

<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2020>

## Desenvolvimento de arranjo experimental para monitoramento de máquinas elétricas utilizando sensores de efeito Hall e sensores ópticos

## Development of experimental setup for monitoring electrical machines using Hall effect sensors and optical fiber sensor

### RESUMO

Em razão do grande número de motores elétricos utilizados nas indústrias, é necessário o desenvolvimento de estratégias de manutenção que contemplem monitoramento em tempo real e análise de dados local ou remota utilizando técnicas de processamento de sinais avançados. Esse trabalho tem por objetivo desenvolver uma plataforma para a calibração e caracterização de sensores ópticos aplicados em máquinas elétricas rotativas, através de sensores de efeito Hall para a medição de tensão e corrente. A análise dos dados de tensão e corrente será realizada aplicando transformadas de Clarke e Park para comparação com os resultados obtidos da instrumentação óptica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sensores de efeito Hall. Calibração de sensores ópticos. Máquinas elétricas. Monitoramento de falhas. Transformada de Clarke. Transformada de Park.

### ABSTRACT

Due to the great number of electric motors used in industries, it is necessary to develop a maintenance strategy that includes real-time monitoring and local or remote data analysis using advanced signal processing techniques. This work aims to develop a platform for the calibration and characterization of optical fiber sensors applied to rotating electrical machines, using Hall effect sensors for voltage and current voltage measurements. The analysis of the voltage and current data will be performed by applying Clarke and Park transforms for comparison with the results obtained from the instrumentation.

**KEYWORDS:** Hall effect sensors. Calibration of optical sensors. Electric machines. Failure monitoring. Clarke's transform. Park's Transform.

Lucas Coimbra Rocha Lago  
[lucaslago@alunos.utfpr.edu.br](mailto:lucaslago@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

Jean Carlos Cardozo da Silva  
[jeanccs@utfpr.edu.br](mailto:jeanccs@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

Gustavo Fraga Gehring  
[Gehring@alunos.utfpr.edu.br](mailto:Gehring@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

Uilian Jose Dreyer  
[uiliandreyer@utfpr.edu.br](mailto:uiliandreyer@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

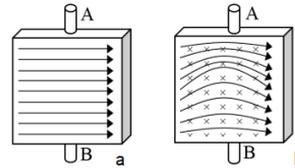
Segundo EPE (2018), “Em 2017 o setor industrial brasileiro consumiu cerca de 40 % da energia gerada, dos quais aproximadamente 70 % estão relacionadas aos motores elétricos, o que implica em 30 % de consumo de energia do país”. O setor que mais utiliza motores de indução é o industrial, por conta disso, observa-se uma necessidade maior no desenvolvimento de técnicas de medição para a predição de falhas tanto elétricas como mecânicas. Um método de monitoramento adequado é o fator que influencia em maior vida útil de uma máquina elétrica ou causa danos irreversíveis ao motor. Falhas de isolamento nos enrolamentos são as causas mais comuns em motores elétricos de indução (MARCOS, 2018).

Segundo Adam Glowacz e Zygryd Glowacz (2016, p.1), “um diagnóstico de falhas é essencial para uma manutenção adequada. Falhas podem danificar um motor, e motores danificados geram perdas econômicas causadas por interrupções nas linhas de produção”. Em grandes polos industriais, tem-se uma grande concentração de motores elétricos operando de forma ininterrupta, apenas deixando de operar em horários predefinidos para sua manutenção (PELEGRIN, 2020).

Métodos para monitoramento de possíveis falhas em motores elétricos são abordados com frequência por estudiosos da área de manutenção. Adam Glowacz e Zygryd Glowacz (2016), direcionaram um estudo com imagem térmica através de redes neurais. Pelegrin et al. (2020), desenvolveram um projeto de monitoramento com redes de Bragg em fibra óptica encapsulada em material compósito, através da medição de vibração e temperatura do estator de um motor elétrico de 14920 W (20Hp). Segundo Ruan Delgado Gomes (2012), p qual propôs um modelo com rede de sensores sem fio, “a aplicação em ambiente industrial ainda apresenta uma série de desafios, por conta da transmissão e a capacidade variável de enlace, se aperfeiçoada, esta técnica seria de grande ajuda no ambiente industrial” (2020, p. i).

