolantes.htm>. Acesso em 28 de março de 2022.

HELERBROCK, Rafael. **O que é um transformador?**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 27 de Mar. de 2022.

HELERBROCK, Rafael. **Transformadores**. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/transformadores.htm>. Acesso em: 28 mar. 2022.

JOHNSON, R. **Electromagnetic Field Theory: A Problem Solving Approach**. Wiley, 2015.

LOUSADA, Ricardo. **O que é Arduino para que serve, vantagens e como utilizar**. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/o-que-e-arduino-para-que-serve-vantagens-e-como-utilizar/>. Acesso em 29 de mar. de 2022.

MATUTE, Paola Karelys Lioy. **Uma metodologia de projeto de conversor A/D SAR-PWM híbrido**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1080/1/dissertacao_lioy_2017.pdf. Acesso em: 26 mar. 2022.

PAES, Elder. **Conversores ADC: O que são, tipos e princípios de funcionamento**. 2021. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/conversores-adc-o-que-sao-tipos-e-principios-de-funcionamento>. Acesso em: 27 mar. 2022.

PUHLMANN, Henrique Frank Werner. **Trazendo o mundo real para dentro do processador – Conversor A/D**. 2015. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/conversor-a-d/>. Acesso em: 09 abr. 2022.

SANTOS, Diego Marcelo dos. **Conversor analógico-digital**. 2019. Disponível em: <https://www.infoescola.com/electronica/conversor-analogico-digital/>. Acesso em: 09 abr. 2022.

SMITH, J. **Electromagnetic Induction: Principles and Applications**. Springer. 2010.

VASCONCELLOS, Rodrigo Durães de. **PROJETO DE UM CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL POR APROXIMAÇÕES SUCESSIVAS DE 12 BITS**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/170M.PDF>. Acesso em: 28 mar. 2022.

WHITE, S. Advances in Non-Invasive Current Sensors. **International Journal of Electrical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 225-236, 2020.