

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS DE CURITIBA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATEUS CARDOZO MAGALHÃES

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS BASEADOS EM REDES  
DE BRAGG PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2020

MATEUS CARDOZO MAGALHÃES

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS BASEADOS EM REDES  
DE BRAGG PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia Elétrica apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Uilian José Dreyer  
Co-orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva

CURITIBA

2020

Mateus Cardozo Magalhães

# Sistema de Aquisição de Sensores Ópticos Baseados em Redes de Bragg para Análise de Vibração em Máquinas Elétricas

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 16 de novembro de 2020.

---

Prof. Antônio Carlos Pinho, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

## ORIENTAÇÃO

---

Uilian José Dreyer, Prof. Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Jean Carlos Cardozo da Silva, Prof. Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Co-Orientador

## BANCA EXAMINADORA

---

Uilian José Dreyer, Prof. Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rosângela Winter, Profa. Dra.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

André Biffe Di Renzo, Me.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Helena e Jackson, e à minha irmã, Marília, por apoiarem desde cedo meus projetos e ambições de natureza pessoal e profissional. Aos meus tios e primos da família Lick que me acolheram desde 2012 aqui em Curitiba.

Aos meus amigos da graduação e externos, principalmente ao Daniel, que me proporcionaram suporte operacional e motivacional durante os meus estudos e na elaboração deste trabalho.

Aos professores da UTFPR do Câmpus Curitiba, especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Uilian José Dreyer e ao meu coorientador Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva por toda a experiência compartilhada e acompanhamento durante a realização deste trabalho.

Ao André Biffe Di Renzo pelas horas dedicadas compartilhando conhecimentos em linguagens de programação e sobre o funcionamento do interrogador óptico.

Ao Rafael Pomorski Linessio por todas as informações compartilhadas sobre vibrações em máquinas elétricas e análise de falhas, e ao Jessé de Pelegrin por disponibilizar o motor instrumentado com os sensores além da ajuda na realização do ensaio.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) da UTFPR por disponibilizar a estrutura física e equipamentos necessários para a realização deste trabalho.

## RESUMO

MAGALHÃES, Mateus Cardozo. Sistema de Aquisição de Sensores Baseados em Redes de Bragg para Análise de Vibração em Máquinas Elétricas. 2020. 62 f. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

Este trabalho descreve um sistema de aquisição para sensores ópticos baseados em redes de Bragg, desenvolvido em linguagem de programação C++ em conjunto com o MATLAB. Por meio da interface gráfica do programa principal é possível comunicar-se e controlar os quatro canais de um interrogador óptico sm130 da *Micron Optics* através de um ou mais clientes em um computador, com o propósito de realizar medições de vibrações em máquinas elétricas. Os subprogramas em MATLAB têm o papel de processar matematicamente esses dados, aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) no sinal discreto para análise de falhas por meio de vibrações no domínio da frequência. O sistema foi validado com a medição de sensores instalados no estator de um motor elétrico em funcionamento. Os resultados são apresentados em formato de gráficos e as discussões avaliam tanto a efetividade como a contribuição que esse sistema poderá trazer ao grupo de pesquisa do Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos da UTFPR.

**Palavras-chave:** Sensores ópticos, redes de Bragg em fibra óptica, sistema de aquisição de sinais em C++, vibração em máquinas elétricas, análise de falha via FFT.

## ABSTRACT

MAGALHÃES, Mateus Cardozo. Acquisition System of Fiber Bragg Grating Based Sensors for Vibration Analysis in Electric Machines. 2020. 62 p. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

This paper describes an acquisition system developed in programming language C++ in conjunction with MATLAB for optical fiber Bragg grating based sensors. The graphical user interface of the main program is capable of communicating and controlling up to four channels of a *Micron Optics* sm130 optical interrogator, in order to perform vibration measurements on electrical machines means one or more clients in a computer. The subprograms in MATLAB process this data mathematically, implementing the Fast Fourier Transform (FFT) on the vibration discrete signal. Then, the failure analysis is performed in the frequency domain. The system was validated by measuring sensors, which are placed on the stator of a running electric motor. The results are presented in graph format and the discussions evaluate both the effectiveness as well the contribution that this system may bring to the research group of Optoelectronic Systems Engineering Laboratory of UTFPR.

**Keywords:** Optical sensors, fiber Bragg grating, C ++ signal acquisition system, electric machines vibration, failure analysis via FFT.

## LISTA DE SIGLAS

<i>ANSI</i>	<i>American National Standards Institute</i>
<i>DFT</i>	<i>Discrete Fourier Transform</i>
<i>DLL</i>	<i>Dynamic Link Library</i>
<i>FBG</i>	<i>Fiber Bragg Grating</i>
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>LAN</i>	<i>Local Area Network</i>
<i>LED</i>	<i>Light-Emitting Diode</i>
<i>TCP/IP</i>	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
<i>UTFPR</i>	<i>Universidade Tecnológica Federal do Paraná</i>

## LISTA DE ACRÔNIMOS

DAELT	Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
LabESO	Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos
<i>MATLAB</i>	Matrix Laboratory



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Criação de um campo girante a partir de um circuito ligado em estrela .....	18
Figura 2 - Barras de um rotor tipo gaiola de esquilo .....	20
Figura 3 - Entreferro assimétrico ao redor do rotor.....	26
Figura 4 - Tipos de Excentricidade.....	26
Figura 5 - Quebra de barras e do anel de um rotor gaiola de esquilo .....	27
Figura 6 - Posição das componentes harmônicas de vibração de um motor de indução com uma barra quebrada ( $k=1$ ) no espectro da frequência de rotação $f_r$ .....	28
Figura 7 - Posição das componentes harmônicas de vibração de um motor de indução com uma barra quebrada ( $k=1$ ) no espectro de duas vezes a frequência da rede $f$ .....	29
Figura 8 - Quatro tipos de desalinhamentos dos elementos rolantes.....	29
Figura 9 - Esquemático da gravação de rede de Bragg por máscara de fase.....	31
Figura 10 - Representação de espectros alterados pelas redes de Bragg .....	32
Figura 11 - Representação de um cordão de FBG multiplexado.....	34
Figura 12 - Informações coletadas do interrogador apresentadas no console .....	37
Figura 13 - Informações sobre erro de conexão .....	39
Figura 14 - Janela Inicial do Sistema de Aquisição .....	40
Figura 15 - Janela de Alteração do IP.....	40
Figura 16 - Janela Principal do Sistema de Aquisição .....	41
Figura 17 - Janela de Configuração do Sistema de Aquisição .....	42
Figura 18 - Resultado da Funcionalidade Leitura Rápida .....	43
Figura 19 - Comparação da variação do comprimento de onda no domínio do tempo devido ao uso do recurso interno de médias do sm130: a) valor em 999; b) valor em 1 .....	45
Figura 20 - Janela do subprograma 1 da funcionalidade “Leitura Espectro” .....	47
Figura 21 - Janela do subprograma 2 da funcionalidade “Leitura Comprimento de Onda” ..	48
Figura 22 - Diagrama de instalação da fibra óptica com 6 sensores FBGs multiplexados ....	49
Figura 23 - Instrumentação do motor com sensores FBGs integrados em compósito de fibra de carbono .....	49
Figura 24 - Visão geral da conexão entre o motor e o computador via interrogador.....	51
Figura 25 - Espectro de reflexão completo. a) Canal 1: FBGs – Invólucro estator sem dente; b) Canal 2: FBGs – Invólucro estator com dente.....	53

Figura 26 - Variação do comprimento de onda do sensor 1 no canal 1 .....	54
Figura 27 - FFT dos sensores FBGs no invólucro sem dente do estator .....	56
Figura 28 - FFT dos sensores FBGs no invólucro com dente do estator.....	57

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Comprimentos de onda dos sensores FBG.....	50
Tabela 2 - Especificações do motor assíncrono .....	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	TEMA.....	13
1.1.1	Delimitação do Tema.....	14
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS .....	14
1.3	OBJETIVOS .....	15
1.3.1	Objetivo Geral .....	15
1.3.2	Objetivo Específicos .....	15
1.4	JUSTIFICATIVA .....	15
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	16
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	MÁQUINAS ELÉTRICAS .....	18
2.1.1	Campo girante em máquinas elétricas trifásicas de corrente alternada .....	18
2.1.2	Máquinas assíncronas ou de indução.....	19
2.2	FALHAS EM MOTORES ASSÍNCRONOS.....	22
2.2.1	Vibração em motores assíncronos .....	23
2.2.1.1	Excentricidade do rotor.....	25
2.2.1.2	Barra quebrada no rotor .....	27
2.2.1.3	Falhas nos rolamentos.....	29
2.3	A FIBRA ÓPTICA COMO SENSOR.....	30
2.3.1	Redes de Bragg.....	30
2.3.2	Sensores FBG .....	32
2.4	TRANSFORMADA DE FOURIER (FFT) EM MATLAB .....	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.1	PROGRAMA PRINCIPAL: AQUISIÇÃO EM C++.....	36
3.2	PROCESSAMENTO DE SINAIS EM MATLAB.....	46
3.2.1	Subprograma 1 – Leitura Espectro .....	46
3.2.2	Subprograma 2 – Leitura Comprimento de Onda.....	47
3.3	PROCEDIMENTOS DE TESTE DO SISTEMA E ENSAIO DE VIBRAÇÃO .....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>52</b>
4.1	RESULTADOS DO ESPECTRO COMPLETO DE REFLEXÃO.....	52
4.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE VIBRAÇÃO.....	53

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
5.1	PROPOSTAS DE CONTINUAÇÃO DE TRABALHO.....	59
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas são equipamentos que deixaram de ser novidade tecnológica há várias décadas e estão praticamente em todos os lugares onde a energia elétrica se faz presente. A difusão delas não só acompanhou, como foi decisiva para atingir o desenvolvimento socioeconômico mundial atual, sendo responsáveis pela maior parte da energia elétrica gerada e do trabalho mecânico realizado, principalmente em indústrias (ERIKSSON, 2008).

Com a contínua expansão da eletrificação, os motores elétricos continuam substituindo aqueles a combustão nas aplicações onde existe necessidade de um suprimento de energia limpa e com maior confiabilidade (ERIKSSON, 2008). Tal confiabilidade deixa de existir quando fatores externos, como poeira e sobrecargas, e inerentes ao equipamento, como envelhecimento, levam a ocorrência de falhas graves (BONNETT; SOUKUP, 1992). Prejuízos maiores poderiam ser evitados a partir de manutenções preditivas baseadas na análise proativa dos comportamentos do motor, que podem ser detectados com o uso de sensores (MAZUR; KAY; MAZUR, 2015).

### 1.1 TEMA

Discretos e de tamanho reduzidos, os sensores são dispositivos eletrônicos que fazem a interface entre o mundo exterior e um determinado equipamento. Por definição, um sensor é um componente capaz de medir, transformando uma determinada característica física, como temperatura, pressão, aceleração e luminosidade referente a fenômenos que o estimulam no meio no qual ele esteja inserido, em sinais elétricos (FRADEN, 2004; SUAREZ, 2000).

Em ambientes industriais os sensores já são de grande importância, contribuindo decisivamente para o aumento da produtividade e da segurança dos processos (JOVER RODRÍGUEZ *et al.*, 2008). Neste contexto, os sensores a fibra óptica vêm sendo empregados nos últimos anos em um número cada vez maior de aplicações. Em alguns casos, podem ser a única alternativa na aquisição de dados, principalmente em locais nos quais os sensores convencionais são de difícil aplicação, seja pela distância de sensoriamento ou pela presença de forte campo eletromagnético. Uma das divisões da técnica empregando sensoriamento óptico é através das redes de Bragg em fibra óptica (PFEIFFER, 2000). Antes que ocorra um dano permanente, este tipo de sensor pode ser aplicado no monitoramento de motores elétricos (LINESSIO, 2017).

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Conforme implementado em trabalhos anteriores como os de Linessio (2017) e Pelegrin (2020) do grupo de pesquisa do Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos da UTFPR (LabESO), os sensores a fibra óptica são capazes de reconhecer mudanças de temperatura e vibração a fim de identificar falhas durante o funcionamento de máquinas elétricas. O foco de estudo deste trabalho é a análise dos sinais de vibração de máquinas elétricas captados por sensores ópticos. Esta análise é realizada a partir do desenvolvimento de um sistema de aquisição de sinais em C++, trabalhando em conjunto com a ferramenta computacional MATLAB, da *MathWorks*.

## 1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

Os sensores com características piezoelétricas (resistiva e capacitiva) são os mais comumente usados para medição de vibração. No entanto, eles apresentam problemas que dificultam tanto a aquisição de valores precisos quanto o monitoramento de vibrações. Exemplos disso é que eles são suscetíveis a interferências eletromagnéticas e a uma grande atenuação de sinal quando precisam ser transmitidos para longas distâncias (GUO *et al.*, 2018). Os problemas citados anteriormente são minimizados quando sensores a fibra óptica são utilizados devido às suas características inerentes: imunidade eletromagnética e baixa taxa de atenuação de sinal, mesmo a longas distâncias (KAUL *et al.*, 2003).

Diversos trabalhos foram realizados dentro do grupo de pesquisa do LabESO usando sensores a fibra óptica (COSTA, 2016; LINESSIO, 2017; PELEGRIN, 2020). Contudo, a aquisição de dados via interrogador óptico é realizada usando principalmente *softwares* de terceiros que requerem uma licença de uso, como é o caso do *Catman Easy* da HBM. Alguns trabalhos dentro do grupo contornaram este problema ao desenvolver novos programas de aquisição usando um ambiente de desenvolvimento gráfico por blocos, o *LabVIEW* da *National Instruments*, para medição de temperatura (RENZO, 2014) e vibração (DOPKER; SCHLOSSMACHER; CASTILHO, 2017). Entretanto, assim como o *Catman Easy*, existe a limitação de quais métodos de análise de sinal podem ser aplicados e da complexidade de implementação usando essas ferramentas. A partir disso, tornou-se inevitável o uso de uma terceira ferramenta computacional licenciada, como o MATLAB, para implementação de métodos mais avançados de processamento de sinal.

Portanto, o programa desenvolvido neste trabalho em linguagem C++ oferece uma alternativa viável ao *Catman Easy* e *LabVIEW* para a análise de vibração em motores elétricos. Durante o desenvolvimento, partiu-se também da premissa de que o uso do MATLAB para o processamento matemático dos sinais não só era necessário, como continuava sendo desejável devido à capacidade e praticidade desta ferramenta.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e aplicar um sistema de aquisição e processamento de sinais provenientes de sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica para análise de vibrações em motores elétricos para aplicação industrial.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Desenvolver um programa computacional principal em C++ capaz de se comunicar com um interrogador óptico, configurá-lo, além de coletar e armazenar os dados lidos pelo equipamento, de forma que possam ser utilizados por um aplicativo de análise de dados;
- Desenvolver dois subprogramas em MATLAB capazes de ler, de modo *off-line*, os dados de sensores e espectro de reflexão armazenados previamente no programa principal e exibi-los graficamente;
- Aplicar e validar o funcionamento do sistema na aquisição de dados de vibração de um motor elétrico instrumentado com sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

Um campo de aplicação possível para os sensores de fibra óptica baseados em Redes de Bragg é no monitoramento e análise de vibrações em máquinas elétricas. A partir da análise, é



possível identificar a ocorrência de defeitos de propriedade elétrica e/ou mecânica (LINESSIO, 2017), buscando resolver o problema antes que ele produza danos irreversíveis ao sistema.

Por meio desta pesquisa, espera-se contribuir com o grupo de pesquisa do LabESO da UTFPR para a criação de um sistema de aquisição e processamento de sinais que facilite a aplicação dos sensores a fibra óptica para análise de vibrações em máquinas elétricas. Desta maneira, os dados poderão ser coletados e trabalhados posteriormente em um aplicativo de análise de dados pelo usuário. O sistema base desenvolvido poderá ser futuramente expandido e personalizado para atender outras demandas específicas do grupo.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização desse trabalho foi dado primeiramente a continuidade na pesquisa sobre o tema proposto. A partir dela é feita uma explanação básica sobre o funcionamento de máquinas elétricas e a causa de vibrações em condições normais de operação, além de como essas vibrações podem se intensificar resultante de uma falta. Na sequência, os conceitos de Sensores a Fibra Óptica baseados em Redes de Bragg são introduzidos.

Finalmente, conceitos e ferramentas computacionais são introduzidos brevemente, como por exemplo a linguagem C++, aplicação de uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) e comunicação por rede Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP). Com base nessas informações, é possível descrever a instrumentação usada para análise do motor. Após a conclusão do estudo teórico, é apresentada a modelagem das rotinas computacionais do sistema usando a linguagem de programação C++ e o MATLAB.

O programa principal, em C++, contém as seguintes características: 1) comunica-se e pré-configura o interrogador óptico disponível no LabESO; 2) possibilita a configuração de alguns parâmetros do interrogador; 3) coleta e armazena dados em arquivos de texto separados; 4) inicializa o segundo subprograma a partir do comando do usuário. No caso dos dois subprogramas em MATLAB, os dados são lidos a partir dos arquivos de texto para visualização dos gráficos de variações de comprimentos de onda de Bragg e de uma faixa do espectro de reflexão.