Este projeto foi criado com o objetivo de desenvolver uma plataforma para a calibração e caracterização de sensores ópticos aplicados em máquinas elétricas rotativas, através de sensores de efeito Hall. “Devido à natureza dos campos eletromagnéticos, e a intrínseca e inseparável ligação entre corrente elétrica e campo magnético, devidamente explicada pelas equações de Maxwell, pode-se afirmar que medir o campo magnético, é medir a corrente elétrica” (BORGES, 2015, p.30). O efeito Hall é o desvio de elétrons no interior de um fio de cobre por um campo magnético (HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009). A tensão Hall pode ser descrita como a tensão entre os pontos A e B da Figura 1, se considerar que, tendo um condutor elétrico percorrido por uma corrente elétrica, quando aplicado um campo magnético perpendicular a este condutor, temos uma força elétrica tanto perpendicular para o campo magnético, como para a corrente elétrica.

Figura 1 – a. Condutor percorrido por corrente elétrica; b. Efeito do campo magnético sobre as correntes.

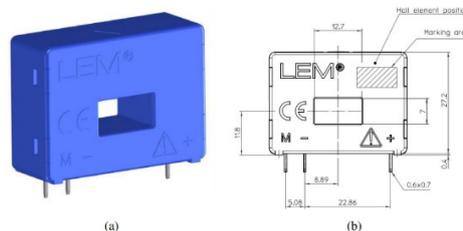


Fonte: BORGES, 2015, p.32

## MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do projeto, utilizou-se uma fonte de alimentação ATX 600 W WiseCase, placa de circuito impresso (Fenolite), sete (07) transdutores de efeito Hall, três (03) transdutores de tensão (LV25-600/SP7) e quatro (04) de corrente (LA55-P), estes transdutores fazem uso do efeito Hall em malha fechada, comparados com os transdutores de malha aberta, estes têm a saída amplificada. O transdutor de corrente utilizado é o LA55-P. No *datasheet*<sup>1</sup> (CURRENT Transducer LA55-P) referente aos transdutores de corrente (Figura 2), é citado que este transdutor possui uma alimentação de  $\pm 12\text{ V}$  ou  $\pm 15\text{ V}$ , suporta corrente primária nominal rms de até 50 A. Seu sinal, obtido no terminal M do transdutor, é senoidal em forma de corrente e varia de 0 mA até 50 mA.

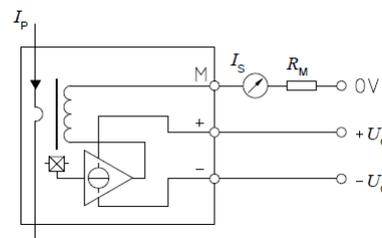
Figura 2 – Transdutor de corrente (LA55-P)



Fonte: CURRENT Transducer LA55-P

Sua conexão é realizada conforme indicado na Figura 3, sendo que Is é o ponto de medição do sinal de saída. Lembrando que, o sinal de saída é em formato de corrente elétrica, assim deve-se colocar um resistor Rm para obter uma tensão de medição Vm.

Figura 3 – Diagrama de funcionamento do LA55-P



Fonte: CURRENT Transducer LA55-P

<sup>1</sup> Datasheet: Ficha de dados.

O transdutor de tensão utilizado é o LV25-600/SP7. No *datasheet* (VOLTAGE Transducer LV25-600/SP7) referente aos transdutores de tensão (Figura 4), é citado que este transdutor possui uma alimentação de  $\pm 12\text{ V}$  ou  $\pm 15\text{ V}$ , suporta tensão primária nominal rms de até  $600\text{ V}$  e corrente nominal primária de até  $5\text{ mA}$ . Seu sinal é obtido no terminal M do transdutor, senoidal em forma de corrente, sendo que o sinal varia de  $0\text{ mA}$  até  $25\text{ mA}$ .

