

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALAN RAMOS DOPKER
DAVI SCHLOSSMACHER
THIAGO ARNON MOREIRA DE CASTILHO

**FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DE EXCENTRICIDADE EM MOTORES DE
INDUÇÃO UTILIZANDO SENSORES A FIBRA ÓTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

ALAN RAMOS DOPKER
DAVI SCHLOSSMACHER
THIAGO ARNON MOREIRA DE CASTILHO

**FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DE EXCENTRICIDADE EM MOTORES DE
INDUÇÃO UTILIZANDO SENSORES A FIBRA ÓTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do curso de Engenharia Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: **Professor Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva**

Coorientador: **Professor Ms. Ednilson Soares Maciel**

CURITIBA

2017

Alan Ramos Dopker
Davi Schlossmacher
Thiago Arnon Moreira de Castilho

Ferramenta Para Avaliação de Excentricidade em Motores de Indução Utilizando Sensores a Fibra Ótica

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, 05 de outubro de 2017.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

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

ORIENTAÇÃO

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

Ednilson Soares Maciel, Ms.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-orientador

BANCA EXAMINADORA

Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ednilson Soares Maciel, Ms.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Aparecido Batista, Ms.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Nosso agradecimento a Deus por ter dado a vida a cada um de nós. Por ser o proporcionador das oportunidades que tivemos, bem como do conhecimento que pudemos adquirir.

Nossa equipe deixa aqui registrado o nosso mais profundo agradecimento e reconhecimento a todos aqueles que nos acompanharam em nossa jornada de formação, nos auxiliando, ensinando, ou estando em nossos lados por todas as situações.

A Aline Gabriele Valério, meu amor, pelo seu apoio, carinho e compreensão em todos estes anos de caminhada ao meu lado. A meus pais, Sidney e Mirian, com toda dedicação que sempre tiveram para que eu pudesse chegar até aqui. Meus irmãos, Lucas e Rafael pelo companheirismo e amizade de tantos anos morando fora de casa - agradecimento especial do Davi.

Aos meus pais, Leonor e Rui, que sempre me apoiaram e estiveram presentes em todas as etapas importantes da minha vida e da trajetória acadêmica até aqui. Ao meu irmão, Marlon, que será sempre uma referência de pessoa e inteligência a ser seguida. Por fim, dedico ainda, este trabalho em memória de meu pai, Rui Carlos Dopker, que nos deixou muito cedo – agradecimento especial de Alan.

A minha mãe Ingrid por me proporcionar a oportunidade de chegar até aqui com seu apoio e com seu amor. As minhas irmãs Ana Paula e Bruna que sempre estiveram ao meu lado sendo grandes companheiras e amigas. Aos meus amigos por sempre estarem dispostos a me ajudar. Em especial dedico esse trabalho ao meu pai Ezequiel, que por mais que não esteja mais aqui, sempre foi meu maior exemplo de ser humano e homem que devo me tornar – agradecimento especial do Thiago.

Aos professores da UTFPR, especialmente nosso orientador Professor Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva, e nosso coorientador Professor Ms. Ednilson Soares Maciel, pelas horas dedicadas ao ensino que nos foi necessário para concluir este trabalho.

A todo o pessoal do LabESO pelas contribuições de conhecimento, equipamentos e instalações. Aos colegas do laboratório, André, Uilian, Rafael e Igor, que em diferentes etapas deste projeto estiveram nos auxiliando e colaborando para o nosso aprendizado.

Ao laboratório de Fotônica – FOTON por ter cedido o laser para gravação dos sensores.

RESUMO

DOPKER, Alan Ramos; SCHLOSSMACHER, Davi; CASTILHO; Thiago Arnon Moreira 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.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento e apresentação de um sistema de aquisição e tratamento computacional de dados para avaliação espectral de componentes harmônicas na vibração do motor que surgem a partir da presença de excentricidade dinâmica no eixo do rotor por carga desbalanceada. Para atingir este objetivo, o trabalho fez uso da técnica de sensoriamento ótico baseado em redes de Bragg. Um motor de indução foi instrumentado com dois conjuntos de quatro sensores gravados em fibra ótica monomodo padrão telecomunicações, o primeiro conjunto monitorando a vibração nos dentes do estator, e o segundo a vibração na cabeça de bobina. Os sinais foram adquiridos por um interrogador ótico ligado a um computador via comunicação Ethernet e processados pelo software LabVIEW. A partir do software desenvolvido neste estudo é possível interpretar e manipular os dados, apresentando a resposta no domínio da frequência da vibração para determinar características específicas do funcionamento da máquina. O software apresenta maleabilidade para diferentes instrumentações e adaptabilidade para futuros estudos, necessitando de pequenas alterações para desempenhar outras funções de análise.

Palavras-chave: Excentricidade, máquinas elétricas, Redes de Bragg em fibra ótica, instrumentação virtual.

ABSTRACT

DOPKER, Alan Ramos; SCHLOSSMACHER, Davi; CASTILHO; Thiago Arnon Moreira de. Evaluation technique of eccentricity in inductions motors utilizing optical fiber sensors. Course Conclusion Paper for Bachelor Degree Graduation in Electrical Engineering – Electrotechnology Academic Department – DAELT, Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2017.

The present work consists in the development and presentation of an acquisition and computational treatment system of data for spectral evaluation of harmonic components in the motor vibration that emerges from the dynamic eccentricity presence in the rotor axis, due to unbalance load. To achieve this goal, this work made use of the optical sensing technique called Fiber Bragg Grating. Two single-mode optical wires were engraved with four sensors each, the first one monitoring the vibration in the stator's teeth, and the second one the vibration in the coil's head. The signals were acquired by an optical interrogator connected to a computer via Ethernet communication, and processed by the software LabView. From the developed software, it is possible to expound and manipulate the data, exhibiting both the response in the time domain and vibration frequency to define the specific machine's characteristics. The software shows malleability to different instrumentations, and adaptability for future studies, requiring few alterations to make other analysis functions.

Key-words: Eccentricity, electrical machines, Fiber Bragg Gratings in optical fibers, virtual instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da excentricidade em um motor.	6
Figura 2: Ilustração de uma rede de Bragg uniforme	7
Figura 3: Barras e anéis de curto circuito de um rotor.....	10
Figura 4: Detalhes Estator.....	11
Figura 5: Rotor em gaiola de esquilo de grande porte.....	12
Figura 6: Geometria de um rolamento típico.	14
Figura 7: Falha no rotor por barra e quebra de anel de curto-circuito.....	15
Figura 8: Diferentes tipos de excentricidade.....	17
Figura 9: Espectro de frequência de deformação de um motor de indução trifásico de quatro polos operando a vazio.	19
Figura 10: Padrão de interferência no índice de refração de uma fibra ótica sendo formado, caracterizando a gravação de uma FBG.	20
Figura 11: Esquema da montagem experimental.....	25
Figura 12: Entrada de parâmetros para a aquisição no programa LabVIEW.....	27
Figura 13: Janela “Configurações e Sensores” do programa em Labview.	29
Figura 14: Janela “Frequência (FFT) do programa em Labview.	30
Figura 15: Diagrama de blocos da FFT.....	31
Figura 16: Máscara de fase na gravação de uma rede de Bragg.	33
Figura 17: Colagem da fibra na cabeça de bobina do estator. Fonte: Autoria Própria	35
Figura 18: FBG’s perdidas na colagem.....	36
Figura 19: FBG’s posicionadas, à esquerda motor sem tampa e rotor; à direita, o motor com tampa fechada e as fibras saindo da tampa.	36
Figura 20: Contrapeso para criar a excentricidade forçada.	38
Figura 21: Montagem dos equipamentos para ensaio	38
Figura 22: FFT da FBG da cabeça de bobina do ensaio a vazio.	40
Figura 23: FFT da FBG da cabeça de bobina do ensaio com excentricidade.	40
Figura 24: FFT da FBG dos dentes do estator do ensaio a vazio.	41
Figura 25: FFT da FBG dos dentes do estator do ensaio com excentricidade	41
Figura 26: FBG 1 - Dentes do Estator (A Vazio)	43
Figura 27: FBG 2 - Dentes do Estator (A Vazio)	43