Com o programa pronto, a sua aplicação na análise de vibrações em máquinas elétricas foi possibilitada, conectando o computador cliente ao interrogador óptico e este recebendo em seus canais os sensores ópticos instrumentados em um motor. Os resultados das aquisições são comparados com os valores teóricos esperados de frequência para operação normal da máquina.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho conta com cinco capítulos e é dividido da seguinte forma:

Capítulo 1 – Apresentação do tema deste trabalho, sua delimitação e justificativa, e definições do objetivo geral e específicos. Descrição da metodologia que é empregada para atingir os objetivos propostos;

Capítulo 2 – Revisão teórica sobre as máquinas elétricas e as causas básicas da vibração de máquinas elétricas. Abordagem dos conceitos sobre o uso de fibra óptica baseadas em redes de Bragg (FBG) como sensor. Identificação das propriedades físicas e ópticas que permitem esse uso, assim como os campos de aplicação, suas vantagens e restrições em relação a outros sensores. Introdução breve de conceitos de programação em C++, FFT e redes TCP/IP;

Capítulo 3 – Descrição e relato do processo de criação do sistema de aquisição computacional para sensores ópticos FBG e dos materiais e métodos utilizados na condução do ensaio de vibração com um motor elétrico para validação do sistema;

Capítulo 4 – Análise dos resultados obtidos durante o ensaio com o programa computacional;

Capítulo 5 – Apresentação das considerações finais baseadas na síntese dos resultados e observações. É discutido o benefício que este novo sistema pode trazer para o grupo de pesquisa e possibilidades para aplicações posteriores.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS

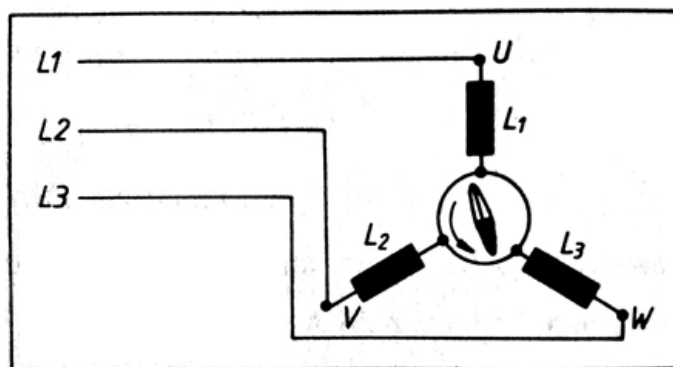
Neste trabalho é dada preferência às máquinas rotativas eletromagnéticas, considerando que elas podem ser descritas sob o conceito de conversores de energia e apresentam princípios teóricos semelhantes: os motores convertem a energia elétrica retirada da rede em energia mecânica girante, enquanto que os geradores, os quais precisam ser acionados por motores a diesel ou turbinas hidráulicas e a vapor, convertem energia mecânica em elétrica. Essas máquinas podem ser divididas de acordo com a sua função e forma de funcionamento nos seguintes grupos (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD, 2006):

- Máquinas de corrente contínua;
- Máquinas síncronas;
- Máquinas assíncronas ou de indução.

#### 2.1.1 Campo girante em máquinas elétricas trifásicas de corrente alternada

Nas máquinas rotativas, a conversão eletromagnética de energia ocorre a partir de alterações no fluxo magnético concatenado em bobinas (FUEST, 1989). A Figura 1 ilustra o esquema elétrico de três bobinas idênticas montadas radialmente, de forma que os seus eixos estejam  $120^\circ$  defasados entre si.

Figura 1 - Criação de um campo girante a partir de um circuito ligado em estrela



Fonte: Fuest (1989)

Ao aplicar uma tensão trifásica alternada nesse sistema, os campos magnéticos individuais das bobinas sobrepõem-se, levando o elemento polarizado magneticamente à rotação. A tensão trifásica alternada gera um campo magnético que rotaciona ao redor do seu eixo, chamado de campo girante.

De acordo com Fuest (1989), a velocidade de giro deste campo é determinada pela frequência elétrica  $f$ . Desta forma uma frequência de 60 Hz corresponderia a 60 rotações por segundo. Se for adicionado mais um sistema com bobinas a este circuito, ou seja, aumentar o número de polos  $p$ , então a velocidade de rotação do campo girante diminui pela metade. A velocidade síncrona  $n_0$  em rpm é determinada pela Equação 1:

$$n_0 = 120 \times f/p \quad (1)$$

### 2.1.2 Máquinas assíncronas ou de indução

As máquinas elétricas assíncronas são compostas por estator e rotor, separados um do outro pelo entreferro e operam a partir da indução de corrente elétrica por um campo eletromagnético girante. A partir disso o campo do rotor tenta se alinhar ao do estator, no caso de um motor. Já em um gerador, o campo do estator tenta se alinhar com o campo do rotor, seguindo o princípio apresentado na Seção 2.1.1. A estrutura de ambos é formada a partir de um empilhamento de chapas delgadas de aço altamente permeável e isoladas entre si, com a finalidade de diminuir perdas por indução de correntes parasitas na estrutura (FUEST, 1989; FITZGERALD, 2006).

O estator é a parte estacionária da máquina e é formado por um cilindro oco repleto de ranhuras, muito similar ao da máquina síncrona. Para melhorar o acoplamento entre as bobinas, conhecidas como enrolamentos de armadura, estas são inseridas nas ranhuras do estator e suas extremidades são conectadas aos terminais da máquina. Sabendo-se que o uso mais comum das máquinas assíncronas é como motor, neste caso os enrolamentos do estator são excitados diretamente com correntes alternadas (FUEST, 1989; FITZGERALD, 2006).

Na parte frontal do estator localizam-se os mancais, onde o rotor encontra-se centrado com os rolamentos. Existem dois tipos de rotores mais comuns: rotor bobinado (ou enrolado) e o rotor gaiola de esquilo. O rotor bobinado carrega um enrolamento trifásico do mesmo número de pares de polos que o estator, onde uma extremidade é conectada no ponto neutro, e a outra é direcionada aos três anéis coletores deslizantes montados sobre o eixo. Sobre os anéis vão as

escovas de carvão que têm a função de estender os terminais do rotor para que sejam disponibilizados no exterior da máquina (FITZGERALD, 2006).

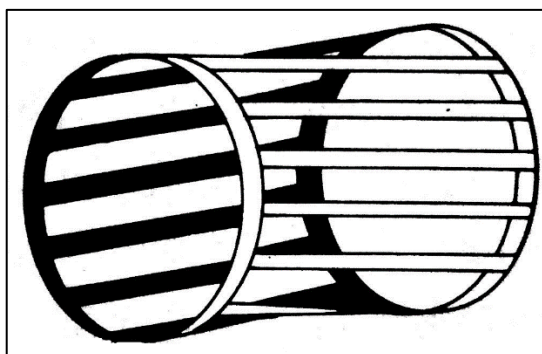
Como no estator, os enrolamentos do rotor estão entre as ranhuras do material ferromagnético e a eles pode ser conectado um resistor trifásico capaz de variar o valor da velocidade de rotação, similar ao que acontece no circuito de armadura de máquinas de corrente contínua. Além disso, este resistor pode ser projetado como um reostato de partida e ser curto-circuitado durante o estado estacionário (FUEST, 1989).

Por outro lado, no rotor de gaiola de esquilo, os enrolamentos do rotor são constantemente curto-circuitados e não são conectados a dispositivos externos. O enrolamento não é feito como o do estator, mas consiste de hastes de alumínio que se cruzam e são fundidas nas ranhuras do rotor por injeção em torno do núcleo. Anéis de curto-circuito feitos do mesmo material conectam as hastes umas às outras nas extremidades (FUEST, 1989; CHAPMAN, 2013).

Nas máquinas de tamanhos maiores, estas hastes e anéis são feitos de cobre ou bronze. Não é necessário isolar os condutores em relação ao núcleo de ferro do rotor, uma vez que as correntes de rotor fluem praticamente apenas na gaiola devido à baixa resistência elétrica dela em relação ao ferro (CHAPMAN, 2013).

A Figura 2 mostra uma representação do sistema de condutores em rotor gaiola de esquilo, caso o cilindro do núcleo de ferro do rotor fosse retirado. É devido a esta disposição dos seus condutores que esse tipo de rotor recebe o nome de gaiola de esquilo (CHAPMAN, 2013).

Figura 2 - Barras de um rotor tipo gaiola de esquilo



Fonte: Fuest (1989)

Como os rotores de gaiola não possuem um número definido de polos, eles podem ser empregados em máquinas com diferentes pares de polos do estator. Além disso, peças que são

bastante suscetíveis a manutenções, como os anéis coletores e as escovas de carvão, não são usadas neste tipo de máquina. Isto, associado à sua construção robusta e simples no formato de gaiola conferem vantagens adicionais e as tornam de uso muito mais comum em relação às máquinas de rotor bobinado. A desvantagem fica por conta da impossibilidade de conectar resistores adicionais para o controle de partida e de velocidade, no entanto isto não costuma ser um fator tão decisivo em suas aplicações (FUEST, 1989).

Em um motor assíncrono do tipo rotor gaiola de esquilo conectado a uma rede trifásica de tensão e frequência constantes, correntes alternadas equilibradas fluem em diferentes direções no estator, mas são deslocadas de fase em  $120^\circ$  uma das outras. Desta forma, o estator dá origem a um campo magnético resultante que gira na mesma frequência da tensão da rede que alimenta a máquina (FUEST, 1989). Este campo girante e o movimento relativo dele com o rotor induzem tensões trifásicas nas bobinas de curto-circuito dos enrolamentos do rotor que originam, conseqüentemente, correntes de curto-circuito com a mesma amplitude defasadas  $120^\circ$  entre si (FITZGERALD, 2006).

As correntes de curto-circuito juntamente com a indução do campo giratório induzem forças sobre o condutor gerando um conjugado que atua sobre o rotor na direção de rotação do campo girante. O momento aplicado causa uma aceleração no rotor sem carga, fazendo o rotor aumentar sua velocidade. À medida que a velocidade aumenta, a frequência com que o campo girante passa pelo rotor diminui, o que reduz também as correntes de curto-circuito do rotor e o torque resultante. Se o rotor a vazio atingir a mesma velocidade do campo rotativo, ou seja, a velocidade síncrona  $n_0$  (conforme Equação 1), o movimento relativo entre os dois torna-se zero e nenhuma corrente passa a ser induzida. Por consequência, o conjugado no rotor desaparece e ele permanece na velocidade síncrona  $n_0$ . Caso o rotor perca velocidade, ele sofre imediatamente uma aceleração ocasionada pelo retorno das correntes de curto-circuito induzidas devido ao movimento relativo em relação ao campo girante (FUEST, 1989).

As considerações teóricas acima desconsideram as perdas e atritos no rotor. Na prática, o rotor sempre tem que aplicar um torque para cobrir as suas perdas. Além disso, sempre há um deslocamento relativo entre o campo girante e o rotor para haver tensão induzida, caso contrário o campo magnético e o conjugado seriam nulos e a máquina perderia velocidade (CHAPMAN, 2013). Apesar do sincronismo entre os fluxos do estator e do rotor, o rotor em si não gira em sincronia com fluxo síncrono do estator. Daí originam-se os termos máquinas assíncronas e de indução, uma vez que as correntes e torques do rotor surgem devido às tensões induzidas no rotor durante a operação assíncrona (FUEST, 1989).

O movimento relativo necessário para o funcionamento da máquina é o chamado escorregamento. O escorregamento fracionário  $s$  é a diferença de velocidade em rpm entre o campo girante  $n_0$  e o rotor  $n$  em relação à própria velocidade do campo girante (velocidade síncrona) como na Equação 2 (FUEST, 1989):

$$s = (n_0 - n)/n_0. \quad (2)$$

Assim, a velocidade síncrona  $n_0$  deve ser sempre superior à velocidade da máquina assíncrona e é proporcional à frequência da rede  $f$  aplicada ao estator em hertz e inversamente proporcional ao número de polos, conforme visto na Equação 1. Por sua vez, a velocidade de rotação do rotor  $n$  é descrita pela Equação 3, enquanto que a frequência de rotação  $f_r$  é descrita pela Equação 4 (FUEST, 1989):

$$n = n_0 - n_0s, \quad (3)$$

$$f_r = n/60. \quad (4)$$

## 2.2 FALHAS EM MOTORES ASSÍNCRONOS

Estatores e rotores de uma máquina elétrica estão sujeitos a diversos tipos de falhas. Essas falhas submetem a máquina a diversas condições como sobreaquecimento e forças desbalanceadas e excessivas de origem eletromecânicas que podem comprometer o funcionamento do motor. Bonnet e Soukup (1992) classifica as causas de falhas estatóricas e rotóricas nos seguintes grupos:

- Térmicas: sobrecargas e envelhecimento;
- Eletromagnéticas: transientes;
- Mecânicas: atritos;
- Ambiental: umidade;
- Residual: construção;
- Dinâmica: operação normal e torques.

O estudo e monitoramento do estado de funcionamento de máquinas elétricas nos processos produtivos tem conquistado uma importância cada vez maior nas indústrias. Existe a

possibilidade de minimizar perdas financeiras na produção causadas pelas paradas de máquinas, quando houver monitoramento aliado com o princípio de manutenção preditiva e preventiva possibilitando detectar e corrigir a origem dos problemas imediatamente (JOVER RODRÍGUEZ *et al.*, 2008; FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015). Os ganhos relativos aos princípios de manutenção preventiva são percebidos no incremento do desempenho geral dos motores apontado pelo autor Bortoni *et al.* (2005).

De forma geral o monitoramento em máquinas elétricas faz um comparativo entre as suas características de funcionamento teóricas e as que são medidas. Existem diversas técnicas de realizar um monitoramento e diagnosticar falhas eletromecânicas, sendo possível usar grandezas físicas como corrente, temperatura, velocidade, dentre outras (JOVER RODRÍGUEZ *et al.*, 2008).

No guia de diagnóstico publicado por Finley, Sauer e Loutfi (2015), sugere-se que os procedimentos de análise devem levar em conta os desbalanceamentos de natureza elétrica e mecânica, ressonâncias e velocidades críticas, efeitos mecânicos causados por atritos e rolamentos, bem como efeitos externos causados por desalinhamento ou falta de robustez nas bases. A partir daí podem ser eliminadas as causas que não são aplicáveis com base nos dados coletados, até que a causa raiz seja determinada (FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015). Na seção 2.2.1 é explicado como a vibração do motor assíncrono pode auxiliar a identificação de causa para essas falhas.

### 2.2.1 Vibração em motores assíncronos

Para que o motor assíncrono apresente níveis adequados de vibração, valem os mesmos requisitos de máquinas mecânicas. Isso significa que os seus componentes, ou seja, o eixo mecânico, os rolamentos e o próprio rotor devem estar devidamente balanceados. Problemas nesses componentes alteraram os padrões de vibração e reduzem a confiabilidade das máquinas (COSTELLO, 1990; FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015).

Contudo, um diagnóstico que parte dos princípios eletromagnéticos e mecânicos associados aos movimentos dos motores assíncronos e seus padrões de vibração é bastante complexo quando comparado ao diagnóstico de máquinas puramente mecânicas. A dificuldade de encontrar a causa raiz de uma falha deve-se aos seus aspectos construtivos e às frequências das forças eletromagnéticas serem normalmente próximas dos múltiplos da frequência da velocidade mecânica (COSTELLO, 1990).



Assim, pesquisas nesta área podem contribuir com o desenvolvimento de métodos de monitoramento que sejam mais adequados e vantajosos para uma determinada aplicação. Se os procedimentos de diagnóstico corretos forem empregados na coleta dos dados e houver conhecimentos sobre a construção e o funcionamento das máquinas elétricas, a causa raiz da falha eletromecânica pode ser determinada de maneira precisa. Caso contrário, poderão ser tomadas ações de correção e conclusões precipitadas, estendendo o tempo necessário para correção. Nesse processo, o motor poderá sofrer danos sucessivos, levando a uma perda de produção e prejuízos financeiros ainda mais significativos (JOVER RODRÍGUEZ *et al.*, 2008; FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015).

Diversos tipos de falhas podem coexistir gerando forças eletromecânicas que mudam o padrão de vibração dos motores. Se um motor assíncrono for alimentado com uma tensão senoidal de frequência  $f$ , então os dois principais múltiplos de frequência das forças eletromagnéticas serão de  $f$  e  $2f$ . A segunda componente harmônica da fundamental da rede ( $2f$ ) é mais preocupante, pois é extremamente sensível ao nivelamento e à rigidez da estrutura do motor e à excentricidade do rotor, e resulta da combinação de duas forças: uma componente principal intrínseca e uma componente secundária de força gerada por um defeito ou imperfeição construtiva (COSTELLO, 1990; FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015).

A força intrínseca é decorrente da atração magnética característica entre o rotor e o estator e só depende da frequência de alimentação da rede. Esta força não depende da carga, porque à medida que a carga aumenta, a corrente no estator aumenta simultaneamente com a corrente do rotor, portanto a corrente de uma, tende a balancear a ação da outra. Apenas a amplitude é afetada e é inversamente proporcional ao número de polos em virtude da distância angular entre eles. Em compensação, as fontes da componente secundária de força são atreladas a atritos, componentes soltos dentro do motor ou componentes desalinhados (COSTELLO, 1990; FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015).