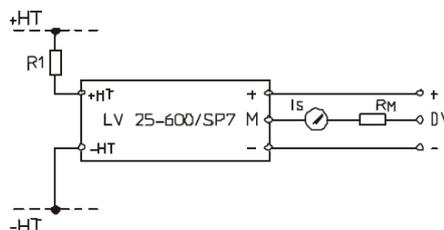
Figura – 4 Transdutor de tensão LV25-600/SP7



Fonte: VOLTAGE Transducer LV25-600/SP7

Sua conexão é realizada como indicado na Figura 5, sendo que Is é o ponto de medição do sinal de saída. Lembrando que o sinal de saída é em formato de corrente elétrica, assim deve-se colocar um resistor  $R_m$  para obter uma tensão de medição  $V_m$ . Neste dispositivo é necessário que a corrente de entrada seja limitada a um máximo de  $5\text{ mA}$ , para que ele não opere fora de sua faixa de atuação, segundo o *datasheet* (VOLTAGE Transducer LV25-600/SP7). Assim, é necessário colocar um resistor  $R_1$  na entrada do dispositivo, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama de funcionamento do LV25-600/SP7



Fonte: VOLTAGE Transducer LV25-600/SP7

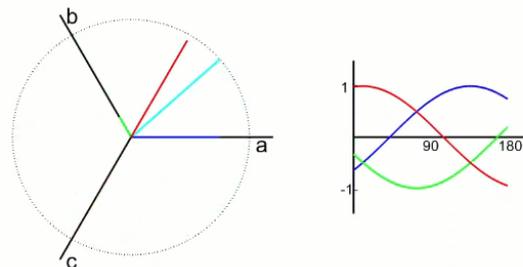
Para ambos os transdutores foram escolhidos alimentação de  $\pm 12\text{ V}$ , além disso, os métodos de medição dos sinais são bem parecidos, através de um ponto Is antes dos resistores  $R_m$ . Foram utilizados valores de resistências de medição e limitadores de corrente, valores de resistores presentes no mercado que estão dentro da faixa recomendada pelo *datasheet* de cada transdutor.

As leituras dos sinais são realizadas através do dispositivo QuantumX, equipamento de aquisição de dados. Estes dados por sua vez são organizados em forma de planilha e enviado para o Matlab, quando estes dados chegam no Matlab são trifásicos e senoidais. Através das transformadas de Clarke e Park pretende-se transformar o sinal de forma que um dispositivo microcontrolador possa lê-lo.

A transformada de Clarke (eixo real = alfa/eixo imaginário = beta), um algoritmo desenvolvido para criar um número complexo (vetor espacial) que gira junto com o campo girante do estator e preserva todas as suas propriedades

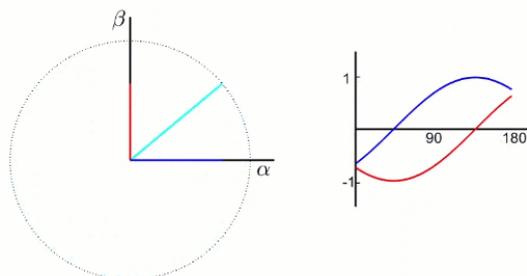
(módulo, frequência e ângulo de fase). O sistema referencial  $\alpha\beta$  é fixo, o objetivo deste vetor é fornecer uma medição do campo girante do estator para utiliza-lo no controlador de torque da máquina (SANTOS, 2015). Com a transformada de Clarke consegue-se transformar um sinal trifásico senoidal no domínio do tempo com orientação abc (Figura 6), em um sinal bifásico senoidal com orientação  $\alpha\beta$  (Figura7).

Figura 6 – Componentes do domínio do tempo de um sistema trifásico (abc)



Fonte: Clarke e Park transforms – MathWorks 2020

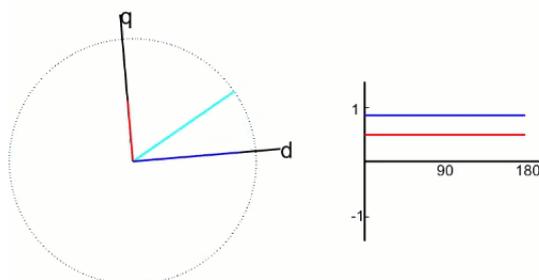
Figura 7 – Sinais resultantes para a transformada de Clarke ( $\alpha\beta$ )



Fonte: Clarke e Park transforms – MathWorks 2020

A transformação para o plano imaginário  $\alpha\beta$  continua gerando duas componentes alternadas senoidais, com isso deve-se aplicar a transformada de Park. A transformada de Park, transforma o sinal bifásico senoidal em um sinal bifásico constante, rotacional síncrono dq (Figura 8). Utilizando um controlador linear é possível realizar a leitura das correntes e tensões em cada uma das linhas, leitura das frequências das fases e os cálculos das potências de cada fase da máquina elétrica (ÖNEL, DALCI, SENOL, 2006).