Figura 28: FBG 3 - Dentes do Estator (A Vazio)	43
Figura 29: FBG 4 - Dentes do Estator (A Vazio)	44
Figura 30: FBG 4 – Bobina (A Vazio).....	44
Figura 31: FBG 2 - Dentes do Estator (Excentricidade).....	45
Figura 32: FBG 1 - Dentes do Estator (Excentricidade).....	45
Figura 33: FBG 3 - Dentes do Estator (Excentricidade).....	46
Figura 34: FBG 4 - Dentes do Estator (Excentricidade).....	46
Figura 35: FBG 4 – Bobina (Excentricidade)	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Porcentagens de falhas em motores elétricos de indução	13
Tabela 2: Especificações motor de indução.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	5
1.1. INTRODUÇÃO.....	5
1.2. PROBLEMAS	7
1.3. OBJETIVOS	8
1.3.1. OBJETIVO GERAL.....	8
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TIPO GAIOLA DE ESQUILO	10
2.1.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	10
2.2. FALHAS EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO	13
2.2.1 FALHAS DE ROLAMENTO.....	14
2.2.2 FALHAS NO ROTOR.....	15
2.2.3 FALHAS DE EXCENTRICIDADES DO ENTREFERRO	16
2.3 FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS DE DEFORMAÇÃO	18
2.4 SENSORES A REDES DE BRAGG	19
2.4.1 FBG COMO SENSOR DE TEMPERATURA	22
2.4.2 FBG COMO UM SENSOR DE DEFORMAÇÃO	22
2.4.3 MULTIPLEXAÇÃO	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 METODOLOGIA	24
3.2 SISTEMA DE MONITORAÇÃO.....	24
3.3 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO	26
3.4 MÉTODO DE GRAVAÇÃO	32

3.5	COLAGEM.....	34
3.6	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	37
3.6.1	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	39
4.1.1	ENSAIOS DE CONTROLE.....	39
4.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM O SOFTWARE LABVIEW	41
4.2.1	ENSAIOS A VAZIO.....	42
4.2.2	ENSAIOS COM EXCENTRICIDADE	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5.1	CONCLUSÃO.....	48
5.2	TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. INTRODUÇÃO

Devido ao atual aumento do custo da energia elétrica e a sua disponibilidade limitada, a otimização da eficiência energética tem sido um tema de intensa pesquisa. Dentro deste contexto, as máquinas elétricas rotativas ocupam posição proeminente. Além disso, os custos devido à manutenção de máquinas podem representar 40% do custo final de um produto (ALMEIDA, 1996). Estudos indicam que um terço dos gastos com manutenção é desperdiçado em procedimentos inadequados ou desnecessários (BACCARINI, 2005), portanto, aprimorando-se os resultados obtidos de uma medição e da consequente análise em uma máquina deste tipo podem representar uma redução em custos, tanto de manutenção, quanto em relação à eficiência energética.

Motores de indução possuem diversas aplicações e embora sejam robustos e confiáveis, se expostos a esforços indesejáveis podem apresentar falhas. Pesquisadores têm estudado uma variedade de falhas nesses motores, entre as quais podem-se destacar algumas como: nos enrolamentos do estator, rotor desbalanceados, barras quebradas do rotor, excentricidades e falhas nos rolamentos (SIDDIQUE et al, 2005). É imprescindível que haja um monitoramento constante e confiável nesses motores, a fim de otimizar o uso e garantir a operação dentro das condições normais da máquina. Além de que, tal monitoramento decorre em uma ágil identificação de defeitos para que manutenções preditivas possam ser programadas, e a falha evitada.

Em um motor ideal, de excentricidade zero, onde os centros do rotor e do estator coincidem, as forças radiais são eliminadas e o conjunto de forças atuando entre os dois corpos cilíndricos é zero e a única vibração na máquina é o dobro da frequência da alimentação do motor (DE MORAIS SOUSA, *et al*, 2015). Portanto, o posicionamento assimétrico durante a rotação do rotor em relação ao estator caracteriza a existência de uma vibração, a qual pode causar perdas, desgaste mecânico e elétrico nos componentes da máquina. A figura 1 ilustra o deslocamento de posição e rotação do eixo do rotor em relação ao eixo geométrico do estator, caracterizando a excentricidade.

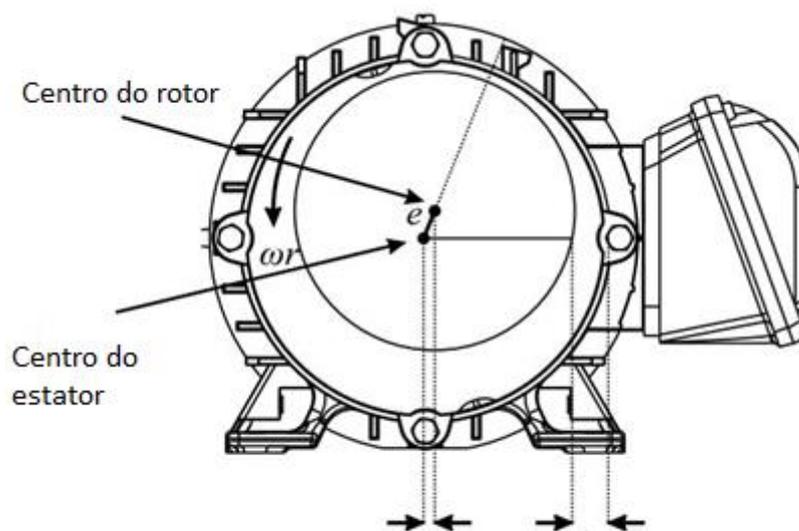


Figura 1: Ilustração da excentricidade em um motor.

Fonte: Adaptado de DE MORAES SOUSA et al. 2015.

Os desequilíbrios em motores trifásicos de indução são classificados como estáticos e dinâmicos. O desequilíbrio estático é causado quando o eixo do rotor não está alinhado com o centro do estator, enquanto este ainda rotaciona sobre o eixo fixo, ao passo que o desequilíbrio mecânico ocorre quando o rotor não gira sobre um eixo fixo e ao mesmo tempo está em rotação ao redor do eixo físico do motor (DE MORAIS SOUSA, *et al*, 2015).

Para lidar com a crescente demanda de projetos confiáveis, motores elétricos de grande porte devem ser constantemente monitorados, dando um retorno imediato onde os dados são simultaneamente usados para analisar o funcionamento e se necessário diagnosticar o defeito do motor. Neste contexto, sensores de fibra ótica são altamente recomendados para medir, ou monitorar temperatura, velocidade, excentricidade e outros parâmetros de motores a indução com precisão. Em vista de superar desafios que podem ser encontrados em medições, desafios estes como tamanho do sensor, interferências eletromagnéticas e capacidade de multiplexação, o uso de redes de Bragg em fibras óticas (FBG - *Fiber Bragg Grating*) é uma solução de grande confiabilidade e que atende aos requisitos citados (FABIAN et al, 2015).

Segundo Cheng e Oostdijck (2002) em ambientes inadequados para o uso de sensores elétricos como, por exemplo, em altas tensões, ou na presença de fortes campos eletromagnéticos, sensores de fibra ótica apresentam-se como uma solução adequada. Estes são intrinsecamente seguros, tem potencial de multiplexação, são pequenos e leves, podendo ser incorporados em estruturas compósitas. Em redes de Bragg em fibra ótica é possível gravar,

em uma mesma fibra ótica, vários dispositivos com diferentes comprimentos de onda de Bragg, que podem realizar diferentes medições.

Redes de Bragg constituem-se em uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra, ao longo da direção longitudinal. A existência dessa modulação provoca em um feixe de luz com ampla largura espectral de propagação nessa fibra, a reflexão seletiva de uma banda estreita dessa luz, centrada em um comprimento de onda específico, conhecido como comprimento de onda de Bragg. (CARDOZO, 2005). O princípio de difração nas redes de Bragg é melhor explicado em 2.4. A figura 2 ilustra o princípio de reflexão de redes de Bragg em uma fibra ótica.