Em virtude dessas variáveis, é recomendável que ensaios de vibração sejam realizados com testes tanto a vazio quanto em plena carga. Mesmo que as forças eletromagnéticas de  $2f$  dependam da fonte de alimentação, o aumento de temperatura proporcionado pelo aumento da carga pode alterar as dimensões do motor e, por consequência, o valor da força. Além disso, os níveis de vibração não são necessariamente constantes ao longo do tempo (COSTELLO, 1990; FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015). Para corrigir isso, Finley, Sauer e Loutfi (2015) sugerem que a duração dos testes sejam de 10 a 15 minutos de forma contínua para criar uma modulação do sinal de vibração e determinar pontos extremos de amplitude.

Nas seções a seguir são enumerados alguns tipos principais de falhas de origem mecânicas e residuais.

### 2.2.1.1 Excentricidade do rotor

Um problema que não necessariamente causa um dano imediato, mas que tem o potencial de progredir e gerar uma falha mais grave em máquinas assíncronas é o de excentricidade. Apontado por Jover Rodríguez *et al.* (2008) como uma das causas de falhas mais comuns nesse tipo de máquinas, excentricidades justificam o monitoramento de vibrações em máquinas elétricas, já que permitem a prevenção de danos ao estator e ao rotor e perdas de eficiência decorrentes de atritos e aumento de ruídos e vibrações (JOVER RODRÍGUEZ *et al.*, 2008). Os ruídos causados por essas vibrações tendem a ser mais perceptíveis durante operação a plena carga do que a vazio (BONNETT; SOUKUP, 1992).

Um rotor sem excentricidade está numa posição simétrica em relação ao estator e/ou aos rolamentos. Isso significa que as distâncias do entreferro que separam esses componentes são iguais ao redor do rotor, conseqüentemente, as forças eletromagnéticas estarão balanceadas. Caso contrário, a diferença entre as distâncias ao logo do entreferro resultará em forças eletromagnéticas de intensidades diferentes. A Equação 5 demonstra que a força em certo ponto é dada pelo quadrado do fluxo magnético  $B$  dividido pela distância do entreferro  $d$  (FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015):

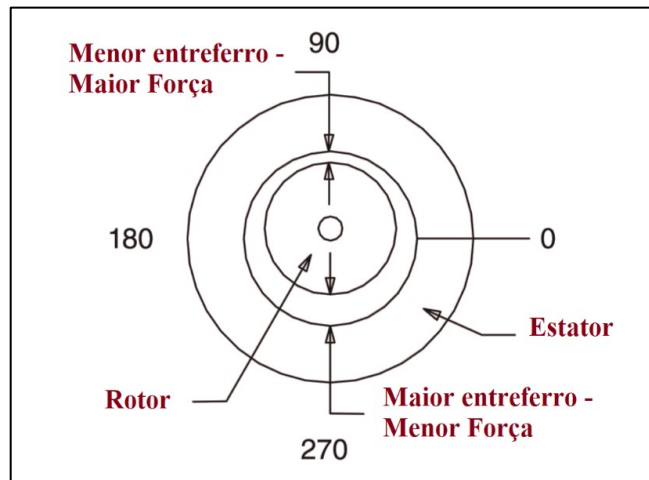
$$F \approx B^2/d. \quad (5)$$

A intensidade das forças eletromagnéticas nos pontos de maior e menor força ou de menor e maior entreferro são representadas, respectivamente, na Figura 3. Bonnet e Soukup (1992) listam alguns tipos de excentricidade, dentre elas, a excentricidade estática, a excentricidade dinâmica e a possibilidade de combinação entre as duas.

Ao contrário do que acontece em um motor sem excentricidade (Figura 4a), na excentricidade estática o centro de rotação do rotor está desalinhado em relação ao centro do estator a uma distância fixa (Figura 4b). Já a excentricidade dinâmica acontece quando a posição de giro do rotor dentro do estator não é concêntrica, ou seja, o eixo do rotor não coincide com o eixo do estator e gira entorno deste (Figura 4c). Isto faz com que a força eletromagnética resultante entre os dois seja diferente de zero e que o ponto de menor distância do entreferro

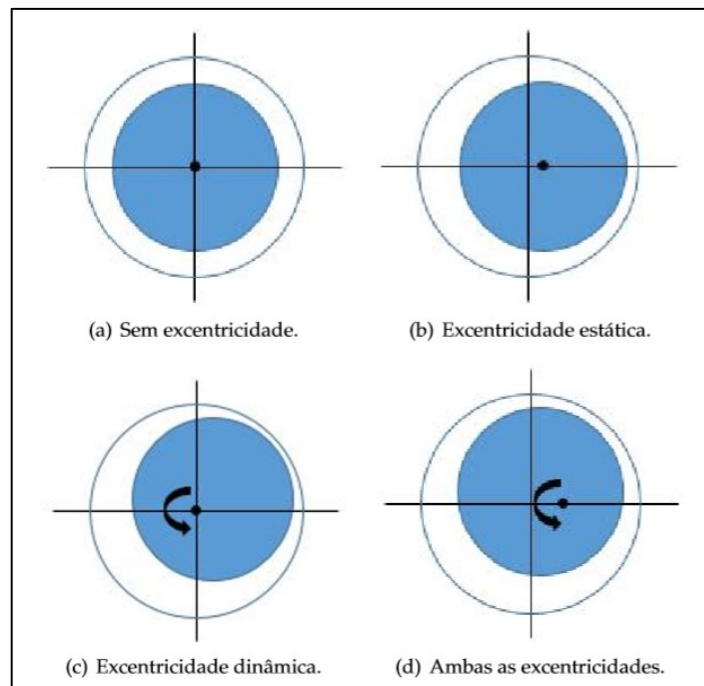
varie junto (FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015). A combinação entre estática e dinâmica resulta na excentricidade mista (Figura 4d), onde o centro de rotação está desalinhado em relação ao centro do estator e este centro não coincide com o centro do núcleo do rotor (BONNETT; SOUKUP, 1992; JOVER RODRÍGUEZ *et al.*, 2008). Segundo Costello (1990), o requisito de tolerância empregada no processo de fabricação requer que o desvio máximo da excentricidade não seja maior que 5% em relação à média da distância.

Figura 3 - Entreferro assimétrico ao redor do rotor



Fonte: Adaptado de Finley, Sauer e Loutfi (2015)

Figura 4 - Tipos de Excentricidade



Fonte: Assunção (2014)

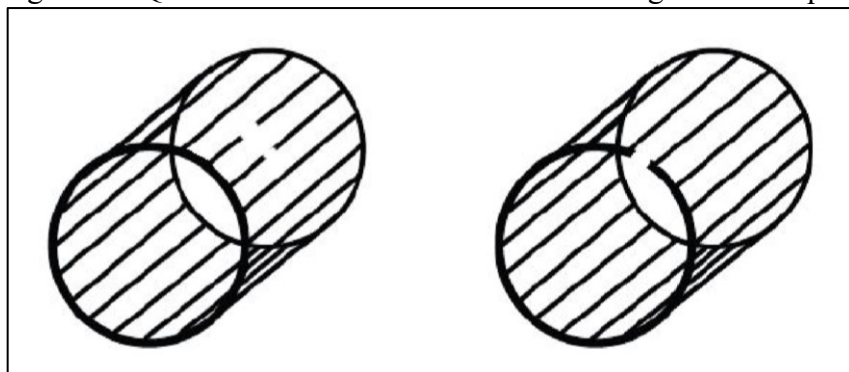
Portanto, as forças eletromagnéticas presentes no ponto de menor entreferro apresentam maior amplitude devido ao desbalanceamento entre os pares de polos e tentam repelir o rotor na direção em que ele se tornaria em equilíbrio. Esta força de repulsão pode ser analisada como um fasor que produz componentes de vibrações adicionais àquela de frequência  $f_r$  produzida por uma máquina operando normalmente. Essas componentes são derivadas da frequência de rotação e da frequência da rede e apresentam padrões variados de ciclos:  $2f_r$ ,  $2f \pm f_r$ ,  $2f \pm 2f_r$  (JOVER RODRÍGUEZ *et al.*, 2008).

Uma consequência grave decorrente de uma excentricidade mais agressiva é o contato entre rotor e estator. Mesmo que, dependendo do nível de contato, a máquina possa operar por algum tempo com este defeito, o atrito pode fazer com que o núcleo do laminado do estator deteriore o isolamento dos enrolamentos da bobina, o que pode gerar pontos de curto e aumento excessivo da corrente e da temperatura dos condutores, principalmente durante a partida (BONNETT; SOUKUP, 1992).

#### 2.2.1.2 Barra quebrada no rotor

A quebra ou diminuição da resistência de uma ou mais barras de um rotor gaiola esquilo, como a da Figura 5, tem efeito de desbalanceamento semelhante ao que acontece na excentricidade. Quando isto acontece, o campo criado pelo rotor fica assimétrico, devido à falta de circulação de corrente nas barras, o que torna diferente as forças eletromagnéticas ao redor do rotor. No caso da alteração da resistência, a barra ainda apresenta sobreaquecimento, o que pode resultar em uma alteração física no rotor que o torna excêntrico (FINLEY; SAUER; LOUTFI, 2015):

Figura 5 – Quebra de barras e do anel de um rotor gaiola de esquilo



Fonte: Trigeassou (2011).

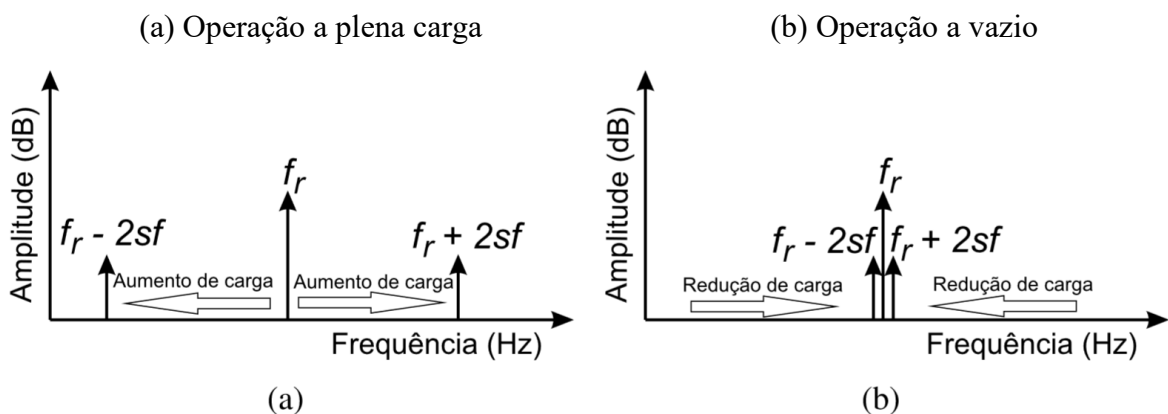
Sob essas condições, no espectro de vibração do motor na frequência do rotor e de duas vezes a frequência da rede existem combinações da componente fundamental e das componentes harmônicas de falta. Para o caso de uma barra quebrada ( $k=1$ ), uma componente harmônica gira no sentido horário e a outra gira num sentido anti-horário, ambas a uma frequência angular proporcional ao escorregamento  $s$  do rotor. As frequências harmônicas no espectro de rotação  $f_{bfr}$  e no espectro de duas vezes a fonte de alimentação  $f_{b2f}$  são dadas pelas Equações 6 e 7 respectivamente (FILIPPETTI; FRANCESCHINI; TASSONI, 1996; CEBAN *et al.*, 2012):

$$f_{bfr} = f_r \pm 2ksf, \quad (6)$$

$$f_{b2f} = (1 \pm ks)2f, \quad (7)$$

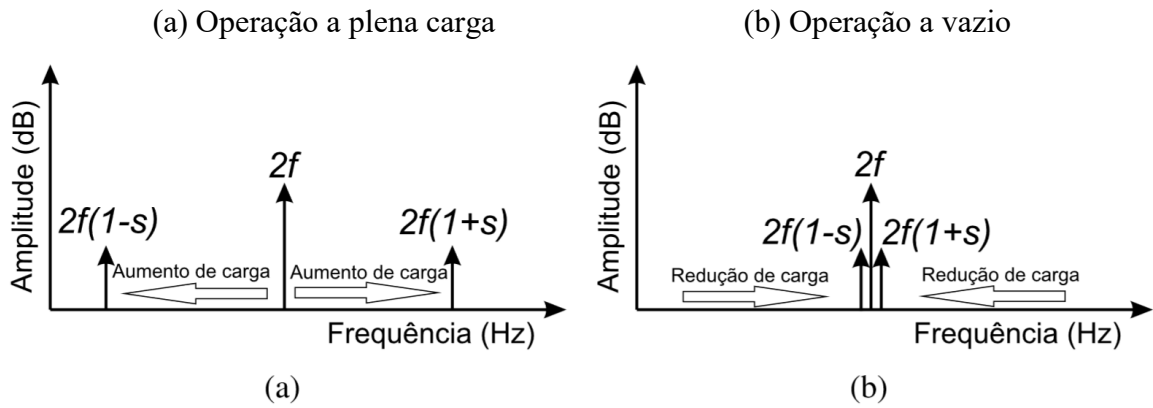
onde  $f_r$  é a frequência de rotação do rotor,  $s$  é o escorregamento,  $f$  é a frequência da rede e  $k$  é a quantidade de componentes harmônicas consideradas ( $k = 0,1,2,3 \dots$ ). À medida que a carga aumenta ou diminui, o valor do escorregamento varia proporcionalmente. Por consequência, as bandas laterais podem se afastar (Figuras 6a e 7a) ou se aproximar da componente fundamental (Figuras 6b e 7b):

Figura 6 – Posição das componentes harmônicas de vibração de um motor assíncrono com uma barra quebrada ( $k=1$ ) no espectro da frequência de rotação  $f_r$



Fonte: Costa (2016)

Figura 7 – Posição das componentes harmônicas de vibração de um motor assíncrono com uma barra quebrada ( $k=1$ ) no espectro de duas vezes a frequência da rede  $f$

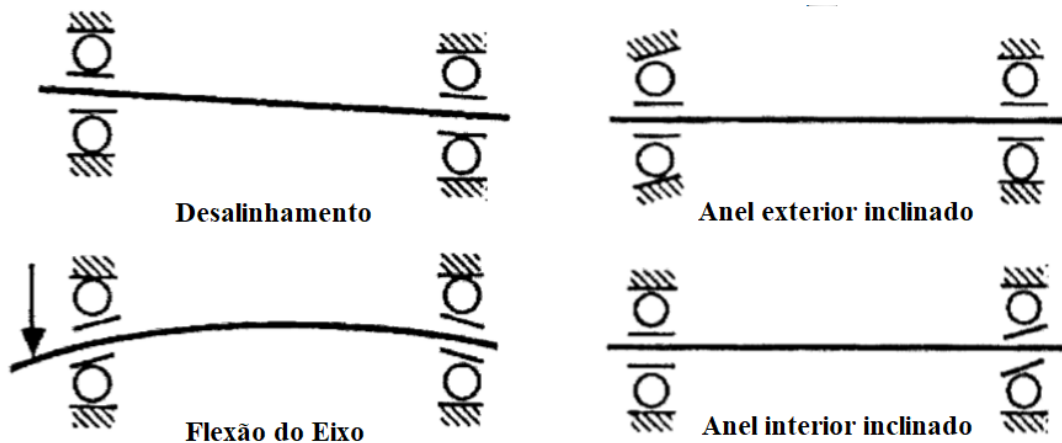


Fonte: Costa (2016).

### 2.2.1.3 Falhas nos rolamentos

Outros defeitos comuns em motores assíncronos e que também podem contribuir com as vibrações são aqueles relacionados com os rolamentos. Uma instalação inadequada desses rolamentos resulta em defeitos, tais como desgastes por atrito dos elementos rolantes ou desalinhamento dos rolamentos. Alguns destes defeitos estão ilustrados na Figura 8:

Figura 8 - Quatro tipos de desalinhamentos dos elementos rolantes



Fonte: Adaptado de Schoen *et al.* (1995).

Os desalinhamentos acima criam deslocamentos mecânicos que alteram a distância do entreferro, afinal são os rolamentos que são responsáveis por suportar fisicamente o rotor. Essa distância variável contribui com a vibração causando variações no fluxo magnético que circulam no entreferro (BENBOUZID, 2000).

### 2.3 A FIBRA ÓPTICA COMO SENSOR

Sensores a fibra óptica vêm sendo utilizados em um número cada vez maior de aplicações, o que se tornou possível a partir do avanço da tecnologia dos sistemas ópticos. Eles apresentam características vantajosas na medição de temperatura e deformação em relação aos sensores convencionais como tamanho reduzido, imunidade a fortes campos eletromagnéticos, possibilidade de multiplexação e transmissão das informações a longas distâncias com baixa perda (KERSEY *et al.*, 1997).

Contudo, sensores a fibra óptica ainda não são tão difundidos comercialmente, mesmo com todas as vantagens citadas. Segundo Kersey *et al.* (1997), a razão é que o mercado atual de sensores convencionais, como os transdutores capacitivos e piezoelétricos, é bem consolidado e duradouro e já se mostraram ser bem confiáveis e baratos para as aplicações atuais. Entretanto, os sensores a fibra óptica têm a capacidade de rivalizar com as tecnologias já estabelecidas em aplicações onde o seu uso seja indispensável, devido às suas propriedades. Neste caso, uma das técnicas de sensoriamento óptico que apresenta essa aptidão é aquela que utiliza uma fibra óptica baseada em redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Gratings*). Nas próximas seções são apresentados os conceitos envolvidos nesta técnica e suas aplicações.