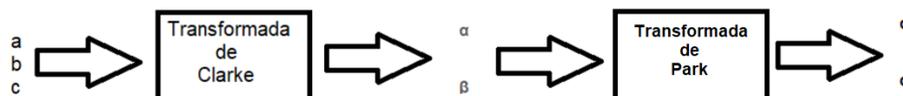
Figura 8 – Sinais resultantes para a transformada de Park (dq)



Fonte: Clarke e Park transforms – MathWorks 2020

Com auxílio de sensores de efeito Hall e das transformadas Clarke e Park, poderá ser criada uma plataforma que será utilizada como forma de calibração e caracterização dos sensores ópticos instalados em motores elétricos. Na Figura 9 pode-se ver uma exemplificação do processo de aplicação das transformadas de Clarke e Park.

Figura 9 – Simplificação da aplicação das transformadas de Clarke e Park



Fonte: Autoria própria

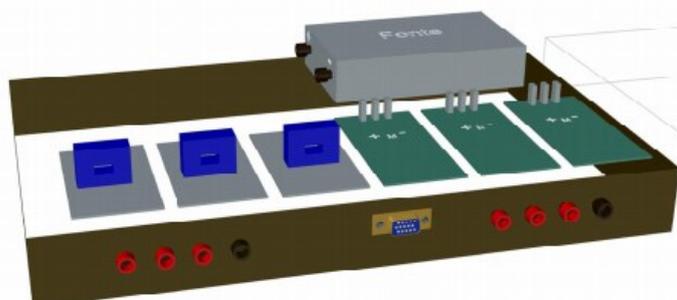
As ligações feitas entre os transdutores de corrente (LA55-P), os sistemas de alimentação e as leituras de sinais são feitas por uma placa de circuito impresso (PCI), a placa desenvolvida no software *Protheus 8 Professional* conta com um plano terra, com o objetivo de diminuir a influência de interferências eletromagnéticas no circuito, distorções e ruídos nos sinais de entrada. O *Protheus 8 Professional* é um software para criação de placas de circuito impressa (PCI).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A montagem da plataforma de sensores de efeito Hall contou com o auxílio do Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba.

A plataforma conta com bornes de entrada e saída, para que ela seja acoplada em série entre a máquina elétrica e a rede de alimentação. A ligação entre os terminais de entrada e os transdutores são feitas internamente na plataforma, de tal modo que ela fosse compacta e tivesse um fácil acesso a seus componentes para possíveis manutenções. Na Figura 10 é apresentado um esquemático da plataforma, desenvolvido como base para sua montagem.

Figura – 10 Esquema de montagem do sistema de medição trifásica



Fonte: Autoria própria – Gustavo Fraga Gehring

Na figura 11, observa-se a plataforma já montada pronta para a realização dos testes em bancada. Faltando apenas a conexão do QuantumX com o sistema de medição e implementação do código no Matlab para a leitura dos dados.

Figura 11 – Sistema de medição trifásica com sensores de efeito Hall



Fonte: A autoria própria

## CONCLUSÕES

Por meio do desenvolvimento deste arranjo experimental, será possível analisar falhas em motores e geradores elétricos, aplicando análise com processamento de dados avançados para o monitoramento em tempo real. Com os transdutores de efeito Hall consegue-se uma medição precisa das correntes e tensões em cada uma das fases, podendo assim, realizar as medições de sua potência, tanto as potências das fases como a potência total da máquina elétrica. Com o Matlab, é possível projetar um gráfico em tempo real destas grandezas, tomando assim, mais fácil sua visualização.

Aprimorando o código do Matlab pode-se ainda realizar uma análise mais apurada, um exemplo disso seria obter as frequências de fases das tensões e corrente da máquina analisada, através dela obtém-se uma gama de possíveis soluções de problemas ainda maior.