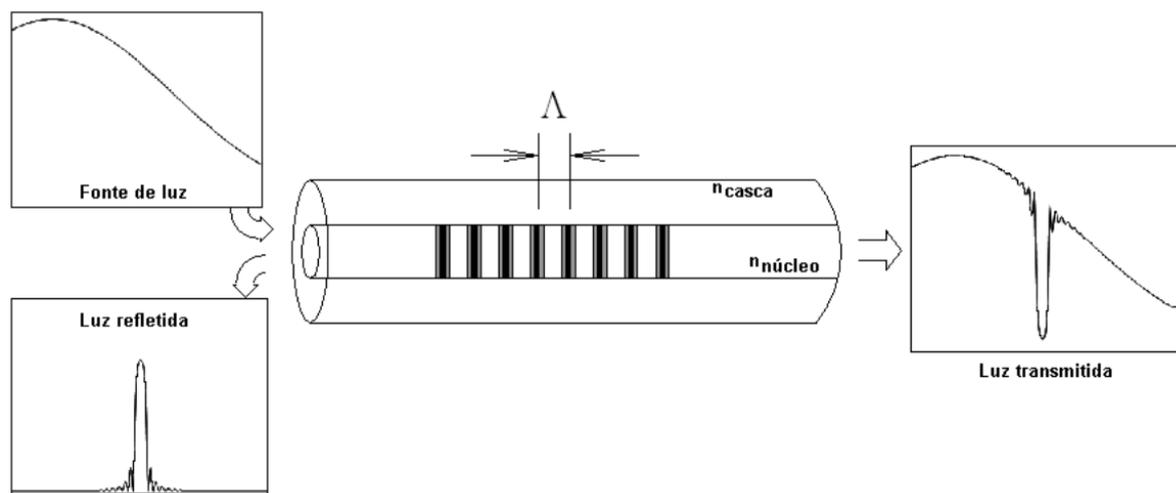


Figura 2: Ilustração de uma rede de Bragg uniforme

Fonte: MENEGOTTO 2006.

1.2. PROBLEMAS

Máquinas elétricas nas suas mais diversas aplicações sofrem desgastes com o tempo que tornam o seu funcionamento comprometido. A aplicação de cargas indevidas no eixo do rotor e a possível falta de manutenção nos componentes elétricos e mecânicos podem acarretar a alteração da excentricidade original entre rotor e estator, gerando assim, um desequilíbrio no movimento da máquina que pode ser observado pela presença de vibrações adicionais.

O controle de velocidade através da parametrização de inversores de frequência pode ser uma alternativa temporária para tais problemas, uma vez que o desgaste mecânico dos componentes diminui se a máquina opera em velocidades menores.

Entretanto, a opção por esta alternativa não é considerada a ideal, pois agora, o sistema não funciona dentro das condições normais de operação. A solução atualmente encontrada no

mercado é o emprego de sensores específicos para a análise dos parâmetros da máquina e assim a detecção de problemas mecânicos ou elétricos. Nestes casos, segundo Silva (2005), sensores baseados em transdutores capacitivos e piezoelétricos têm seu uso prejudicado pelo ambiente desfavorável, tendo em vista a intensa interferência eletromagnética.

A aplicação de sensores confiáveis, de fácil utilização e que não sofram distúrbios na medição da máquina seria a opção ideal para a captação das variáveis de interesse que refletem o comportamento da máquina ao longo do tempo. Dessa forma, conhecendo as causas dos desgastes e perdas presentes, de um modo mais confiável, podem-se resolver os problemas encontrados.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é criar uma ferramenta de monitoramento, aplicando sensores de fibra ótica baseados em redes de Bragg, com a finalidade de diagnosticar defeitos ocasionados por excentricidade em um motor de indução assíncrono, podendo os mesmos resultados serem aplicados a máquinas similares de grande porte.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar estudo sobre o funcionamento de fibra ótica, otimizada pela tecnologia das redes de Bragg;
- Fazer revisão da bibliografia de máquinas elétricas e análise de respostas temporais e espectrais das variáveis consideradas;
- Montagem e implementação do circuito sensor;
- Desenvolver interface para medições no LabView;
- Realizar ensaios;
- Análise de resultados.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

- O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral constituída de uma descrição do problema, a justificativa, o objetivo geral e os específicos, bem como o método de pesquisa.
- O segundo capítulo trás o referencial teórico, contendo o embasamento teórico necessário para o correto desenvolvimento do projeto, abordando temas como máquinas elétricas.
- O terceiro capítulo apresenta o sistema de monitoração, os procedimentos de instrumentação adotados e a estrutura da interface desenvolvida e o arranjo experimental, além de uma explicação sobre fibras óticas e sensores a redes de Bragg.
- O quarto capítulo introduz a análise de vibração, os resultados obtidos através das aquisições, resultados e discussões.
- O quinto, e último capítulo, aborda as considerações finais do trabalho, sendo estas a conclusão e propostas para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TIPO GAIOLA DE ESQUILO

O objetivo de funcionamento de um motor, independentemente do seu tipo ou fabricação, é sempre a conversão de energia eletromecânica. Na grande maioria das aplicações comerciais e industriais são usados motores de indução por apresentarem maior robustez e serem de aspectos construtivos mais baratos quando em produção a grande escala.

Dentre as máquinas de indução existem duas vertentes diferenciadas pelos aspectos construtivos do rotor. A máquina pode ser do tipo rotor bobinado, onde a indução de corrente no rotor ocorre por meio de bobinas, normalmente curto-circuitadas em estrela, ou então ela pode ser do tipo rotor gaiola de esquilo, nome dado porque as barras de curto circuito responsáveis pela circulação da corrente do rotor se parecerem com uma gaiola de esquilo rotativa. Este último tipo é ainda mais aplicado porque estas barras e os anéis de curto circuito em sua extremidade podem ser feitas de alumínio, para motores menores do que 400 cv, dando maior leveza e menor custo para a peça. As barras e os anéis de curto circuito podem ser vistos na Figura 3.



Figura 3: Barras e anéis de curto circuito de um rotor.
Fonte: (EMATSU, 2008)

2.1.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

As máquinas elétricas girantes, em sua totalidade, são constituídas de partes mecânicas e elétricas que podem apresentar diferentes configurações de construção. Essa alta variedade possibilita a existência de diversos tipos de máquinas e aplicações. Um caso específico, é o motor de indução, que será utilizado neste trabalho para o emprego dos sensores a fibra ótica.

Estes motores apresentam quatro peças construtivas principais, o estator, o rotor, o entreferro e o eixo. Estes, dentre vários componentes, são de interesse neste trabalho pelo fato de serem diretamente influenciados pelo efeito da excentricidade quando esta surge no rotor.

O estator é o componente que não realiza movimento mecânico. É responsável pela produção de campo magnético que será usado para orientar o sentido do torque aplicado sobre o eixo do rotor. O estator apresenta bobinas enroladas em torno de um material ferromagnético capaz de orientar as linhas de fluxo. Essas bobinas recebem o nome de enrolamento de armadura, e estão dispostas em ângulo de 120° elétricos entre si, em motores trifásicos.

A Figura 4 mostra os detalhes construtivos das ranhuras do estator, bem como as cabeças de bobina e os grampos de fixação.

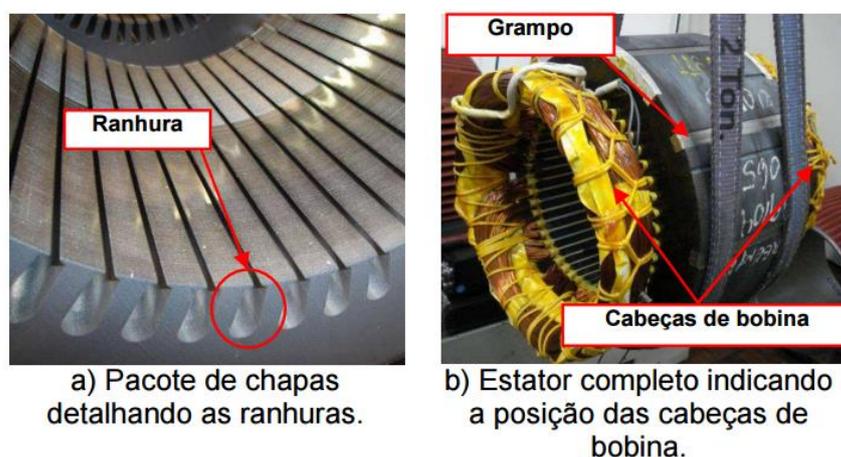


Figura 4: Detalhes Estator
Fonte: (GONÇALVES, 2012)

O rotor é responsável pelo movimento mecânico e pode apresentar no caso de motores de indução as configurações anteriormente mencionadas do tipo bobinado, ou gaiola de esquilo.