#### 2.3.1 Redes de Bragg

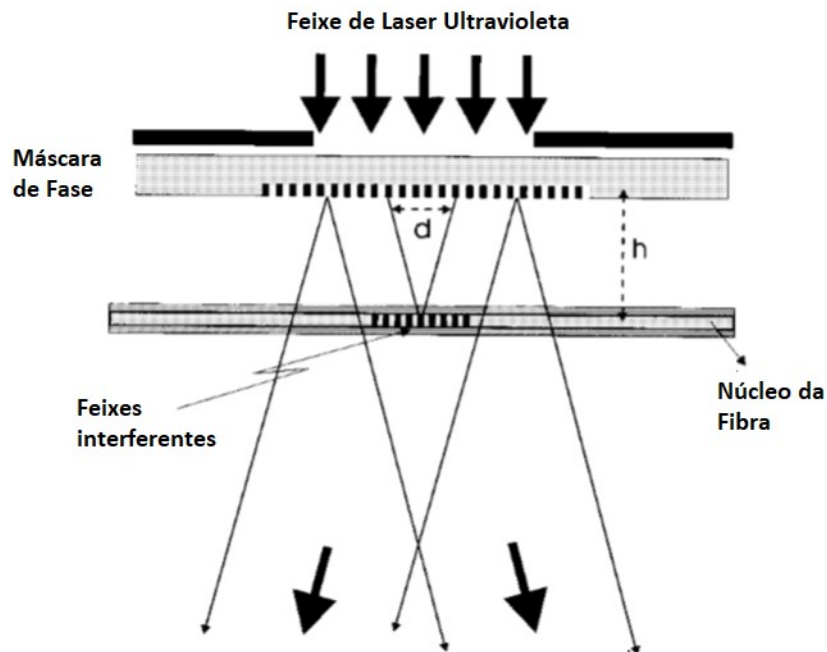
A base da técnica de sensoriamento utilizando redes de Bragg está na descoberta de um fenômeno fotossensível em uma fibra óptica com núcleo de sílica dopada com germânio. Em 1978 no *Communication Research Center* no Canadá, Hill e a sua equipe relataram essa descoberta a partir da fabricação de um filtro óptico de baixas perdas por meio da excitação de uma fibra de sílica. Isso foi feito expondo o núcleo da fibra a um laser de argônio no comprimento de onda de 488 nm por tempo prolongado, o que gerou uma perturbação periódica permanente do índice de refração no núcleo dessas fibras (HILL *et al.*, 1978, 1993).

Para Othonos (1997), ocorreu uma revolução nos campos das telecomunicações e da tecnologia de sensores baseados em fibra óptica devido à descoberta da capacidade de inscrever perturbações periódicas no núcleo de fibras fotossensíveis. A essas perturbações, dá-se o nome de redes de Bragg.

Para realizar a gravação de redes de Bragg é necessário modular e inscrever periodicamente no núcleo da fibra a uma escala micrométrica. Entre as técnicas de gravação existem as técnicas ponto a ponto, a interferométrica e a de máscara de fase, sendo esta última bastante efetiva e contribuiu por facilitar a fabricação das redes (HILL *et al.*, 1993; OTHONOS, 1997).

A Figura 9 apresenta o esquemático de uma gravação por máscara de fase. Esse método consiste em utilizar ferramentas chamadas de máscara de fase para gravar cada comprimento de onda de Bragg desejado. A máscara será posicionada adjacente à fibra óptica, com a função de modular a fase do feixe de um laser UV. Após a modulação, dois feixes de ordens -1 e +1 irão se sobrepor causando uma interferência sobre o núcleo da fibra.

Figura 9 - Esquemático da gravação de rede de Bragg por máscara de fase



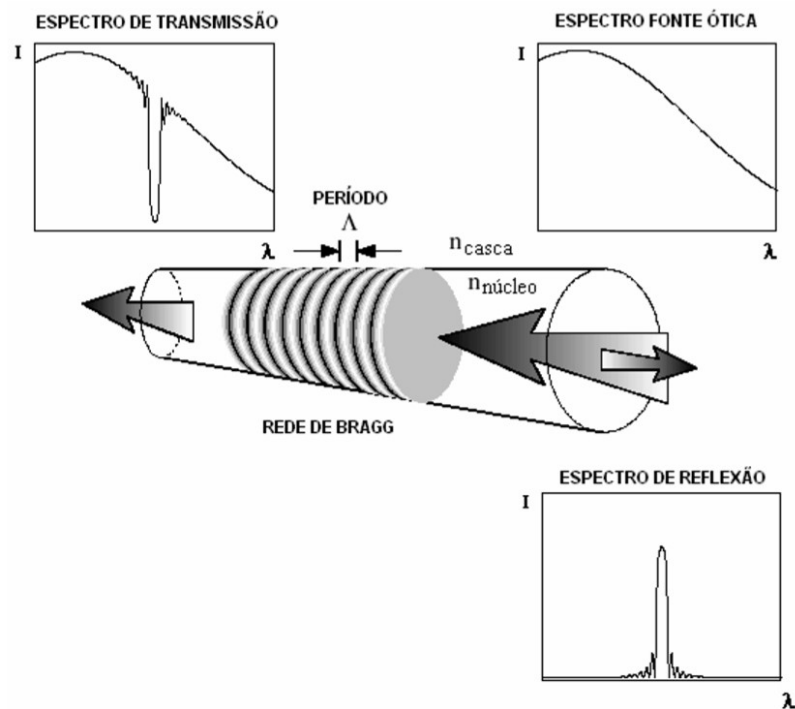
Fonte: Adaptado de Othonos (1997)

A existência da modulação periódica provoca uma reflexão seletiva e atua como um espelho sobre uma banda do comprimento de onda de um feixe de luz aplicado à fibra. Esta luz será refletida ao longo do núcleo por cada plano da rede, como apresentado na Figura 10. Ainda



nesta figura, é possível perceber o efeito da reflexão ao comparar o espectro da fonte óptica com o de transmissão. A resposta do sistema é mostrada no espectro de reflexão, onde o comprimento de onda  $\lambda_B$  que satisfaz a condição de Bragg é centrado na banda refletida, ou seja, ele localiza-se na região de máxima amplitude do espectro de reflexão (KERSEY, 1997).

Figura 10 - Representação de espectros alterados pelas redes de Bragg



Fonte: Adaptado de Silva (2005)

O comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B$  é regido pela Equação 8, onde  $\eta_{eff}$  é o índice de refração efetivo do núcleo e  $\Lambda$  representa a distância entre dois pontos de máxima intensidade, ou também chamada de periodicidade espacial da rede (KERSEY, 1997):

$$\lambda_B = 2\Lambda\eta_{eff}. \quad (8)$$

### 2.3.2 Sensores FBG

Na época da publicação do artigo em 1993, Hill e sua equipe já reconheciam a sensibilidade das redes de Bragg em relação às condições do ambiente. Foi detectada sobretudo uma maior sensibilidade às variações de temperatura e aos esforços mecânicos aplicados.

Apesar disso, apenas as possíveis contribuições à área dos sistemas de telecomunicação foram previstas pela equipe inicialmente (HILL *et al.*, 1978).

Em contraponto, a maior parte do desenvolvimento das FBGs atualmente está concentrada em explorar como sensores os efeitos fotoelástico e termo-ópticos, observados na variação do comprimento  $\lambda_B$ . A variação deste parâmetro é causada por deformações mecânicas  $\Delta l$  e pela variação da temperatura  $\Delta T$ , sendo regida pela Equação 9 (KERSEY, 1997):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial\eta_{eff}}{\partial l} + \eta_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial\eta_{eff}}{\partial T} + \eta_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (9)$$

O comprimento de onda  $\lambda_B$ , ou seja, a variável usada para determinar os valores de deformação e temperatura é um parâmetro absoluto na FBG. Isso significa que ele não depende diretamente dos níveis de luz da fonte óptica, nem é afetado por perdas de acoplamento ou de conexão. Essa capacidade intrínseca de auto referência garante aos sensores a FBG uma grande vantagem comparados com sensores convencionais (KERSEY, 1997).

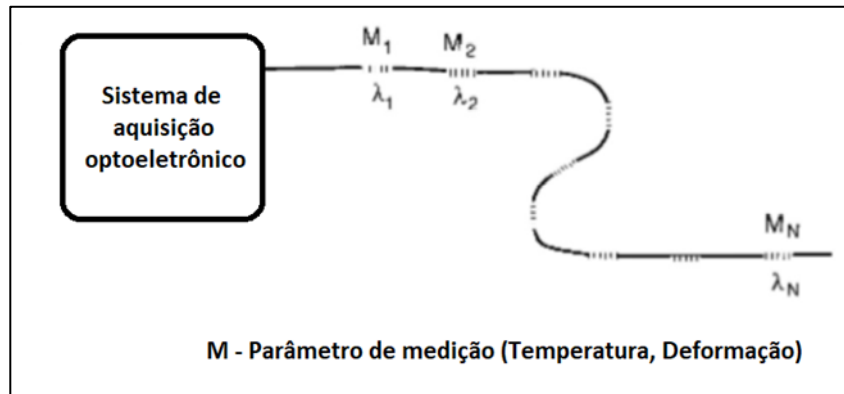
A natureza do comprimento de onda de Bragg possibilita a multiplexação das FBGs, o que permite que cada sensor seja atribuído a uma faixa diferente do espectro disponível da fonte, e que esta faixa possa ser atribuída a um local espacial específico (OTHONOS, 1997). A multiplexação pode ser usada para suprir umas das maiores limitações dos sensores a FBG indicada pela Equação 9: a sensibilidade simultânea à temperatura e às deformações. A sensibilidade pode ocasionar problemas em sensores criados para monitorar deformações, já que a mudança de temperatura ao longo da fibra também interfere no comprimento de Bragg (KERSEY, 1997).

Para diferenciar os efeitos de mudança de temperatura ou deformação pode ser usado um cordão de FBG multiplexado como o da Figura 11. Neste caso, o cordão pode ser instrumentado de tal forma que M1 e M2 possam sofrer variação de temperatura semelhante, o que compensaria a consequente variação do comprimento de onda de Bragg  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ . Mantendo-se uma delas estável, é possível usar a diferença entre elas como indicador de deformação (KERSEY, 1997).

As possibilidades de aplicação reais em campo das FBGs são muitas. Elas podem ser usadas, por exemplo, na área de sensoriamento embarcado de estruturas, onde os dados de temperatura e esforços mecânicos, incluindo vibrações, são coletados e monitorados em tempo real. Isso pode ser realizado ao aplicar FBGs multiplexadas, acoplando-as aos materiais

constituintes da estrutura. Outras opções viáveis é o sensoriamento de fenômenos químicos, de pressão e o uso como acelerômetro (KERSEY, 1997).

Figura 11 - Representação de um cordão de FBG multiplexado



Fonte: Adaptado de Kersey (1997)

Este trabalho tem o seu foco apenas no uso da FBG para medição de vibrações, tendo destaque a frequência de variação do primeiro termo da Equação 9. Para realizar a análise dos sinais de vibração enviados pelos sensores FBG, o sistema faz uso de uma ferramenta matemática implementada computacionalmente descrita na seção seguinte.

#### 2.4 TRANSFORMADA DE FOURIER (FFT) EM MATLAB

Na área de processamento de sinais, a análise de frequências é de fundamental importância por apresentar benefícios em relação à análise temporal de um sistema capaz de ser descrito por equações diferenciais lineares. Mesmo que algumas amplitudes e fases possam ser diferentes, as frequências para esse tipo de sistema são invariantes. Dessa forma, uma análise feita a partir da decomposição do sinal no tempo em frequências a partir da Transformada de Fourier é muito importante para o processamento de sinais (GOOD, 1997), como aqueles dos sensores ópticos para estudo de vibrações.

Em sinais que são descontínuos, finitos e igualmente espaçados, como é o caso de amostras resultantes de um sistema de medição, existe a possibilidade de aplicar a transformada de Fourier. Uma técnica usada por Euler e por Gauss chamada de circularização consiste em manipular dados não necessariamente periódicos ao adicionar zeros nos intervalos infinitos à esquerda e à direita que não fazem parte da medição, criando um período suficientemente grande de forma artificial. Esta técnica resultou na Transformada Discreta de Fourier (DFT) de

um vetor  $X[j]$  de tamanho  $N$  para outro vetor  $Y[k]$ , onde  $j = k = 0, 1, \dots, N - 1$  (GOOD, 1997). A definição desta técnica é descrita na Equação 10, com  $W_n = e^{(-2\pi i)/N}$ .

$$Y[k] = \sum_{j=0}^{N-1} X[j] W_N^{(j-1)(k-1)} \quad (10)$$

Para fazer o cálculo desta transformada, o MATLAB usa um algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para examinar as componentes de frequência de um sinal com taxa de aquisição  $F_s$  e duração  $t$  conhecidas usando o programa, é necessário armazenar o resultado da FFT desse sinal em uma matriz  $Y$ , com  $L = F_s \cdot t$ , e calcular o espectro bilateral  $P2[F_s]$  a partir dos valores absolutos de  $Y$  em relação a  $L$  (Equação 11). Então, o vetor do espectro unilateral  $P1[F_s/2 + 1]$  recebe valores de  $P2$  conforme Equação 12 (MATLAB, 2020).

$$P2 = |Y/L| \quad (11)$$

$$P1 = p1_r = \begin{cases} p2_r, & r = 1 \text{ e } r = F_s/2 + 1 \\ 2 \times p2_r, & 2 \leq r \leq F_s/2 \end{cases} \quad (12)$$

Outros trabalhos dentro do grupo de pesquisa do LabESO analisaram a FFT dos sinais de vibração de sensores FBG em estatores de motores por meio do *LabVIEW* (DOPKER; SCHLOSSMACHER; CASTILHO, 2017) e de um acelerômetro óptico biaxial por meio da *Catman Easy* (LINESSIO, 2017). Assim, é possível verificar pelo valor da amplitude quais são as componentes de frequência que mais contribuem com o sinal. Como visto na Seção 2.2.1, essas componentes dependem da quantidade de polos do motor, da frequência elétrica da rede e das avarias presentes nessas máquinas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os métodos utilizados para a criação das rotinas computacionais do sistema de aquisição proposto para sensores ópticos baseados em redes de Bragg. Também são apresentados os equipamentos e técnicas utilizadas no ensaio de vibração usando o sistema em um motor elétrico assíncrono, instrumentado com sensores FBG.

#### 3.1 PROGRAMA PRINCIPAL: AQUISIÇÃO EM C++

O programa principal foi desenvolvido na linguagem C++ usando o *Windows Forms* do ambiente de desenvolvimento *Microsoft Visual Studio Community 2017* e é responsável pela comunicação, configuração, coleta e armazenamento de dados de um interrogador óptico. O *Windows Forms* é uma ferramenta que facilita a criação de interfaces gráficas por meio de um posicionamento intuitivo de objetos na janela. O interrogador óptico usado neste trabalho é o modelo sm130 da *Micron Optics*, próprio para realizar medições de vários sensores FBG a altas taxas de aquisição de até 1.000 Hz e próprio para uso em campo e industrial (MICRONOPTICS, 2012).

Como ponto de partida, foram utilizados *drivers* e exemplos do modelo sm130 que estavam disponíveis na seção de suporte no *website* da fabricante. A pasta de arquivos compactados que foi empregada chama-se “sm130 Visual Basic & C++ Examples”, contudo a página de suporte não estava mais disponível no momento da publicação deste trabalho. O exemplo em C++ contido nesta pasta apresenta as funções básicas de conectar o interrogador, enviar um comando, ler os dados de um único instante medidos pelo interrogador e apresentá-los na tela em uma janela de console, como o da Figura 12. Por padrão, são apresentadas informações como o número serial do interrogador, o número de sensores detectados em cada um dos canais, o comprimento de onda de Bragg associado a cada sensor detectado, dentre outras. Após realizar esta tarefa, o programa desconecta-se automaticamente do interrogador.

Figura 12 – Informações coletadas do interrogador apresentadas no console

```
Serial number - 1554750422
Timestamp (usec) - 5898241
Timestamp (sec) - 36045
Buffers - 98
Granularity: 1000000
DUT1, sensor # 1 = 1544.121850
DUT4, sensor # 1 = 1526.326926
DUT4, sensor # 2 = 1527.502349
DUT4, sensor # 3 = 1528.369285
DUT4, sensor # 4 = 1529.150153
DUT4, sensor # 5 = 1529.995207
DUT4, sensor # 6 = 1531.111492
DUT4, sensor # 7 = 1533.214430
DUT4, sensor # 8 = 1535.705279
sm130 socket disconnected
Process returned 0 (0x0)   execution time : 3.060 s
Press any key to continue.
```

Fonte: O Autor (2019)

Existe uma grande quantidade de comandos que podem ser enviados para o interrogador e estão listados no manual do fabricante, mas os principais comandos de leitura da medição são os seguintes (MICRONOPTICS, 2012):

1. #GET\_DATA
2. #GET\_DATA\_AND\_LEVELS
3. #GET\_UNBUFFERED\_DATA
4. #GET\_UNBUFFERED\_DATA\_AND\_LEVELS
5. #GET\_SPECTRUM
6. #GET\_HIGH\_SPEED\_FS

Em síntese, os comandos 1, 2, 3 e 4 acima são capazes de coletar os comprimentos de onda relativos aos picos de reflexão (comprimentos de Bragg) e o espectro é coletado com os comandos 5 e 6, sendo que o primeiro tem uma resolução em bits 64 vezes maior. Todos os comandos, exceto o 6, coletam uma série de informações sobre os dados transferidos (Número de sensores, granularidade, *buffer*, dentre outros) que são agrupados em uma estrutura chamada de *Status Header*. Ao contrário dos comandos 3 e 4, os outros comandos mantêm o *buffer* padrão que evita que dados sejam perdidos em até 30 segundos. Os comandos 2 e 4 coletam os mesmos dados que 1 e 3 e adicionam a amplitude de um determinado canal (MICRONOPTICS, 2012).