O próximo passo é a implementação de uma simulação do projeto em softwares como Proteus ou Matlab, para conseguir ter uma boa noção de seu pleno funcionamento.

Devido a paralisação em função da pandemia do Covid 19 não foi possível realizar testes práticos de monitoramento de motores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES, à FINEP e a Fundação Araucária pela concessão da bolsa e apoio financeiro ao laboratório. Gostaria também de agradecer ao Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) pela oportunidade da inicialização científica.

## REFERÊNCIAS

BEN, Balanço Energético Nacional Ministério de Minas e Energia, Brasília. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>> Acesso em: 01/08/2020.

Conheça as causas de falhas em motores elétricos. *In*: Conheça as causas de falhas em motores elétricos. [S. l.]: Marcos, 2018. Disponível em: <http://www.vibmaster.com.br/falhas-em-motores-eletricos/>. Acesso em: 27 ago. 2020.

EPE, “2018 Statistical Yearbook of electricity 2017 baseline year”, EPE - Empresa de Pesquisa e Energia, out. 2018.

PELEGRIN, J. D. “**Análise e desenvolvimento de técnicas de instrumentação óptica aplicada em máquinas elétricas**”. Qualificação (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Paraná - Brasil, [S. l.] 2020

Glowacz, A.; Glowacz, Z. “Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging,” Elsevier., pp. 7-16 (2016).  
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.003>.

Pelegrim, J. D. et al. “Optical Fiber-Based Sensors for Temperature and Vibration Measurement of Rotating Electric Machines,” **IEEE SENSORS JOURNAL**, Vol 1, NO. 1, February 2020.

GOMES, R. D. “**Redes de sensores sem fio aplicadas ao monitoramento de motores em ambiente industrial**.” 113f. (Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação) Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2012.

Borges, J.C.S. “**Estudo e Desenvolvimento de um Transdutor de Torque para Eixos Rotativos por meio de Sensores de Efeito Hall**.” (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - Brasil – 2015.

Halliday, D; Resnick, R; Walker, J. **Campos Cruzados**: O Efeito Hall. In: HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. Fundamentos de Física. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. III, 2009. Cap. 28, p. 208-209.

FEEDBACK. In: DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7Graus, 2020. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/feedback/>. Acesso em: 06/08/2020.

O QUE é um datasheet de componentes eletrônicos: O que é um datasheet. [S. l.], 20---. Disponível em: <https://athoselectronics.com/o-que-e-um-datasheet/>. Acesso em: 10 ago. 2020.

Current Transducer LA55-P. [S. l.], 3 ago. 2020. Disponível em: [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/la\\_55-p\\_e.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_e.pdf). Acesso em: 30 jul. 2020.

Voltage Transducer LV25-600/SP7. [S. l.], 3 ago. 2020. Disponível em: <https://www.amds4.com.br/datasheets/Tracao%20Eletrica/LV25600SP7.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2020.

QuantumX: Sistema de aquisição de dados universal e distribuível. [S. l.], 20---. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/2128/quantumx-sistema-de-aquisicao-de-dados-compacto-universal/>. Acesso em: 1 ago. 2020.

MATHWORKS: Descrição do produto MATLAB. In: MathWorks: Descrição do produto MATLAB. [S. l.], 20---. Disponível em: [https://la.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html). Acesso em: 3 ago. 2020.

SANTOS, V. **Controle GDSC Aplicado a um Restaurador Dinâmico de Tensão**. Dissertação de mestrado (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015, p. 30 – 33.

Clarke e Park Transforms. [S. l.], 20---. Disponível em: <https://www.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/clarke-and-park-transforms.html>. Acesso em: 30 ago. 2020.

Önel, I.Y.; Dalci, K.B.; & Senol, İ. Detecção de defeitos de rolamentos em motores de indução trifásicos usando redes neurais de função de base radial e transformada de Park. *Sadhana* **31**, 235–244 (2006). <https://doi.org/10.1007/BF02703379>.

Proteus. [S. l.], 20---. Disponível em: <https://www.labcenter.com/>. Acesso em: 2 ago. 2020.



X Seminário de Extensão e Inovação  
XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica  
**23 a 27 de Novembro | Toledo - PR**