Nas máquinas por indução, as correntes alternadas são aplicadas diretamente aos enrolamentos do estator, e então, correntes no rotor são produzidas por indução, isto é, por ação da indução (FITZGERALD, 2006).

O rotor do tipo gaiola, objeto de testes e estudo deste trabalho, é construído da seguinte maneira: O eixo mecânico é acoplado à chapas isoladas de material ferromagnético que formam o núcleo magnético do rotor. O Núcleo é perpendicularmente atravessado pelas barras de curto circuito, e que podem ser de alumínio para motores de pequeno e médio porte, e em máquinas de grande potência de cobre (BOLDEA; NASAR, 2009). Estas barras são dispostas paralelamente, e interligadas nas extremidades por anéis de curto circuito, responsáveis por permitir que a corrente rotórica percorra as barras conforme o campo girante esteja as induzindo. Na Figura 5 demonstra-se o aspecto de um rotor de grande porte com barras de

cobre. Lembrando que as barras de cobre estão inseridas no interior do núcleo magnético e a estrutura ranhurada cinza escura são as chapas isoladas que constituem o núcleo.

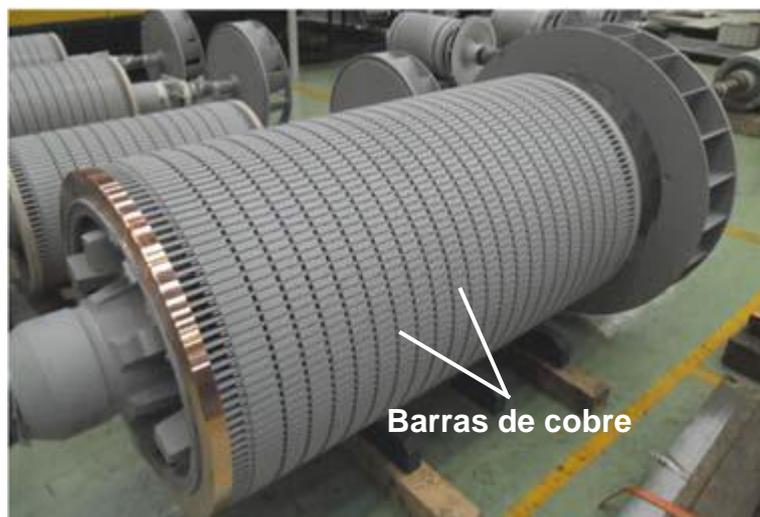


Figura 5: Rotor em gaiola de esquilo de grande porte.
Fonte: (WEG; Curso DT-6, 2015)

O conjunto estator-rotor é responsável pela operação mecânica do motor de indução. Por conta da elevada massa do rotor, devido à sua construção robusta, ocorre um atraso de movimento até este conseguir sair do repouso, este atraso denominamos de escorregamento, que resulta na diferença de sincronismo entre os campos do estator e do rotor. Este atraso de movimento do rotor, por efeito de transformador, dá origem às correntes induzidas no mesmo, provocando assim, o conjugado de fluxo. Em geral, motores de indução, por conta deste efeito, funcionam em velocidades de rotação inferiores à velocidade síncrona (FITZGERALD, 2006).

Entre o estator e rotor, há um espaçamento existente em toda extensão do núcleo de chapas do rotor, o chamado entreferro, nesta região ocorre a maior concentração de linhas de fluxo magnético devido à alta relutância.

A região do entreferro será de grande importância para a aplicação dos sensores de fibra ótica. Os sensores serão alocados no entreferro de modo a medir a deformação deste espaçamento, com base na teoria das Redes de Bragg, para que possa ser determinado qual a excentricidade e desvio no rotor.

O eixo do motor é de grande importância para o estudo deste trabalho. O seu desempenho durante a operação da máquina irá influenciar diretamente nos parâmetros elétricos e magnéticos da interação entre rotor e estator. Parâmetros estes a serem adquiridos e analisados pelo sensor e que servirão para as conclusões do trabalho.

Pelo fato desta peça mecânica estar rigidamente acoplada ao rotor, e em concordância dos eixos de rotação, a velocidade angular, a excentricidade, e as vibrações de uma são transferidas a outra. Consideração importante, tendo em vista o estudo da excentricidade e suas consequências, para a detecção de defeitos similares.

2.2. FALHAS EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) é uma máquina de uso diversificado. É utilizado largamente em ambientes industriais, onde geralmente apresentam condições adversas que podem levar a máquina à extenuação devido a um funcionamento inadequado, portanto, apesar de possuírem robustez, podem apresentar falhas. Estas falhas podem ser previstas ou inesperadas e são geralmente divididas em dois grupos principais: falhas mecânicas e elétricas. A descrição dessas falhas segundo (TOLIYAT et al., 2012) são as que se seguem:

- Falhas elétricas: circuito aberto ou curto circuito nos enrolamentos do motor, devido principalmente a uma falha no isolamento do enrolamento, conexão errada dos enrolamentos, elevada resistência nos contatos do condutor, conexão errada ou instável do aterramento.
- Falhas mecânicas: quebra da barra do rotor, perda da magnetização, ou desmagnetização parcial, trincas ou quebra nos anéis do rotor, empenamento do eixo, afrouxamento de parafusos, falhas nos rolamentos, irregularidades no entreferro da máquina (excentricidade).
- Falhas no acionamento do motor: falha do sistema inversor, tensão instável/fonte de corrente, alimentação em curto ou aberta.

Um estudo estatístico presente no trabalho de (BONNETT e YUNG, 2008), apresentado na Tabela 1, mostra a distribuição das falhas em um MIT.

Tabela 1: Porcentagens de falhas em motores elétricos de indução

	(BONNETT e YUNG, 2008)
Rolamento	69%
Estator	21%
Anéis/ Barras de Rotor	7%
Eixo/ Acoplamento	3%

Nessa distribuição pode-se observar que falhas em máquinas elétricas, são devidas, principalmente, aos rolamentos e a bobina do estator. Estas falhas são de diferentes características e ocasionadas por diferentes motivos.

2.2.1 FALHAS DE ROLAMENTO

Os defeitos de rolamento segundo (BONNETT, 2012) correspondem a 51% dos encontrados nos motores elétricos, sendo o principal componente associado a falhas. Isso porque eles não trabalham sob condições ideais nas indústrias, estando sujeitos a fadiga, vibrações mecânicas, sobrecarga, desalinhamento do eixo, contaminações, flutuações na corrente, corrosão e má lubrificação. Essas condições não ideais começam a causar defeitos marginais que se espalham no interior e exterior dos elementos de rolamento (TOLIYAT et al., 2012). Mesmo em condições de operação normal, estando com um alinhamento adequado do eixo, falhas por fadiga podem ocorrer.

Vibrações, esforços internos, excentricidades e correntes harmônicas têm influência efetiva no desenvolvimento de tais falhas (BELLINI et. al., 2008). O rolamento é composto por diferentes componentes (Figura 6), estando todos sujeitos a desgaste.