Na origem da pasta compactada existe um arquivo de DLL “sm130\_Comm\_DLL.dll” e um guia “*ReadMe*” em formato pdf indicando que este arquivo deve ser armazenado no diretório padrão “C:\windows\system32” do sistema operacional *Microsoft Windows* para que os exemplos em anexo funcionem. No entanto, conforme orientação obtida da fabricante, o arquivo deve ser armazenado em locais diferentes a depender da versão do Windows instalada. Caso a versão usada seja 32 bits, o diretório permanece inalterado. Como a versão do sistema operacional usado para desenvolver e para executar o programa é de 64 bits, deve ser usado o novo endereço “C:\Windows\SysWOW64”. Testes foram realizados e constatou-se que o programa também funciona mantendo o DLL na mesma pasta que o arquivo executável e é esta alternativa que foi mantida para o usuário final.

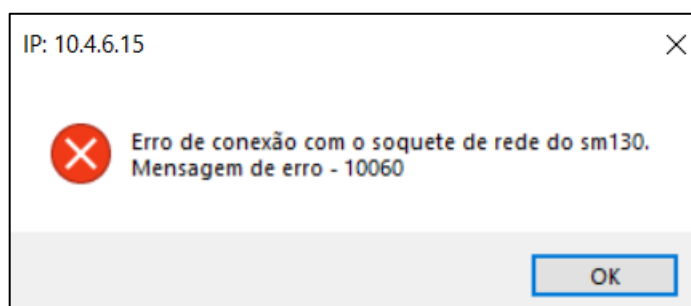
O arquivo DLL simplifica bastante o trabalho do desenvolvedor de soluções para o sm130, pois ele oferece quatro funções completas que estabelecem e controlam a comunicação com o interrogador por meio da porta *ethernet*. Essas funções são descritas no guia e estão listadas no formato apropriado de C++ a seguir:

- **sm130\_Connect(char IPAddress[])**: Recebe como argumento uma *string* armazenada em um *array* do tipo *char* com endereço de IP do interrogador e cria uma conexão com a porta 1852 dele;
- **sm130\_Disconnect()**: Encerra a conexão com a porta 1852 do sm130;
- **SendCommand(char command[])**: Essa função envia ao sm130 um comando válido citado dentro do seu argumento, o qual também é uma *string* armazenada em um *array* do tipo *char*. Todas as *strings* devem terminar com uma constante de barra invertida de nova linha “\n”;
- **DataRead(char ArrayOfData[], int NumberOfBytes)**: Função responsável por resgatar os dados medidos pelo sm130. Como argumento, envia-se um *array* do tipo *char* para armazenar os dados e uma variável do tipo *int* para a quantidade de elementos salvos no *array*.

Todas as funções anteriores retornam um valor inteiro que indica a efetividade da operação. Caso esse valor seja 0, a função obteve êxito. Caso contrário, o valor é o próprio número de identificação do erro e os detalhes sobre ele encontram-se no guia “*ReadMe*”. Seguindo a lógica de programação usada no exemplo original em C++, houve o cuidado de identificar potenciais exceções que poderiam levar a um fechamento abrupto do programa.

Nesses locais, o problema foi correspondentemente identificado para ajudar o usuário final a solucioná-lo, como indicado no exemplo de erro de conexão da Figura 13:

Figura 13 - Informações sobre erro de conexão



Fonte: O Autor (2020).

Para melhor organização do código do programa e por conta das estruturas criadas automaticamente pelo *Windows Forms*, o código está dividido em vários arquivos. Os arquivos de cabeçalho funcionam como bibliotecas estáticas e os arquivos de origem abrigam implementações das funções e classes. No arquivo de cabeçalho “Extras.h” foram reunidas as diretivas de pré-processamento com a inclusão de algumas bibliotecas padrões de C e C++. Neste arquivo também estão declaradas funções e classes comuns a todo o programa e as suas definições foram distribuídas nos arquivos de origem “Extras.cpp”, “Conexao.cpp” e “Leitura.cpp”. Os arquivos de cabeçalho restantes, “JanInicio.h”, “AlterarIP.h”, “JanPrincipal.h” e “JanConfig.h”, são responsáveis por suportar a interface gráfica do usuário por meio de *namespaces*, sendo que o primeiro controla um arquivo de origem “JanInicio.cpp” que contém a função principal “main()”.

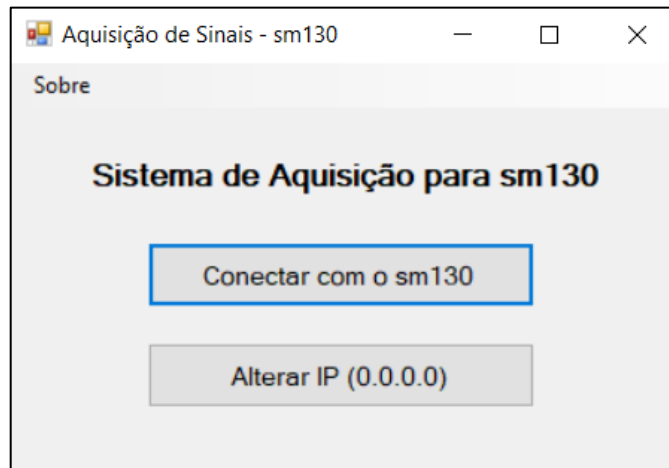
Assim que o usuário executa o programa principal, abre-se a janela inicial (Figura 14). Neste ponto, um identificador para a DLL já foi validado e um objeto para a classe “Configuracao” foi instanciado, o qual verifica a existência de um arquivo chamado “Config.txt” no mesmo diretório do programa. Se ele existir e for válido, as configurações são carregadas para a classe a partir dele. Caso contrário, um novo arquivo vazio é criado e os atributos da classe permanecem com valores-padrão na memória: endereço de IP é “0.0.0.0”, os ganhos em dB estão zerados para todos os canais, o limiar de ruído (*noise threshold*) está em 410 e o divisor da taxa de aquisição é 1.

A partir da janela da Figura 14 é possível acessar outras duas: A janela de alteração do IP (Figura 15) e a principal (Figura 16). Um requisito para acessar a janela principal é que esse endereço de IP deve coincidir com o IP atribuído ao sm130 que for utilizado, enquanto que a



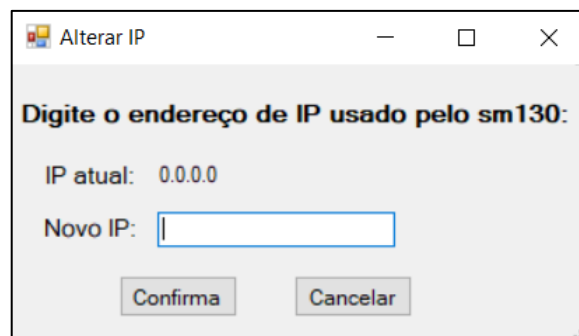
outra condição está no próprio sucesso de conexão com o sm130. Cada conexão simultânea estabelecida é reconhecida pelo sm130 como um cliente. Isso significa que é possível estabelecer diferentes conexões no mesmo ou em diferentes computadores. Finalmente, antes da abertura da janela principal, o código descrito em “Conexao.cpp” ainda envia comandos atribuindo os valores da classe às configurações internas do sm130, as quais afetam todos os outros clientes já conectados.

Figura 14 - Janela Inicial do Sistema de Aquisição



Fonte: O Autor (2020)

Figura 15 – Janela de Alteração do IP



Fonte: O Autor (2020)

A janela principal mostrada na Figura 16 é onde o usuário acessa a maior parte das funcionalidades do programa. A partir dela é possível fazer a leitura pontual das informações do *Header*, das amplitudes do espectro medido, fazer leitura de um número pré-determinado de amostras dos picos de comprimento de onda, além de acessar a janela de configuração (Figura 17). Ao clicar em “Desconectar sm130”, o programa fecha a janela principal e mantém a inicial,

o que dá ao usuário a possibilidade de reconectar ou de rapidamente conectar um outro interrogador do mesmo tipo.

Figura 16 – Janela Principal do Sistema de Aquisição



Fonte: O Autor (2020)

O interrogador pode ser configurado em uma janela própria mostrada na Figura 17. Durante o carregamento dela, os valores dos atributos da classe “Configuração” são preenchidos nos textos correspondentes ao valor atual de cada item, para que o usuário conheça o estado do interrogador antes de realizar as alterações. Nessa janela é possível alterar a taxa de aquisição em Hz do sm130, como também o limiar de ruído em unidade de amplitude e o ganho de amplitude do sinal em dB para cada um dos canais.

Da mesma forma que durante a conexão, as mudanças feitas nessa janela afetam todos os clientes conectado ao sm130. A partir deste ponto, existe três opções: 1) voltar à janela principal sem nenhum efeito; 2) apenas aplicar as mudanças feitas no sm130; 3) aplicar e salvar em “Config.txt” as alterações para que elas estejam disponíveis no próximo uso. Os comandos enviados para o interrogador são os seguintes:

- #SET\_DATA\_RATE\_DIVIDER: esse é o comando que mais necessitou atenção, porque ele não recebe como argumento a frequência de aquisição, mas sim um número divisor de *clock*. Considerando que a taxa padrão de aquisição do sm130 é 1000 Hz e que o divisor deve ser um inteiro entre 1 e 1000, as taxas ficam restritas aos resultados

da divisão. Todavia, para facilitar o uso, esse item foi implementado de forma que o usuário digite diretamente o valor da frequência desejada;

- **#SET\_CH\_NOISE\_THRESH**: como argumentos este comando recebe o canal, o qual receberá a modificação, e o valor do limiar de ruído estabelecido pelo usuário. O valor pode variar entre -4096 e 4096. Esse item determina um nível mínimo de amplitude de sinal para fins de detecção de pico de FBG;
- **#SET\_CH\_GAIN\_DB**: assim como o comando anterior, esse comando altera o ganho da amplitude do sinal, recebendo o canal e valor em dB como argumentos. Os valores permissíveis variam entre -5 até 20, com passos de 0,1.

Figura 17 – Janela de Configuração do Sistema de Aquisição

JanConfig

### Configurações do sm130

**Tx. de aquisição (Hz)**    Frequências recomendadas: 1000 Hz, 500 Hz, 250 Hz, 200 Hz, 125 Hz, 100 Hz, 50 Hz, 40 Hz, 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 8 Hz, 5 Hz, 4 Hz, 2 Hz, 1 Hz  
 Atual: 1000.  
 Novo:

O uso de outros valores pode resultar na atribuição de frequências não-inteiras, resultando em perda de dados. Use ao seu critério.

**Limiar de ruído (Noise Threshold)**

Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
Atual: 410	Atual: 410	Atual: 410	Atual: 410
Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>	Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>	Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>	Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>

**Ganho em dB (Amplitude)**

Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
Atual: 0	Atual: 0	Atual: 0	Atual: 0
Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>	Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>	Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>	Novo: <input style="width: 80px;" type="text"/>

Fonte: O Autor (2020)

Pela lógica da rotina computacional estabelecida, recomenda-se o uso dos seguintes valores inteiros de frequência: 1000 Hz, 500 Hz, 250 Hz, 200 Hz, 125 Hz, 100 Hz, 50 Hz, 40 Hz, 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 8 Hz, 5 Hz, 4 Hz, 2 Hz, 1 Hz. Outros valores poderão ser arredondados para outros números de ponto flutuante, o que pode causar perda e inconsistência dos dados medidos posteriormente. Por outro lado, ganho e limiar de ruído devem ser ajustados em conjunto para uma detecção de pico otimizada. O ganho não deve ser muito alto, a ponto de saturar o sinal, e nem tão baixo, a ponto de os picos ficarem abaixo do limiar de ruído escolhido.

Outra funcionalidade importante da tela principal é a de Leitura Rápida. O botão “Ler Dados” dentro do seu quadrante apresenta resultado parecido com o programa base original, oferecendo visão geral rápida de informações do *Header*. A partir da classe “leitura\_header”, um objeto é construído com o resultado de uma leitura feita pelo comando “#GET\_DATA”, e essas informações são gravadas em um arquivo de texto “Header.txt”. Após a gravação, o arquivo é aberto automaticamente, exibindo informações como as da Figura 18. Essa é, portanto, a forma mais simples de verificar a quantidade de sensores detectados em todos os canais e o comprimento de onda de Bragg de cada sensor.

Figura 18 - Resultado da Funcionalidade Leitura Rápida

```

Leitura dos dados realizada com sucesso
(Valores abaixo são de uma única iteração)

Tamanho de cDataRead: 124 bytes

/*****/
Quantidade de picos no canal 1 - 6
Quantidade de picos no canal 2 - 0
Quantidade de picos no canal 3 - 0
Quantidade de picos no canal 4 - 3

/*****/

Valores de comprimento de onda de Bragg

>> Sensores presentes no Canal 1:
Sensor # 1 = 1527.357312 nm
Sensor # 2 = 1532.626560 nm
Sensor # 3 = 1538.154368 nm
Sensor # 4 = 1550.066688 nm
Sensor # 5 = 1556.378752 nm
Sensor # 6 = 1560.724224 nm

>> Sensores presentes no Canal 4:
Sensor # 1 = 1525.803136 nm
Sensor # 2 = 1531.731200 nm
Sensor # 3 = 1552.539648 nm

Número serial do dado - 4848905
Timestamp (useg.) - 554123
Timestamp (seg.) - 1602687104

Granularidade: 1000000
Buffers - 100
Versão do header - 3
Tamanho do header - 88
Radix - 8
Versão de Firmware - 106
Cooler 1 - 16
Cooler 2 - 0
Falha de calibração - 0
Modo de trigger - 0

```

Fonte: O Autor (2020)

A próxima funcionalidade, Leitura Espectro, é muito importante para verificar se os sensores estão sendo detectados corretamente. Ao clicar no botão respectivo de cada canal, é

feita uma única leitura das amplitudes do espectro usando o “#GET\_SPECTRUM” associado com o “#SET\_AMP\_CH” para indicar o canal. As informações coletadas em tipo *char* têm tamanho de 65.624 bytes. Subtraindo-se os 88 bytes do *Header*, as amplitudes de espectro completo de cada canal ocupam 65.536 bytes. Estas são convertidas para um *long int* de 4 bytes antes de serem salvas no arquivo de texto “Leitura\_Espectro.txt”. Isto é, são 16.384 pontos de amplitude distribuídos entre os comprimentos de onda de 1.510 nm e 1.590 nm. Para visualizar esses dados, o botão “Abrir Gráfico (Matlab)” pode ser acionado para executar o segundo subprograma. Um arquivo extra, o “Matlab\_SPEC\_IN.txt”, também é criado para exportar informações do canal, do limiar de ruído e do ganho. Neste caso, o usuário deve atentar-se que os arquivos de espectro citados são sobrescritos a cada leitura.

Por último, a funcionalidade “Leitura Comprimento de Onda” é a principal deste sistema de aquisição. Com base nela, é possível determinar o tempo de aquisição contínuo, em segundos, dos comprimentos de onda de Bragg para posterior análise de vibração em máquinas elétricas. Com o botão “Ler Dados” deste quadrante, o laço da rotina de leitura é iniciado e o programa permanece inacessível pelo tempo de aquisição definido. A quantidade total de repetições do laço depende não só desse tempo, como também da taxa de aquisição configurada. Ou seja, para uma taxa de aquisição de 250 Hz e um tempo de 5 segundos, são gravadas 1.250 amostras de comprimento de onda, *timestamp* e *buffer* para cada sensor detectado em cada canal.

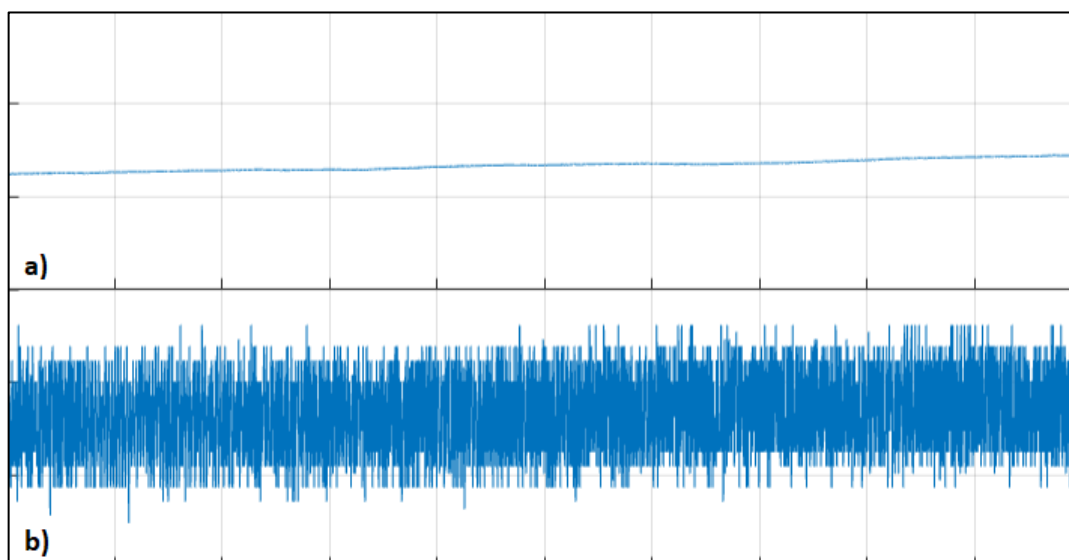
Todo sensor gera um arquivo de texto independente na forma “ChY\_SensorZ.txt”, onde Y é o número do canal e Z é o número do sensor relativo ao canal respectivo. Para evitar a situação de perda de dados por estouro de *buffer*, principalmente com taxas de aquisição mais elevadas, foi necessário adotar uma técnica otimizada. Ao invés de abrir e fechar cada arquivo de sensor para gravação a cada laço, foram pré-alocadas matrizes com capacidade para 1.000 linhas de dados. Mesmo que o interrogador tenha capacidade de ler centenas de sensores em cada canal, a fim de poupar recursos de memória foi definido que as matrizes com os comprimentos de onda têm capacidade para até 15 sensores por canal, o que deve atender a maior parte das aplicações. Caso a fibra óptica conectada tenha mais de 15 picos, os sensores restantes daquele canal serão ignorados. Dessa forma, é possível fazer até 1.000 aquisições antes de os dados precisarem ser salvos em seus arquivos de texto. Isso significa que, para uma taxa de aquisição de 100 Hz, os dados são exportados a cada 10 segundos.

Por fim, a cada laço da rotina a quantidade de sensores é comparada com a quantidade salva inicialmente. Ao detectar um número diferente, a aquisição é cancelada imediatamente.

Isso evita que, na falta de um sensor específico em uma determinada iteração, os arquivos recebam valores dos sensores subsequentes, gerando resultados inconsistentes. Assim como na funcionalidade “Leitura Espectro”, existe o botão “Abrir Gráfico (Matlab)” que é responsável por executar o terceiro subprograma. Para exportação de informações de referência, o arquivo de texto “Matlab\_DATA\_IN.txt” recebe a quantidade de sensores em cada canal e a taxa de aquisição.

Dois outros comandos foram usados para realizar as últimas correções na aquisição. Antes de cada funcionalidade de leitura é enviado o comando “#FLUSH\_BUFFER”. Isso serve para eliminar possíveis resquícios de uma aquisição anterior e para garantir que possíveis alterações na configuração e nos sensores conectados sejam lidas imediatamente. O outro comando significativo é o “#SET\_NUM\_AVERAGES”. Ele impacta no recurso interno de realizar médias do sm130, modulando medições de grande repetitividade e o seu valor de argumento pode variar de 1 a 1.000 pontos de picos. Contudo, essa função não é desejável no estudo de vibrações por diminuir consideravelmente a amplitude das componentes de maiores frequências ao criar uma espécie de média móvel do sinal. Consequentemente, esse comando é enviado para todos os canais com o valor de 1 logo após a conexão com o sm130, antes da janela principal aparecer. A Figura 19 a seguir demonstra o impacto do recurso na medição do comprimento no domínio do tempo.

Figura 19 – Comparação da variação do comprimento de onda no domínio do tempo devido ao uso do recurso interno de médias do sm130: a) valor em 999; b) valor em 1



## 3.2 PROCESSAMENTO DE SINAIS EM MATLAB

A geração de gráficos dos dados lidos e o processamento matemático deles é realizado nos dois subprogramas implementados no MATLAB *App Designer*. A forma de trabalhar com as funções e métodos nesse ambiente de desenvolvimento funciona em um fluxo um pouco diferente daquele comum para os usuários que usam a linha de comando e os scripts, principalmente para desenhar os gráficos. Contudo, para quem já está familiarizado com o MATLAB, a curva de aprendizado não deve ser muito longa.

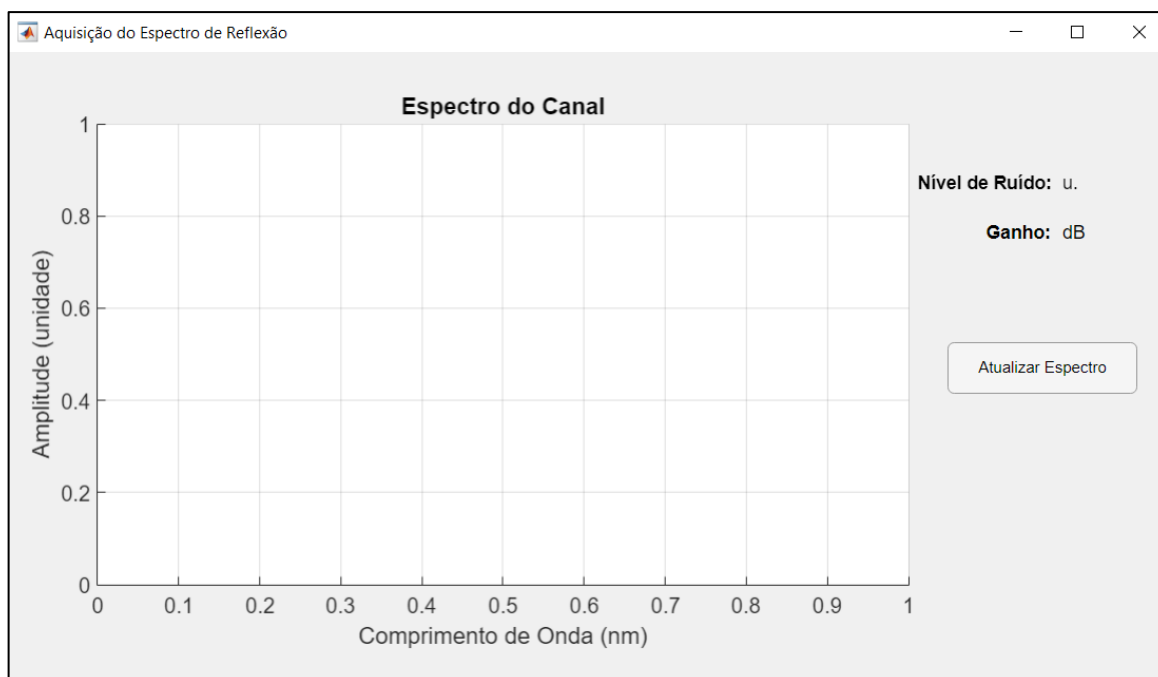
A grande vantagem de usar essa ferramenta é a facilidade na criação de uma interface gráfica bastante interativa e que funciona como uma janela separada do MATLAB. Nesse aspecto a ferramenta é mais simples e mais fácil de programar do que o *Windows Forms*. Da mesma forma, ao clicar e arrastar os objetos para a janela chamada *Design View*, o código por trás, no *Code View*, também é criado. Todavia, grande parte dele permanece bloqueado para o programador e a edição da propriedade desses objetos é feita principalmente por controladores pré-determinados. Isso significa que a ferramenta é menos flexível que o *Windows Forms*, mas ela evita que a interface quebre por alterações indevidas.

Como mencionado na Seção 3.1, clicando no botões “Abrir Gráfico (Matlab)” das funcionalidades “Leitura Espectro” e “Leitura Comprimento de Onda” (Figura 16), são executados o subprograma 1 e o subprograma 2, respectivamente. Eles também podem ser acessados diretamente a partir dos arquivos “GET\_DATA.mlapp” e “GET\_SPECTRUM.mlapp”, o que viabiliza o uso portátil deles para geração de gráficos isoladamente em outro diretório a partir do *backup* de dados salvos em arquivo de texto.

### 3.2.1 Subprograma 1 – Leitura Espectro

O princípio de funcionamento do aplicativo mostrado na Figura 20 é bem simples. Primeiramente ele carrega os dados de canal, limiar de ruído e ganho exportados pelo programa principal através do arquivo “Matlab\_SPEC\_IN.txt” e depois as amplitudes são importadas do arquivo “Leitura\_Espectro.txt”. Por fim, os 16.384 pontos de amplitude do espectro de reflexão são distribuídos uniformemente entre os comprimentos de onda de 1.510 nm até 1.590 nm e o gráfico é desenhado. A forma de exibição do gráfico é *off-line*, ou seja, deve-se fazer uma nova iteração de medição no programa principal para visualizar alterações no espectro, causadas pelo ajuste do limiar de ruído, ganho ou conexão e desconexão de sensores. É necessário selecionar o botão “Atualizar Espectro” no subprograma para a nova medição ser desenhada.

Figura 20 - Janela do subprograma 1 da funcionalidade “Leitura Espectro”



Fonte: O Autor (2020)

### 3.2.2 Subprograma 2 – Leitura Comprimento de Onda

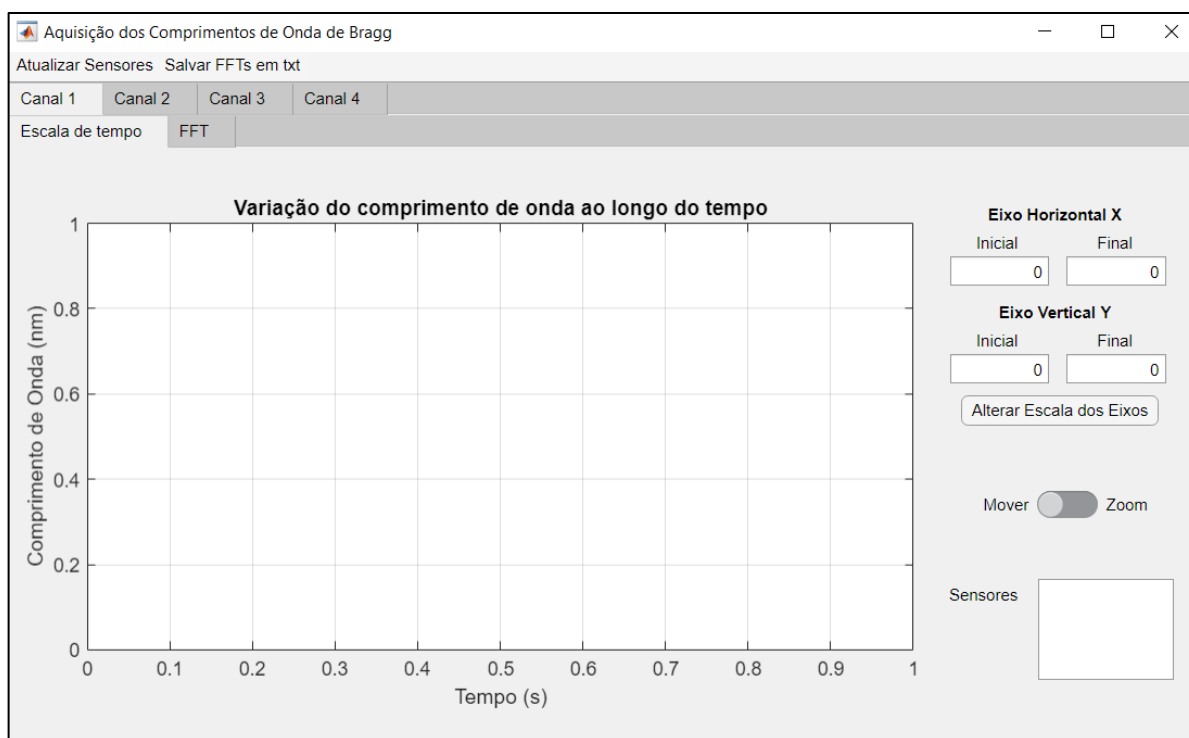
Pela quantidade de informações a serem processadas, o subprograma de leitura do comprimento de onda da Figura 21 apresenta uma complexidade maior. Após importar a quantidade de sensores por canal e a taxa de aquisição a partir do arquivo “Matlab\_DATA\_IN.txt”, estruturas parecidas com matriz chamadas *cell* são inicializadas para 4 colunas de canais e um número de linhas correspondente à quantidade máxima de sensores identificados. Dentro dessas estruturas são armazenados por meio de um laço os dados dos arquivos de texto no formato “ChY\_SensorZ.txt”, elucidado na Seção 3.1. Dentro da rotina do laço são executadas também a FFT dos sinais medidos, adequando os pontos da abscissa para a metade da taxa de aquisição.

Da mesma forma que o subprograma anterior, é necessário efetuar uma nova medição para visualizar dados novos. Após isso, basta selecionar “Atualizar Sensores” para carregar os novos resultados. Logo abaixo, existe uma aba de seleção de canal e outra de seleção de gráficos em escala de tempo e de decomposição em frequência da FFT. Os resultados gerados no domínio da frequência podem ser salvos em arquivo de texto para cada sensor, selecionando “Salvar FFTs em txt”. No canto inferior direito aparece os sensores detectados nas abas selecionadas. É possível ver o gráfico relativo a um sensor por vez. Acima desta caixa de



seleção pode-se escolher entre mover ou dar *zoom* no gráfico. Além disso, é disponibilizada a opção de simplesmente redefinir a escala dos gráficos digitando os limites horizontais e verticais e clicando em “Alterar Escala dos Eixos”.

Figura 21 - Janela do subprograma 2 da funcionalidade “Leitura Comprimento de Onda”

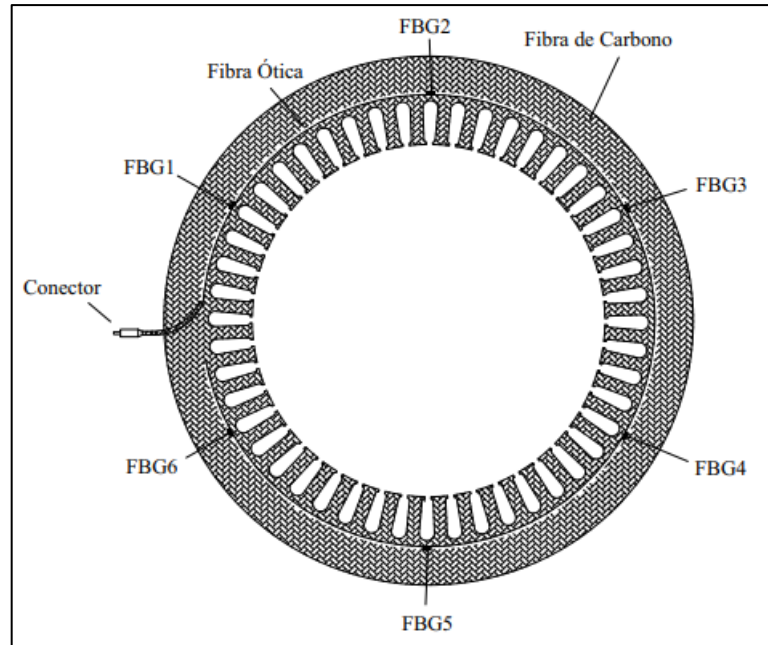


Fonte: O Autor (2020)

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE TESTE DO SISTEMA E ENSAIO DE VIBRAÇÃO

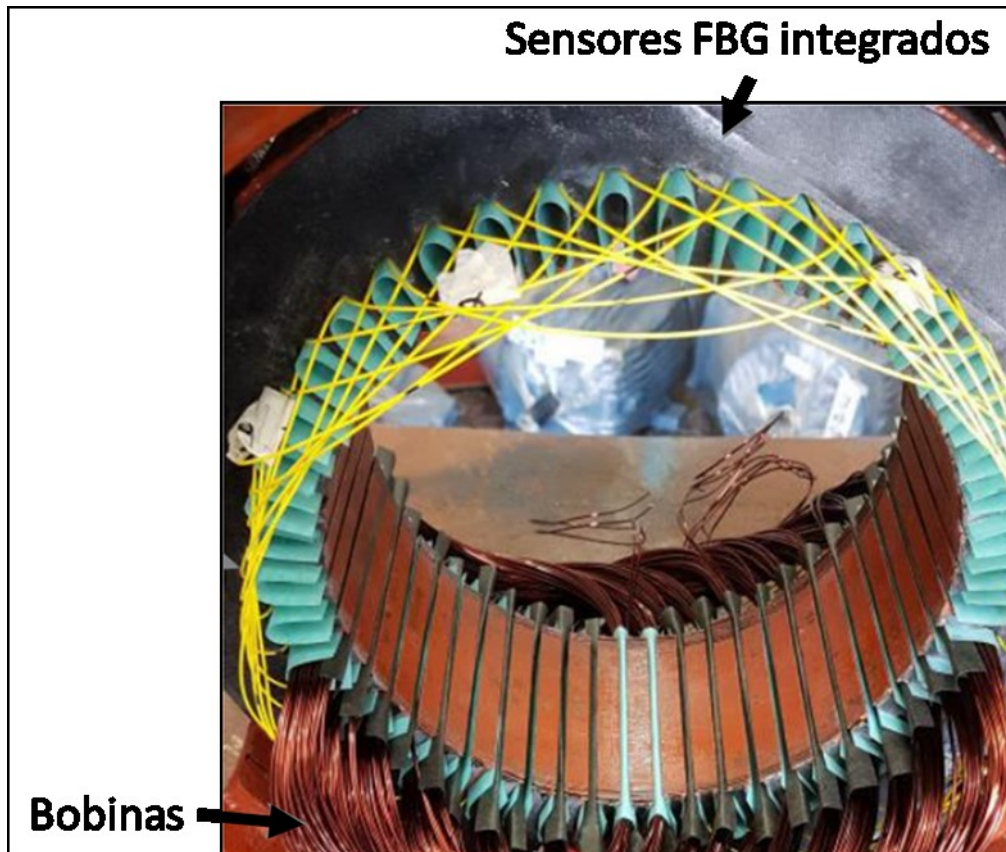
O teste do sistema de aquisição foi aplicado em um ensaio de vibração conduzido usando um motor elétrico assíncrono já instrumentado pelo grupo de pesquisa com 2 fibras ópticas padrão monomodo com 6 sensores gravados em cada uma. Devido à fragilidade da fibra à flexão, ela está implantada entre duas camadas de compósito de fibra de carbono, o qual apresenta pequena expansão térmica (PELEGRIN, 2020). O diagrama de um desses invólucros é mostrado na Figura 22 e o detalhe da instrumentação está na Figura 23. Percebe-se na imagem que o invólucro acompanha o formato do núcleo do estator do motor, inclusive das ranhuras, e as FBGs são posicionadas radialmente. O segundo invólucro é bastante semelhante a este, exceto pela falta dos “dentes” internos.