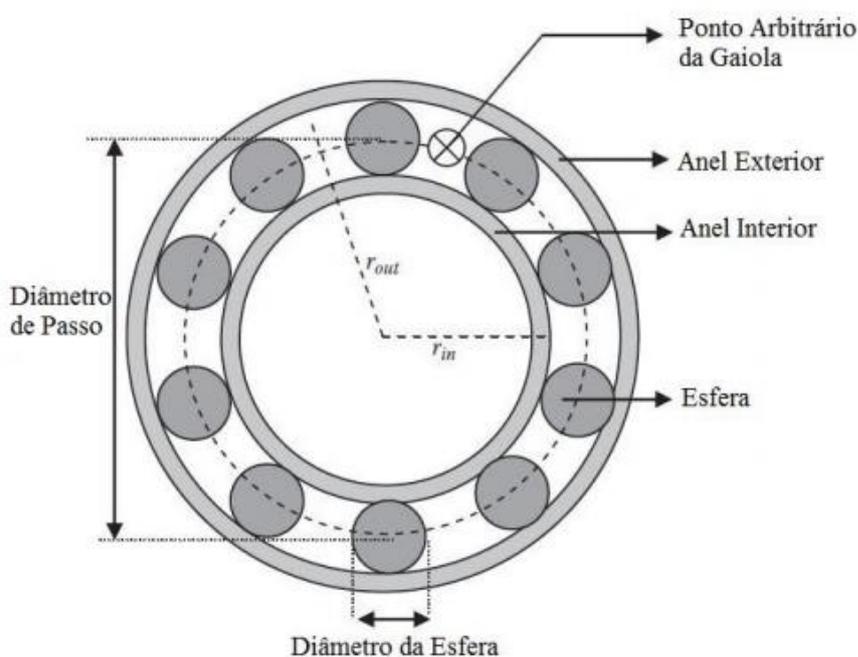


Figura 6: Geometria de um rolamento típico.
Fonte: Adaptado de (TOLIYAT et al., 2012)

As falhas nos rolamentos podem ser diagnosticadas através das análises de vibração, detectando componentes com frequências características de defeitos e suas harmônicas. O

prognóstico de falha não se baseia apenas na intensidade dessas componentes, mas também no padrão de distribuição de energia pelas diversas bandas no espectro de frequência, o que permite identificar o estado de degradação do rolamento (ARAÚJO, 2015).

2.2.2 FALHAS NO ROTOR

Rotores do tipo gaiola de esquilo apresentam vantagem em relação aos rotores bobinados, pois além de não existir contato elétrico o sistema é mais robusto, confiável e apresenta custo reduzido de aquisição. Dentre as falhas classificadas para rotores do tipo gaiola de esquilo, a quebra na barra do rotor e as rachaduras nos anéis finais compartilham de 5% a 10% das falhas em máquinas de indução (BELLINI et. al., 2008). A melhoria do projeto, a qualidade de construção das barras de curto-circuito e a manutenção de rotina de rolamentos têm minimizado essas avarias. Assim, as falhas do rotor estão se tornando a principal causa da degradação dos grandes e médios motores (NAHA et al., 2016).

Vários fatores podem provocar a quebra de uma barra da máquina, como térmicos, magnéticos, dinâmicos, mecânicos e do ambiente. No que diz respeito aos fatores térmicos, estes ocorrem devido a variações de temperatura que podem ser causados por um excesso de carga ou distribuição não uniforme da mesma devido a irregularidades no material. Os fatores magnéticos ocorrem devido a vibrações eletromagnéticas ou forças magnéticas assimétricas, enquanto os dinâmicos se devem ao binário axial ou à força centrífuga. Por fim, fatores mecânicos e ambientais ocorrem devido à degradação de certas partes da máquina e a produtos químicos ou umidade, respectivamente (ASSUNÇÃO, 2014).

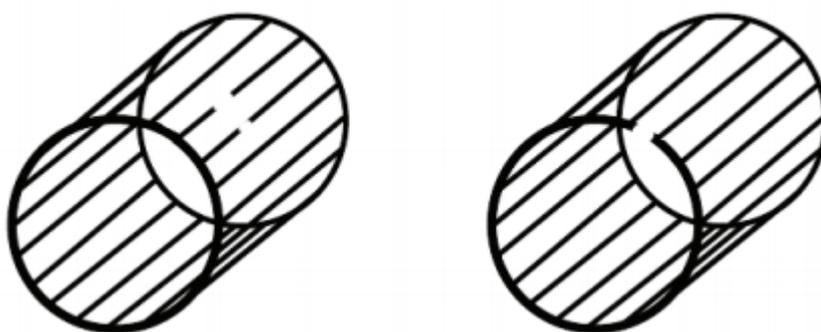


Figura 7: Falha no rotor por barra e quebra de anel de curto-circuito.
Fonte: (TRIGEASSOU, 2011).

Uma barra partida (Figura 7) no rotor pode também ser considerada uma assimetria no mesmo, causando pulsações de binário, correntes desequilibradas, diminuição do binário médio e aumento de temperatura da máquina (ASSUNÇÃO, 2014). A corrente nas barras do rotor

adjacente ao defeito aumenta até 50% da corrente nominal, enquanto no estator, a variação é de uma pequena porcentagem da corrente nominal do estator (BELLINI et. al., 2008). Esta corrente maior irá causar um aquecimento global na máquina, podendo assim provocar avarias em outras barras e também em outros componentes do MIT ocasionando um desgaste nos enrolamentos. Por isso é importante solucionar o defeito no rotor, para que ele não cause maiores danos à máquina.

2.2.3 FALHAS DE EXCENRICIDADES DO ENTREFERRO

A excentricidade em um motor é uma folga desigual existente entre o estator e rotor. Quando há uma excentricidade no entreferro, as indutâncias variáveis causam desequilíbrio do fluxo magnético dentro do entreferro criando harmônicos de falha na corrente de linha, que podem ser identificados no espectro da frequência (TOLIYAT et al., 2012). Segundo (GODOY, 2016) a excentricidade pode ser classificada como estática, dinâmica ou mista.

- Excentricidade estática (Figura 8b): o centro de rotação do eixo é deslocado do centro original e uma distância permanece fixa, são normalmente causadas por um desalinhamento na rotação em relação ao pino do estator onde a causa mais frequente é uma falha no centro de flange.
- Excentricidade dinâmica (Figura 8c): o centro de rotação permanece na posição original, mas o eixo é deslocado, pode ser causado por uma curva no cilindro do estator, ou pela deterioração nos rolamentos de esferas.
- Excentricidade mista (Figura 8d): representa o centro e o eixo de rotação deslocados de suas respectivas posições de origem.

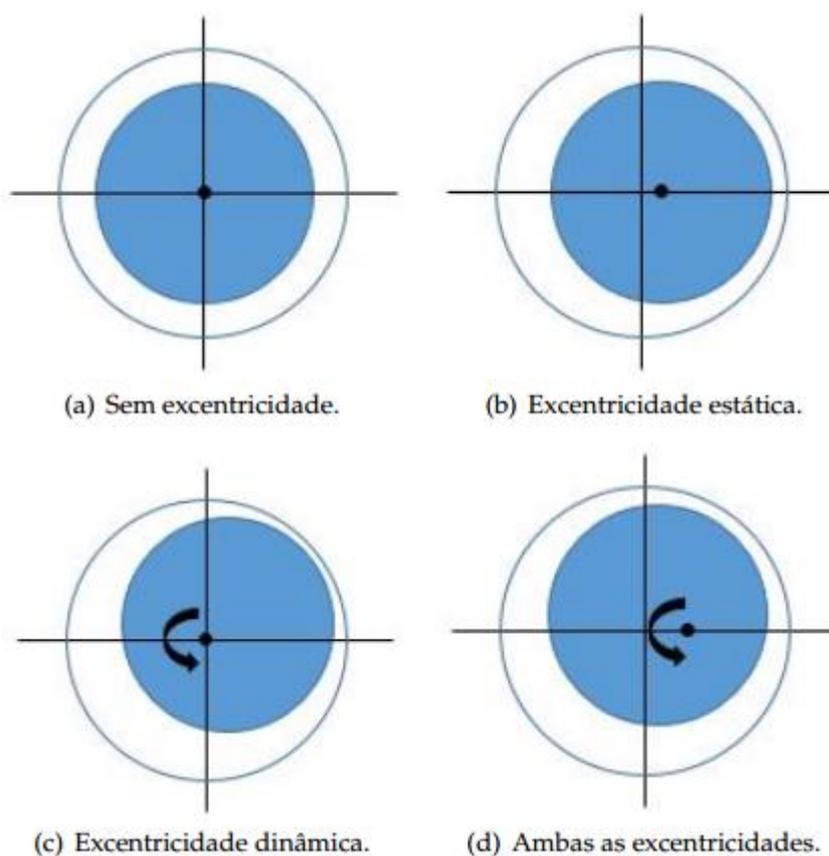


Figura 8: Diferentes tipos de excentricidade.

Fonte: (ASSUNÇÃO, 2014).