Figura 22 – Diagrama de instalação da fibra óptica com 6 sensores FBGs multiplexados



Fonte: Pelegrin (2020)

Figura 23 - Instrumentação do motor com sensores FBGs integrados em compósito de fibra de carbono



Fonte: Adaptado de Pelegrin (2020)

A Tabela 1 a seguir contém os dados de comprimento de onda de gravação das FBGs em cada fibra, enquanto que os dados de placa do motor assíncrono onde estão instalados os compósitos estão descritas na Tabela 2.

Tabela 1 – Comprimentos de onda dos sensores FBG

	<b>Comprimento de onda</b>
<b>SENSOR #1</b>	1.526 nm
<b>SENSOR #2</b>	1.532 nm
<b>SENSOR #3</b>	1.537 nm
<b>SENSOR #4</b>	1.550 nm
<b>SENSOR #5</b>	1.556 nm
<b>SENSOR #6</b>	1.560 nm

Fonte: O Autor (2020)

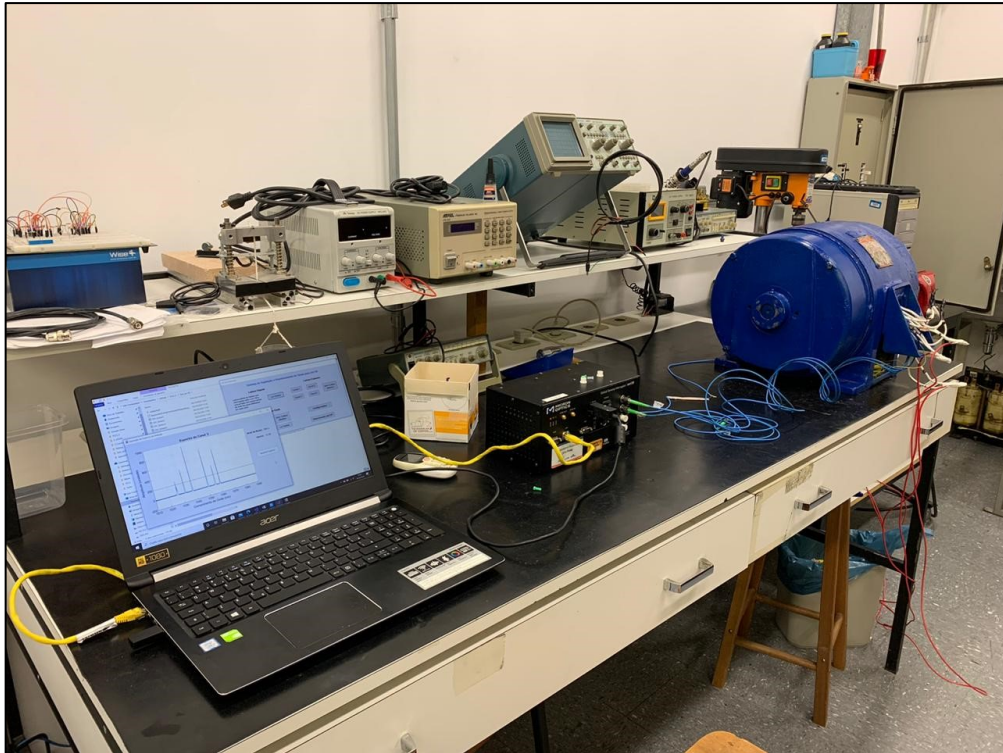
Tabela 2 - Especificações do motor assíncrono

<b>FABRICANTE</b>	General Electric
<b>NÚMERO DE FASES</b>	3
<b>FREQUÊNCIA</b>	60 Hz
<b>POTÊNCIA</b>	15 cv
<b>ROTAÇÃO NOMINAL POR MINUTO</b>	1.755
<b>FATOR DE SERVIÇO</b>	1.0
<b>TENSÃO NOMINAL DE OPERAÇÃO</b>	220/380/440/760 V

Fonte: O Autor (2020)

A Figura 24 compreende uma visão geral da conexão que foi feita para realizar o teste do sistema a partir de um ensaio de vibração. O motor trifásico foi conectado à rede de 60 Hz e as fibras ópticas instrumentadas foram conectadas ao interrogador sm130 da seguinte forma: 1) Fibra com invólucro tipo “Estator - sem dente” no Canal 1; 2) Fibra com invólucro tipo “Estator - com dente” no Canal 2. A conexão do interrogador com o computador foi feita usando um cabo *ethernet*. Finalmente, para proceder com o ensaio de vibração para validação final do sistema foi determinado que o motor seria ligado a vazio e que o ensaio teria duração de 10 segundos. Esperou-se também cerca de 30 segundos entre a partida do motor e o início do ensaio.

Figura 24 - Visão geral da conexão entre o motor e o computador via interrogador



Fonte: O Autor (2020)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

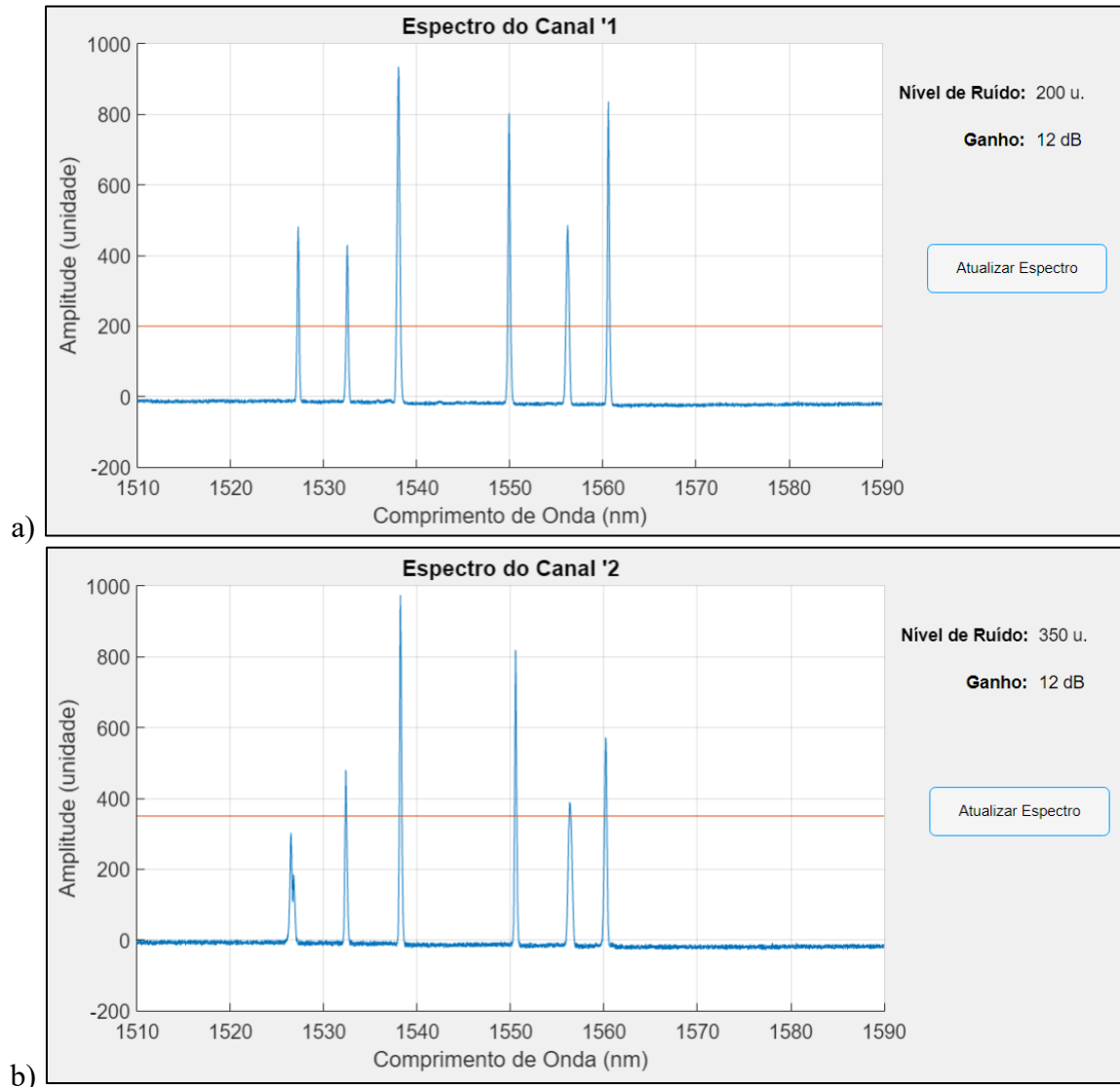
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente do ensaio de vibração usando o sistema de aquisição desenvolvido no LabESO. Os dados obtidos durante o teste de 10 s são suficientes para validar a confiabilidade do sistema com o interrogador sm130.

### 4.1 RESULTADOS DO ESPECTRO COMPLETO DE REFLEXÃO

Ao executar o programa principal e após uma conexão bem-sucedida com o interrogador, os limiares de ruído e os ganhos foram alterados para ajustar o sinal de aquisição. Na Figura 25 estão os gráficos da leitura do espectro de reflexão dos canais 1 e 2 após esses ajustes. Como os sinais estavam fracos, aplicou-se ganho de 12 dB aos canais, evitando o limite para saturação.

Por outro lado, os limiares de ruído foram reduzidos de 410 para 200 no canal 1 e para 350 no canal 2. É notável que o sensor de 1.526 nm do canal 2 está abaixo da linha do limiar, pois ele precisou ser excluído da leitura dos picos de comprimentos de onda. Provavelmente a deformação no seu formato acarreta em inconsistências na detecção de picos, gerando picos falsos que podem ter sido confundidos como outros sensores pelo sm130. Como esclarecido na Seção 3.2, uma quantidade de sensores irregular é um fator que causa cancelamento imediato da medição, por isso decidiu-se ignorá-lo.

Figura 25 – Espectro de reflexão completo. a) Canal 1: FBGs – Invólucro estator sem dente; b) Canal 2: FBGs – Invólucro estator com dente.



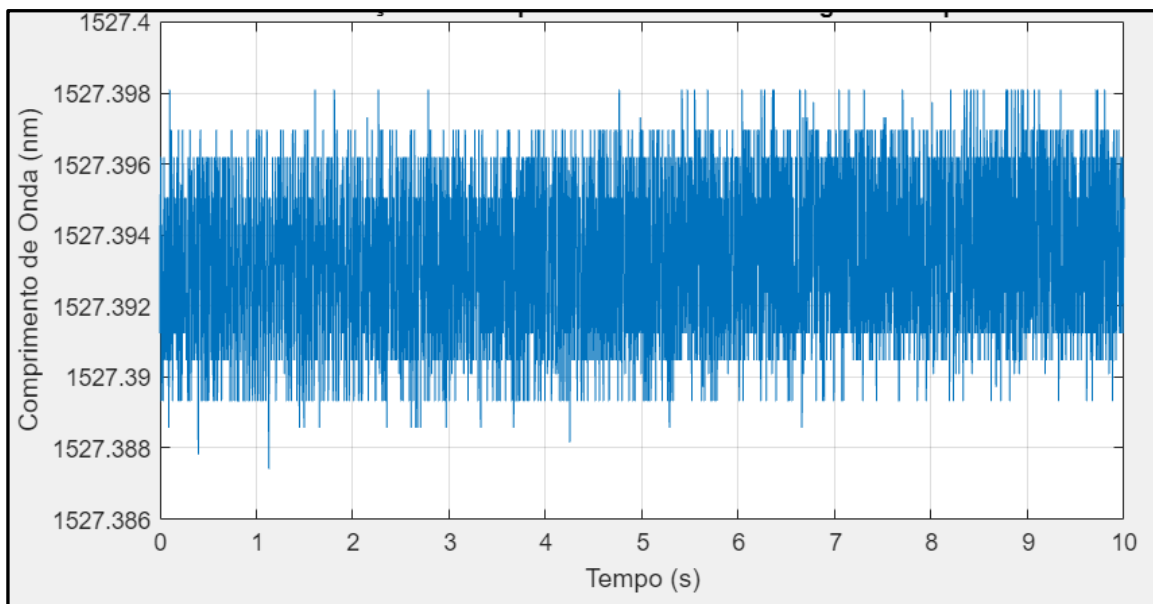
Fonte: O Autor (2020)

## 4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE VIBRAÇÃO

Após cerca de 30 segundos da partida do motor, os dados de vibração foram coletados simultaneamente por todos os sensores FBG válidos conectados ao sm130. A aquisição foi feita com uma taxa de aquisição a 1.000 Hz e duração de 10 segundos, ou seja, foram coletadas 10.000 amostras por sensor. Considerando que 14 sensores FBGs estavam válidos durante a aquisição nos 3 canais, o total de amostras foi de 140.000. O *buffer* variou entre 99% e 100%, o que confirma a segurança de que não houve perda de dados e que o sistema está suficientemente otimizado.

A visualização dos gráficos de comprimento de onda foi feita depois da medição usando o subprograma 2. O gráfico da Figura 26 apresenta o comportamento do comprimento de onda do sensor 1 (canal 1) ao longo do tempo. Para a análise de vibração, esse tipo de gráfico não contém informações de grande relevância. Por esse motivo, só serão mostrados nas Figuras 27 e 28 os resultados de todos os sensores após aplicação da FFT no domínio da frequência.

Figura 26 – Variação do comprimento de onda do sensor 1 no canal 1



Fonte: O Autor (2020)

Com base na informação de placa, o motor apresenta velocidade de rotação  $n$  de aproximadamente 1.800 rpm. Considerando que o motor foi ligado na frequência da rede  $f$  de 60 Hz, pode-se afirmar fundamentado na Equação 3 que a quantidade de polos do motor é 4. A partir disso, a frequência de rotação do rotor  $f_r$  é 30 Hz (Equação 6). Portanto, baseado no que foi exposto na Seção 2.2.1, as principais componentes de vibração derivadas das forças eletromagnéticas estão marcadas em vermelho nas Figuras 27 e 28 são as seguintes:

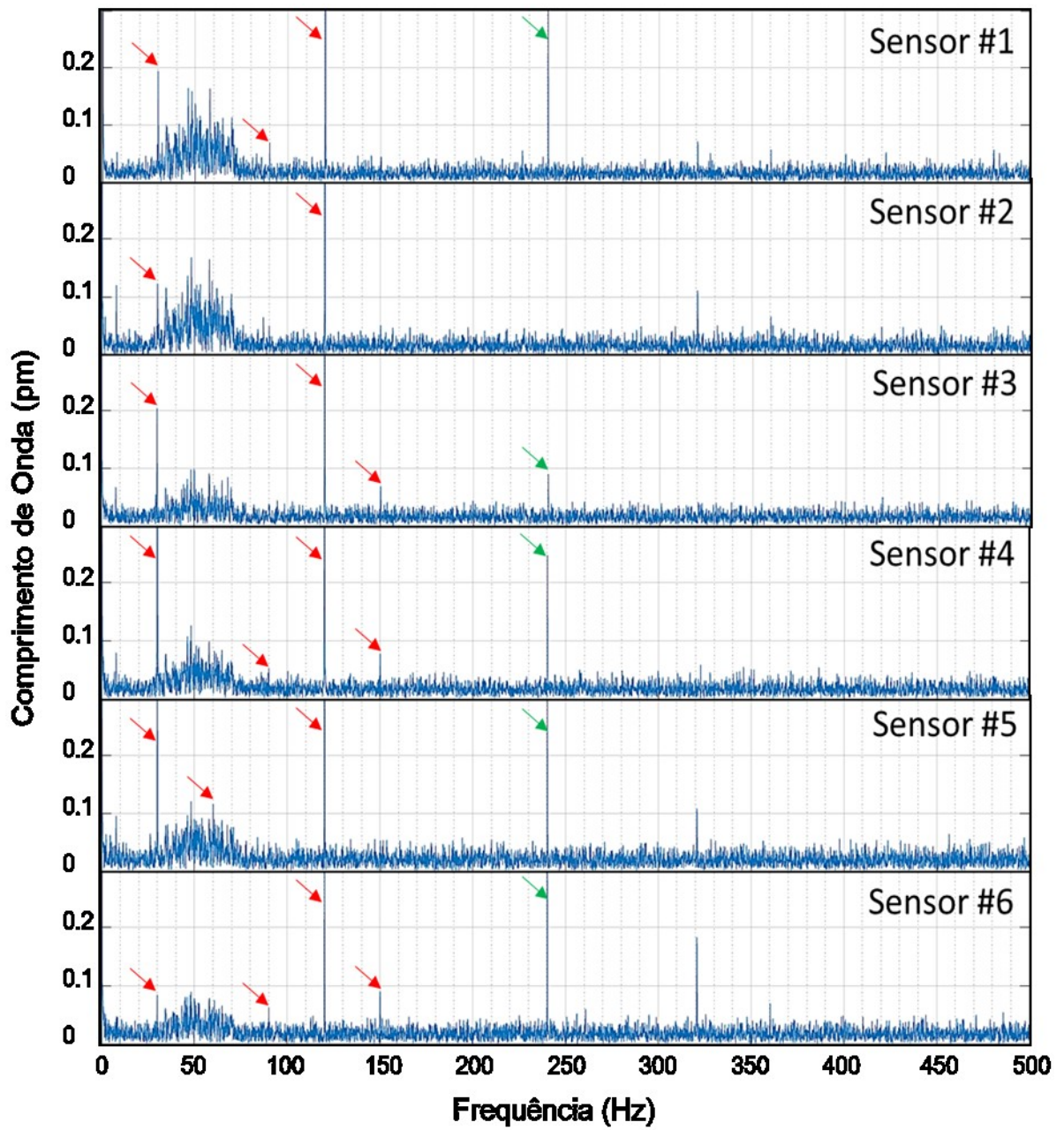
- $f_r = 30$  Hz,
- $f = 2f_r = 2f - 2f_r = 60$  Hz,
- $2f - f_r = 90$  Hz,
- $2f = 120$  Hz,
- $2f + f_r = 150$  Hz,
- $2f + 2f_r = 180$  Hz.

A partir da análise dos resultados apresentados nas Figuras 27 e 28, nota-se que há uma certa irregularidade na detecção de certas frequências. As componentes em 180 Hz só se destacaram minimamente nos sensores 2 e 4 do canal 2. As frequências de 60 Hz ficaram em uma região muito ruidosa que contém amplitudes relativamente altas. Isso acontece em função das incertezas inseridas na medição pelo posicionamento das FBGs e do processo de fabricação do invólucro. Das frequências esperadas, vale ressaltar a boa leitura da amplitude de 30 Hz e, principalmente a de 120 Hz.

Outras grandes amplitudes foram detectadas em vários sensores em frequências harmônicas mais altas, como as de 240 Hz ( $3f + 3f_r$ ), marcadas em verde. Além disso, em todos os gráficos apareceram grandes amplitudes de frequência de 0 Hz. Esta deve-se provavelmente ao aumento de temperatura do motor que foi captada devido ao tempo curto de ensaio e por não aguardar que ele atingisse uma temperatura estacionária antes do início da aquisição.

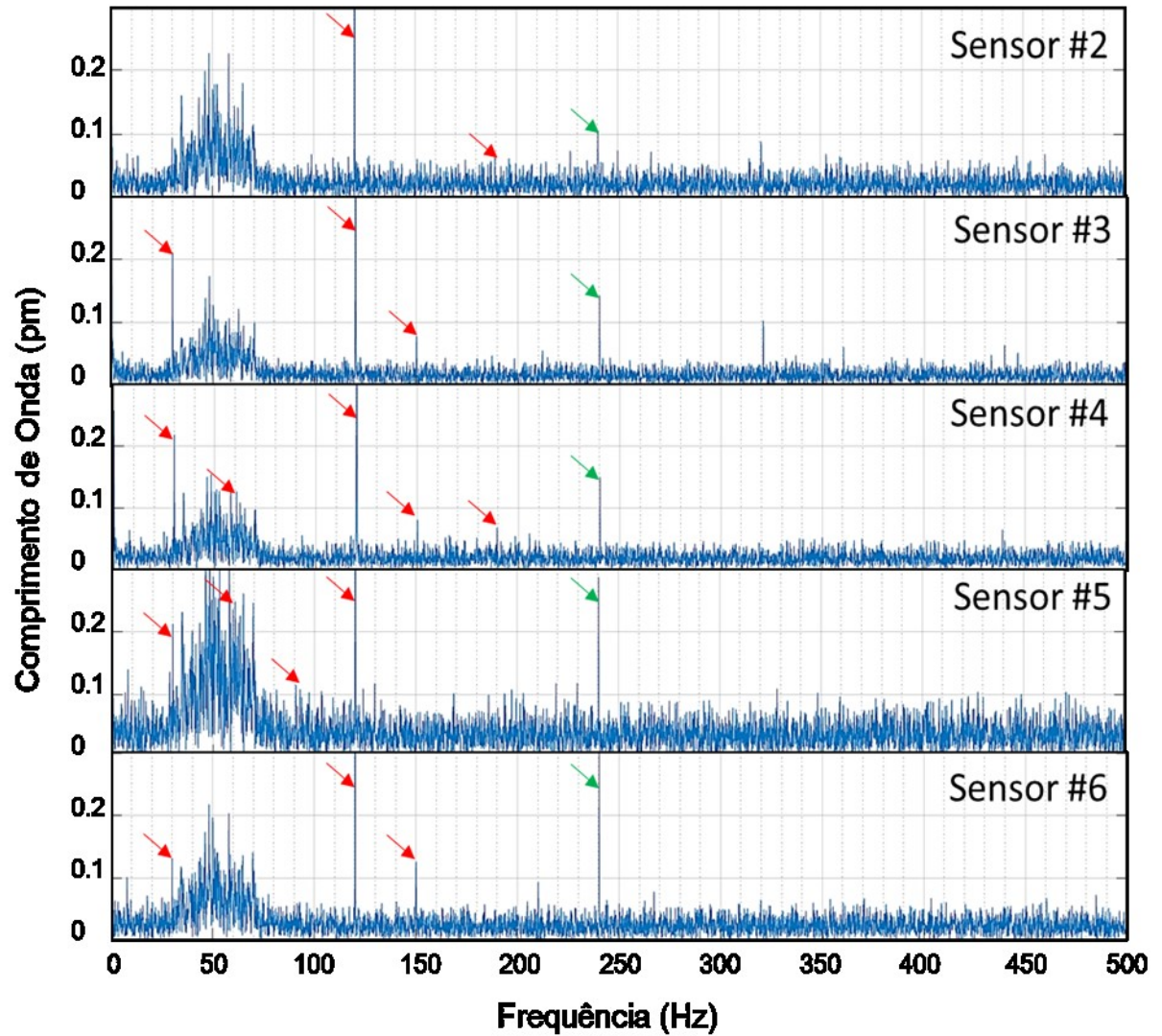


Figura 27 – FFT dos sensores FBGs no invólucro sem dente do estator. Setas vermelhas: Componentes de frequência esperadas. Seta verde: Exemplo de harmônica em alta frequência.



Fonte: O Autor (2020)

Figura 28 – FFT dos sensores FBGs no invólucro com dente do estator. Setas vermelhas: Componentes de frequência esperadas. Seta verde: Exemplo de harmônica em alta frequência.



Fonte: O Autor (2020)

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como proposta a criação de um sistema de aquisição de sinais de sensores ópticos baseados em redes de Bragg para monitoramento de vibração em máquinas elétricas. A criação do *software* foi realizada usando a ferramenta *Windows Forms* do ambiente de desenvolvimento *Microsoft Visual Studio Community 2017* aliada com a ferramenta *App Designer* do MATLAB. O programa principal foi desenvolvido em C++ visando a comunicação, controle e leitura dos dados medidos pelo interrogador óptico sm130, enquanto que os outros dois subprogramas servem para o processamento e visualização gráfica dos sinais medidos.

Os resultados obtidos durante o ensaio realizado com o motor assíncrono comprovam o funcionamento confiável do sistema. Foi possível detectar componentes de vibração esperadas para um motor de 4 polos em uma rede de 60 Hz. Esse diagnóstico foi encontrado usando apenas as ferramentas de processamento de sinal embutidas no sistema. Além disso, a forma modular dele permite que os gráficos sejam gerados e manipulados usando os subprogramas de forma independente sempre que necessário após a aquisição, bastando guardar em outros diretórios os dados em arquivos de texto. Outra vantagem é a de poder fazer aquisição propriamente dita quando o MATLAB não estiver disponível, através do programa principal. Para a visualização, contudo, será necessário importar as medições para qualquer programa de análise de dados, como por exemplo o *Microsoft Office Excel*.

Como empecilho para a adoção do programa pode ser destacada a limitação para realizar algumas tarefas básicas. A imposição de configurar o limiar de ruído e o ganho em uma janela diferente da visualização do espectro, assim como a necessidade de realizar uma nova aquisição e clicar em “atualizar sensores” pode afastar quem já está acostumado a realizar essas tarefas no *Catman Easy* ou no sistema em *LabVIEW*. Por isso, é indispensável que a experiência continue sendo melhorada continuamente dentro do grupo de pesquisa do LabESO a partir de sugestões da Seção 5.1 e dos próprios usuários.

## 5.1 PROPOSTAS DE CONTINUAÇÃO DE TRABALHO

Existem diversos pontos de melhoria que poderão respaldar a continuação do desenvolvimento deste trabalho e que podem encorajar novas formas de implementação. Algumas sugestões estão listadas a seguir:

- Uma limitação do programa atual causada pela matriz pré-alocada é a quantidade de amostras que precisam ser lidas antes que elas sejam salvas no arquivo de texto. Em uma situação em que a taxa de aquisição é 1 Hz, é necessário esperar ou a finalização da aquisição ou 1.000 segundos, o que ocorrer primeiro. Da mesma forma, o valor em “#define AMOSTRASMAY” pode ser redefinido para encontrar um equilíbrio melhor entre as taxas de aquisição, tendo em vista sempre o valor do *buffer* para evitar perdas;
- Seria interessante implementar janelas que informem a realização de alguma atividade que possa demorar mais tempo, como por exemplo, durante a rotina de aquisição. No formato atual, os únicos indícios de que uma aquisição está sendo feita é que a janela principal do programa deixa de responder e o LED ao lado da porta *ethernet* do sm130 permanece piscando. Uma janela extra poderia informar o tempo de execução transcorrido, uma opção para pausar e outra para cancelar a medição;
- Outras funcionalidades podem ser adicionadas ao programa atual, como a de realizar uma aquisição de forma automática periodicamente num espaço de horas ou dias e a de ensaios de medição de temperatura. Neste caso pode ser necessário o uso do comando “#SET\_NUM\_AVERAGES” explicado na Seção 3.1.

## REFERÊNCIAS

- ASSUNÇÃO, R. P. **Ensino de detecção de avarias em motores de indução**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Nova de Lisboa.
- BENBOUZID, M. E. H.. **A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection**. Em: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 47.5, 2000.
- BONNETT, A. H.; SOUKUP, G. C. **Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 28, n. 4, p. 921–937, 1992.
- BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; SANTOS, A. H. M.; AZEVEDO, E. M.; YAMACHITA, R. A. **Analysis of preventive and corrective maintenance on three-phase squirrel-cage induction motors performance**. *Industry Applications Conference Fourtieth IAS Annual Meeting*, v. 1, p. 46–51, Out. 2005.
- CEBAN, A.; PUSCA, R.; ROMARY, R. **Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis**. *IEEE Trans. Ind. Electron., Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)*, v. 59, n. 5, p. 2082–2093, mai 2012.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. [S.l.]: AMGH. 5º ed. 2013.
- COSTA, I. B. V. da. **Detecção de barra quebrada em rotores de motores de indução através da análise da deformação dinâmica do estator**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica – Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- COSTELLO, M. J. **Understanding the vibration forces in induction motors**. *Proceedings of the 19th. Turbo machinery Symposium*, p. 67–76, 1990.
- DOPKER, A. R., SCHLOSSMACHER, D., CASTILHO, T. A. M. de. **Técnica para avaliação de excentricidade em motores de indução utilizando sensores a fibra ótica**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- ERIKSSON, S. **125 Jahre elektrische Maschinen - ABB und ihr Beitrag zur Geschichte der Elektromotoren und Generatoren**. *ABB Technik*, n. 1/2008, p. 81–86, 2008. Disponível em: [https://library.e.abb.com/public/df09cdf07a171d84c1257427003a2cdb/81-86\\_1M821\\_GER72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/df09cdf07a171d84c1257427003a2cdb/81-86_1M821_GER72dpi.pdf). Acesso em: 19 outubro 2020.
- FILIPPETTI, F.; FRANCESCHINI, G.; TASSONI, C.; VAS, P. **AI Techniques in induction machine diagnosis including the speed ripple effect**, vol 1, IAS, California, 1996.
- FINLEY, W. R.; SAUER, B. J.; LOUTFI, M. **Motor vibration problems: How to diagnose and correct vibration errors**. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 21, n. 6, p. 14–28, 2015.
- FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2006.

- FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors**. 3<sup>o</sup> ed. New York: Springer-Verlag, Inc., 2004.
- FUEST, K.. **Elektrische maschinen und antriebe: lehr-und arbeitsbuch**. 3. ed. uberarb. und erw. auf. Braunschweig: Friedr. Vieweg, 1989.
- GOOD, I. J.. **Introduction to Cooley and Tukey (1965) An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series**. Springer Science+Business Media New York, 1997.
- GUO, Y.; XIONG, L.; WANG, X.; WU, H. **High Frequency Optical Fiber Bragg Grating Accelerometer**. IEEE Sensors Journal, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8355808>. Acesso em: 14 maio 2018.
- HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S., **Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication**, Applied Physics Letters, vol. 32, 1978.
- HILL, K.O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D.C., **Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask**, Applied Physics Letters, vol. 62, p. 1035-1037, 1993.
- JOVER RODRÍGUEZ, P. V.; BELAHCEN, A.; ARKKIO, A.; LAIHO, A.; ANTONINO-DAVIU, J. A. **Air-gap force distribution and vibration pattern of Induction motors under dynamic eccentricity**. Electrical Engineering, v. 90, n. 3, p. 209–218, 2008.
- KAUL, A.D.; KUMAR, P.; SONKUSARE, A.; THAKUR, S.S. Implementation of Labview based Vibration Monitoring System for Turbine Generator Set in Thermal Power Plants. **Journal of Scientific & Industrial Research**, 2003. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/78f0/e14203ac4c91fa1b705c9cd2095afaccb872.pdf>. Acesso em: 14 maio 2018.
- KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., Koo, KOO., K., P., ASKINS, C. G., PUTNAN, M. A., FRIEBELE, E. J., “**Fiber Grating Sensor**”, Journal of Lightwave Technology, vol. 15, p. 1442-1462, 1997.
- LINSSIO, R. P.. **Caracterização de um acelerômetro óptico biaxial para monitoramento de vibrações em máquinas elétricas**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2025>. Acesso em: 14 maio 2018.
- MATLAB. **Fast Fourier transform**. The MathWorks, Inc. 2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>. Acesso em: 26 outubro 2020.
- MAZUR, D. C.; KAY, J. A.; MAZUR, K. D. **Advancements in Vibration Monitoring for the Mining Industry**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 51, n. 5, p. 4321–4328, 2015. IEEE.
- MICRONOPTICS. **Sensing Instrumentation & Software**. User Guide Revision 1.136, 2012.

OTHONOS, A., **Fiber Bragg gratings**, Review of Scientific Instruments, vol. 68, p. 4309-4341, 1997.

PELEGRIN, J. de. **Análise e Desenvolvimento de Técnicas de Instrumentação Ótica Aplicada em Máquinas Elétricas**. 2020. 86 f. Qualificação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

PFEIFFER, F. C. **Einfluß ionisierender Strahlung auf die Funktionsfähigkeit faseroptischer Bragg-Gitter-Sensoren**. , p. 106, 2000. Disponível em: <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet/Document-5043/index.html>. Acesso em: 14 maio 2018.

SCHOEN, R. R. et al., **Motor bearing damage detection using stator current monitoring**, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, pp. 1274–1279, Nov./Dez. 1995.

RENZO, A. B. D.. **Relatório Final de Estágio Supervisionado**. Pato Branco, 2014.

SILVA, J. C. C. **Monitorização de Vibrações de Estruturas com o Emprego de Sensores em Fibra Óptica**. p. 194, 2005.

SUÁREZ, L.L. **Conhecimento Sensorial – Uma Análise segundo a Perspectiva da Semiótica Computacional**, Tese de Mestrado - DCA-FEEC-UNICAMP, 2000. Disponível em: <http://www.dca.fee.unicamp.br/~gudwin/ftp/publications/TeseLizet.pdf>. Acesso em: 14 maio 2018.

TRIGEASSOU, J. (Ed.). **Electrical Machines Diagnosis**. John Wiley & Sons, 2011.