Uma excentricidade pode ser causada por vários fatores, tais como mal posicionamento do mancal durante a montagem do motor, desgaste do rolamento, inclinação do eixo do rotor. A excentricidade gera uma força no rotor que tenta arrancá-lo dos mancais suportados pelo estator, causando um significativo aumento em seus desgastes (SANTOS et. al., 2012). A alteração no circuito magnético causado pela excentricidade causa, à semelhança do que acontece com a avaria de barras partidas, o aparecimento de harmônicas na corrente de alimentação do estator. Estas harmônicas podem ser detectadas através da análise da corrente do estator e associadas à avaria (ASSUNÇÃO, 2014).

Cerca de 80% das falhas mecânicas levam à deformação da excentricidade intrínseca do motor. Outro ponto que vale a pena ser ressaltado é que a falha do rolamento pode provocar uma falha de excentricidade estática e dinâmica. Se o desgaste do rolamento for causado pelo peso do rotor (não desalinhado), a falha será de excentricidade estática. Se ocorrer o desgaste devido a presença de um desalinhamento do rotor, há a falha de excentricidade dinâmica. A falha causada pela excentricidade, tem impactos indesejáveis na máquina, como, aceleração do desgaste dos rolamentos, vibrações indesejáveis e nocivas à máquina, redução da eficiência e

aquecimento. Se esta falha não for resolvida, o estator e o rotor sofrerão com o roçamento o que gerará a consequente destruição do estator e do enrolamento (FAIZ; MOOSAVI, 2015).

No trabalho de Kim et al (2008) é proposto um método de diagnóstico que utiliza a corrente, o espectro de vibração e a força eletromotriz. É possível obter esses parâmetros, pois quando existe a excentricidade, a força magnética fica desequilibrada. Segundo (GODOY, 2016) o diagnóstico utilizando-se sinais de vibração e de corrente é prejudicado pelos harmônicos de chaveamento, pois esta força eletromotriz produzida pelas bobinas é comparada para um rotor em condições normais e também sob excentricidade.

Neste trabalho a metodologia de monitoramento da excentricidade será através de sensores de fibra ótica a rede de Bragg (FGB). Assim, a medição é realizada onde há a maior deformação devido às forças elétricas na região do entreferro. Tendo em vista que a instalação destes sensores na região onde os campos são mais intensos melhoram a aquisição, as características de imunidade eletromagnética e tamanho reduzido são vantagens significativas nesta aplicação.

2.3 FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS DE DEFORMAÇÃO

O fluxo magnético no entreferro do motor apresenta componentes harmônicas habituais decorrentes da variação do fluxo magnético segundo a rotação do vetor girante deste fluxo. Estas variações de campo resultam em forças aplicadas periodicamente em um determinado ponto do estator. As componentes de força podem neste caso ser usadas para medir a velocidade de rotação do motor, pois está diretamente relacionada à interação criada pelo campo magnético das correntes de reação do rotor. A componente gerada pela fonte de alimentação é duas vezes a frequência fundamental da alimentação (Grieger, J. 2006).

A presença de excentricidade no motor acarreta na variação da densidade magnética do espaço de ar entre rotor e estator, causa do alargamento e afinamento periódico do entreferro em cada ponto do estator, durante a rotação do eixo. Estas componentes harmônicas geram frequências distintas das fundamentais provenientes da rotação normal do motor e a frequência da sua fonte. No caso da excentricidade dinâmica esta componente aparece no espectro de $2f_s + f_r$, sendo f_s a frequência da fonte, e f_r a frequência do rotor (DE MORAIS SOUZA, 2016)

As frequências de deformação esperadas para um motor de indução trifásico de quatro polos são as combinações de frequências de forças mecânicas (frequência de rotação) e magnéticas (frequência da fonte de alimentação) que atuam na máquina $f_s, f_r, 2f_r, 2f_s, 2(f_s \pm f_r)$ e $2f_s \pm f_r$. Portanto, as frequências fundamentais de deformação são 30 Hz, 60 Hz, 90 Hz,

120 Hz, 150 Hz, 180 Hz. Sendo as componentes de 90 Hz e 150 Hz as que indicam a presença de excentricidade dinâmica. A figura 9 mostra experimentalmente o espectro de deformação do estator de um motor de indução de quatro polos e 3 cv operando a vazio alimentado pela rede elétrica com tensão trifásica de 220 V_{ac} e frequência de 60 Hz (DE MORAES SOUZA, 2016).

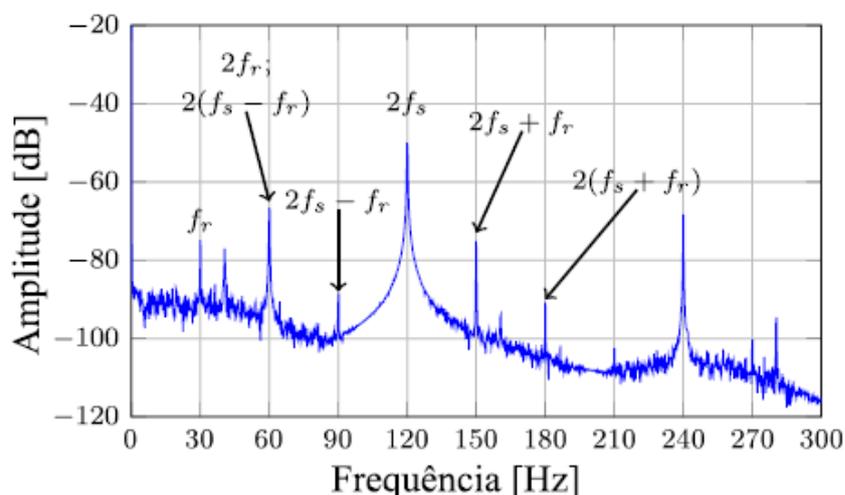


Figura 9: Espectro de frequência de deformação de um motor de indução trifásico de quatro polos operando a vazio.

Fonte: (DE MORAES SOUZA, 2016)

Neste estudo, para analisar os defeitos que causam as vibrações é necessário observar as componentes de frequência produzidas pelo defeito na região das frequências fundamentais de deformação. Serão analisadas duas regiões, uma delas em torno da frequência de rotação f_r , e a outra região em torno da frequência da fonte de alimentação $2f_s$.

2.4 SENSORES A REDES DE BRAGG

O princípio das redes de Bragg estão atualmente entre os mais utilizados para o método de sensoriamento em fibras óticas (CARDOZO, 2005). Segundo Thyagarajan, isto se dá pelas seguintes vantagens que o sensor a redes de Bragg apresentam:

- Imunidade a flutuações de intensidade da fonte ótica, uma vez que o sinal sensor se dá na alteração do comprimento de onda refletido, o que gera componentes fundamentais de frequência e não na intensidade da luz refletida;
- O comprimento de onda de Bragg apresenta uma resposta linear dentro de uma faixa de deformação mecânica e de temperatura;

- Os sensores são escritos diretamente na fibra e apresentam facilidade de multiplexação dado a reprodutibilidade confiável dos comprimentos de onda
- Grande capacidade serial de multiplexação. Isto a torna uma alternativa às tecnologias de sensores elétricos convencionais.

Além dessas vantagens, estes sensores apresentam imunidade à interferências eletromagnéticas e de radiofrequência, baixa perda relacionada ao comprimento da fibra, flexibilidade, tamanho reduzido, operação segura em ambientes onde existem materiais perigosos, alta sensibilidade e confiabilidade a longo prazo (CARDOZO, 2005). Características essas que para máquinas de grande porte, onde há intensos campos eletromagnéticos, grandes distâncias entre a central de aquisição de dados e o ponto de medição revelam-se um grande inconveniente por conta de interferências.

Um sensor FBG (*Fiber Bragg Grating*) é uma microestrutura com o comprimento típico de alguns milímetros que pode ser inserida no núcleo de uma fibra ótica monomodo padrão de telecomunicações. Isto é feito iluminando-se transversalmente à fibra com um raio laser UV e utilizando uma máscara de fase para gerar um padrão de interferência em seu núcleo, o qual irá induzir uma mudança permanente nas características físicas da matriz de sílica. Esta alteração consiste em uma mudança espacial periódica do índice de refração do núcleo que cria uma estrutura ressonante. A figura 10 mostra o processo de gravação através da máscara de fase.

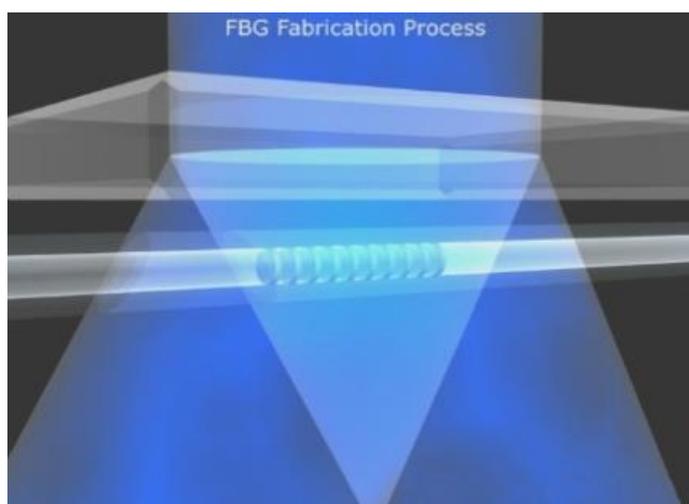


Figura 10: Padrão de interferência no índice de refração de uma fibra ótica sendo formado, caracterizando a gravação de uma FBG.

Fonte: <https://www.hbm.com/en/4596/what-is-a-fiber-bragg-grating/>

A fabricação de uma Rede de Bragg se dá a partir da modulação de índices de refração ao longo da fibra ótica, de modo a criar regiões longitudinais que apresentem diferentes

comprimentos de onda. A gravação é realizada pela exposição do cristal componente da fibra à luz UV, que gera os padrões de refração ao longo do seu comprimento. Esta modulação tem por finalidade a reflexão com alta intensidade de um comprimento de onda que seja semelhante ou igual ao comprimento gravado (CARDOZO, 2005).

A difração, para (HECHT, 2002), é uma característica geral de qualquer tipo de onda, seja ela sonora, onda de matéria ou luminosa e ocorre quando há um obstáculo sobre a frente de onda. Quando esta se depara com um corpo transparente ou opaco, a onda sofre na região da frente de onda uma mudança de intensidade e de fase – fenômeno da difração.

O estudo da difração apresenta o princípio de Huygens-Fresnel, que afirma que uma onda linear ou esférica que encontra em seu caminho um ponto de mesma ordem de grandeza de seu comprimento de onda, torna esse ponto uma nova fonte dessa mesma onda. (HECHT, 2002).

Em uma rede de Bragg, o efeito de difração ocorre a cada variação periódica do índice de refração ao longo do trecho gravado. O intuito do efeito de difração é de que em cada plano de alteração do índice de refração, a onda sofra uma reflexão construtiva. Como a rede é formada por vários destes planos, cada um contribuindo construtivamente ao outro, há uma centralidade de reflexão através do efeito de difração. A este efeito de reflexão dá-se o nome de comprimento de onda de Bragg (λ_B), apresentado pela equação 3.1 (HILL, 1978):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.4)$$

Assim, ocorrendo uma perturbação nas características físicas da região onde se formou a rede de Bragg, há por consequência uma alteração do índice de refração efetivo ou na periodicidade espacial. Os sensores a redes de Bragg fazem uso desta relação entre as características intrínsecas da fibra ótica e a reflexão de Bragg para identificar perturbações, como uma deformação mecânica ou uma variação de temperatura. A equação que rege o deslocamento espectral da onda ($\Delta\lambda_B$) em função das alterações de temperatura e deslocamento é dada por (Kersey *et al.*, 1997):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + \partial n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \partial n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.4.1)$$

onde T é a temperatura da fibra na rede de Bragg, e l é o seu comprimento. Esta equação pode ser utilizada para obter respostas e resultados numéricos de temperatura do motor de indução.

2.4.1 FBG COMO SENSOR DE TEMPERATURA

A sensibilidade à temperatura é intrínseca nos sensores FBG (*Fiber Bragg Grating*). Neste caso, o principal contribuinte para uma mudança no comprimento de onda de Bragg (*Bragg wavelength*) é a variação do índice de refração da sílica, induzido pelo efeito termo-ótico. Também há uma contribuição da expansão térmica, à qual altera o período da microestrutura. Este efeito é, no entanto, marginal devido ao baixo coeficiente de expansão térmica da sílica. A resposta entregue pela variação de temperatura em uma FBG é, portanto, uma resposta lenta no domínio do tempo. De forma sucinta, com o aquecimento, a fibra ótica se expande, variando o comprimento de Bragg de modo proporcional à variação de temperatura recebida (equação 2.4.1). Matematicamente podemos então determinar, por relação da equação, a temperatura em que um material, ou nesse caso a máquina elétrica se encontra.

2.4.2 FBG COMO UM SENSOR DE DEFORMAÇÃO

Quando a fibra é esticada ou comprimida, o sensor FBG irá medir deformação. Isso acontece porque a deformação de uma fibra ótica ocasionará uma variação da constante fotoelástica da fibra e uma mudança no período da microestrutura, o que resulta numa variação do comprimento de onda de Bragg (*Bragg wavelength*). Em um motor de indução, estas deformações apresentam componentes de algumas dezenas, ou centenas de Hertz em componentes senoidais, como apresentado em 2.3.

Portanto, as variações de temperatura não influenciam os resultados de análise de vibração, tendo em vista um ser, uma resposta lenta no tempo, e a outra, uma variação periódica e senoidal, que podem ser decompostas em suas frequências fundamentais.

2.4.3 MULTIPLEXAÇÃO

Como dito anteriormente, um sensor FBG possui a vantagem da multiplexação, podendo ser assim um sensor com características multiparamétricas. Isso significa que centenas de sensores podem ser colocados em uma única fibra ótica. Ao revestir adequadamente esses sensores, cada um deles pode se tornar sensível a outros parâmetros, além da temperatura ou deformação, como, por exemplo, pressão, aceleração, deslocamento, entre outros. Podendo cada um ser endereçado usando uma única fibra ótica e um canal de aquisição. A adição de

sensores em uma mesma fibra ocasionará uma perda mínima, sem sobreposição de sinais, desde que se reserve uma banda espectral suficiente do espectro de luz para cada sensor.

A FBG é uma microestrutura periódica que atua como um espelho seletivo de comprimento de onda, assim sendo, se a luz de uma fonte de banda larga for injetada na fibra ótica, apenas a luz dentro de uma região espectral muito estreita, centrada em comprimento de onda de Bragg, será refletida. A luz remanescente irá continuar seu caminho pela fibra ótica sem qualquer perda, mantendo assim, sua capacidade de interrogação de outros sensores que possam existir.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos de pesquisa da seguinte forma: arranjo experimental, teoria dos sensores FBG, método de gravação, máscara de fases, colagem das FBGs no motor, resultados da instrumentação, e por fim, a resposta do sistema para o motor operando a vazio e com desbalanceamento do rotor.

3.1 METODOLOGIA

O Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) da UTFPR-CT, tem por escopo de estudo o emprego de sensores a fibras óticas para a análise do comportamento vibracional e térmico de máquinas elétricas dentre outras aplicações.

Este trabalho tem como base os estudos já realizados no LabESO, que propuseram a inserção da FBG nos dentes do estator da máquina, dispostos com defasagens equivalentes entre si. O propósito deste trabalho é validar a implementação de uma ferramenta de instrumentação virtual desenvolvida pela equipe. Portanto, métodos previamente consolidados em outros trabalhos como de Brutkowski (2016) e de Moraes Souza (2016) são usados para referenciar os métodos de instrumentação e análise de resultados.

Um estudo paralelo foi realizado para avaliar a eficácia em instrumentar a cabeça de bobina do motor com outra fibra ótica gravada nos mesmos parâmetros da fibra instalada entre as ranhuras do estator. Assim, uma fibra pode ser usada como controle, e a outra ser comparada nos mesmos parâmetros de interesse. Esta nova posição de colagem entrega facilidade a futuros trabalhos ou implementações comerciais da instrumentação ótica de mesma finalidade de aquisição, pois é menos intrusiva à máquina.

3.2 SISTEMA DE MONITORAÇÃO

A necessidade da leitura de dados captados de forma confiável é fundamental para o estudo aprofundado de falhas em diversos campos da ciência. Uma vez que tais valores possam representar em campo situações operacionais problemáticas. Estas situações resultam em problemas de desempenho ou até falha total em um processo complexo e que não pode ser interrompido.

A aplicação de sensores confiáveis e de alta sensibilidade revela-se uma solução necessária quando a sua implementação visa a solução de problemas de desempenho e suas consequências sobre máquinas de grande porte, principalmente. De mesma importância, o componente responsável pela monitoração deve garantir uma maior qualidade de amostragem dos dados experimentais.

O sistema de monitoração, empregado neste trabalho, consiste na combinação de três partes fundamentais para a coleta e análise posterior dos dados. A primeira parte é formada pelos sensores de fibra ótica fabricados em laboratório. Para a instrumentação foram gravadas duas fibras óticas com quatro FBG's multiplexadas em cada fibra e instrumentadas no motor.

A segunda parte é a emissão e recebimento dos sinais óticos pelo interrogador. O dispositivo tem por finalidade emitir o sinal luminoso nas FBG's e receber os comprimentos de onda refletidos devidos às deformações causadas pelas condições da máquina – no estator e nas cabeças de bobinas – sobre os sensores gravados. O interrogador utilizado neste trabalho foi o SM-130 da MicronOptics, suas especificações estão apresentadas em 3.2.

A terceira parte é o desenvolvimento de um software em *LabView* que possibilite o recebimento dos sinais óticos, que coleta os dados adquiridos do interrogador e os apresenta em formas gráficas e em tempo real, proporcionando uma análise espectral das frequências encontradas quando a máquina está em funcionamento a vazio e com carga em seu eixo.

A figura a seguir apresenta o esquema completo de monitoração que será montado. Onde a leitura será feita pelo software que analisará os dados entregues pelo interrogador que por consequência recebe os sinais vindos das FBG's.

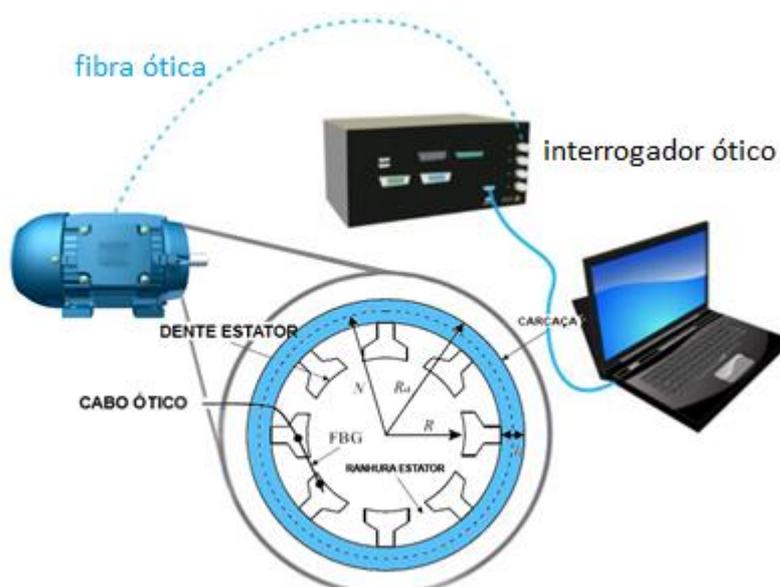


Figura 11: Esquema da montagem experimental.
Fonte: Autoria própria

3.3 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

O sistema de aquisição e processamento dos dados são dois sistemas distintos. Faz-se necessário um interrogador ótico para que as deformações sofridas pelas FBG's possam ser transformadas em dados digitais e estejam disponíveis para processamento através de um sistema de instrumentação virtual.

O interrogador da *Micron Optics*, SM-130 é um modelo de uso para pesquisas e fins comerciais de especificações e atribuições que satisfazem o interesse deste trabalho. O equipamento possui quatro entradas para canais óticos, que não necessitam de alimentação separada, ou seja, o canal emite o próprio sinal e faz a aquisição ao mesmo tempo. O interrogador também dispõe de protocolo de comunicação *Ethernet*, portanto ele pode estar ligado em uma rede por meio de um *switch* e ter suas aquisições disponíveis para mais de um computador ao mesmo tempo.

Especificações técnicas presentes no interrogador também contribuem para o seu uso neste trabalho. Ele pode operar em e taxas de aquisição diferentes dos dados: 100 Hz, 500 Hz ou 1000 Hz. Taxas estas dentro das frequências apresentadas em 2.3, e são de interesse na busca por excentricidade. O intervalo de comprimentos de onda que o interrogador realiza a leitura vão de 1510 nm até 1590 nm, dentro dos valores gravados nas fibras óticas. Outro aspecto contribuinte para o uso deste interrogador é o pacote de funções disponibilizado pelo fabricante para integração com o software usado para instrumentação virtual.

As características deste interrogador, somado às necessidades deste projeto, pautaram o desenvolvimento da programação para que esta possa ser não apenas compatível com as necessidades da pesquisa, mas também possa ser facilmente adaptado a futuras implementações.

O *software* utilizado para a demonstração e manipulação dos dados será o *LabView*, produto da *National Instruments*. Um programa responsável pela elaboração de interfaces gráficas que auxiliam na leitura e interpretação de dados mensurados. A interface proporcionada pelo *software* é dinâmica, providenciando uma interação entre usuário e o programa, delimitada pelo programador através das entradas numéricas ou booleanas. O arranjo é realizado de maneira gráfica pelo programador, utilizando diagramas de blocos que são compostos por funções específicas. Esta programação gráfica permite uma facilidade de manipulação das operações, o que é vantajoso para diversificar a sua aplicação e dar uma interpretação intuitiva das operações para o usuário (SANTOS, W.; 2013).

A programação em *Labview* é realizada através dos chamados Instrumentos Virtuais (VIs – *Virtual Instruments*) que são três componentes principais: o painel frontal; diagrama de blocos e o painel de ícones e conectores. O painel frontal realiza a interface gráfica e de informações com o usuário e pode também receber dados de entrada e comandos pelo usuário. Este painel é montado através de controles e indicadores. Os controles são os terminais interativos de entrada de um VI. Já os indicadores simulam dispositivos de saída do diagrama de blocos. Em um segundo momento o diagrama de blocos deve ser inserido como um VI. Nele são inseridas as lógicas de programação para controlar os objetos do painel frontal conforme as funções determinadas pelo usuário.

Como é de se esperar, as entradas do software não são apenas aquelas inseridas pelo usuário, mas é necessário que o programa se comunique com o sistema de aquisição, no caso o SM130, e forneça ao programador os dados de acordo com os parâmetros estabelecidos. O diagrama de blocos a seguir exemplifica um trecho do VI onde são fornecidos parâmetros pelo usuário para que o SM130 realize a aquisição, no caso os ganhos dos canais, a refração dos sensores, e a média; este último é um parâmetro para gerar filtros na aquisição. O trecho do VI mostrado na figura 12 apresenta o diagrama de blocos da aquisição de alguns destes parâmetros.

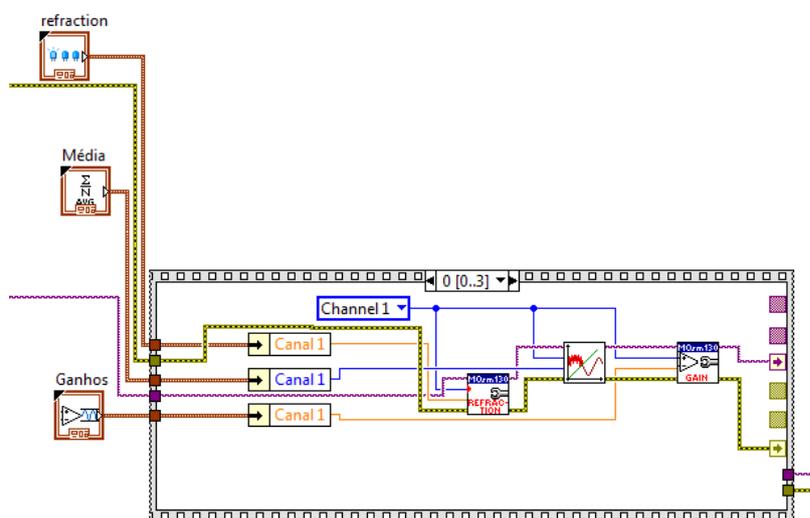


Figura 12: Entrada de parâmetros para a aquisição no programa LabVIEW.

Fonte: Autoria Própria.

A programação foi então desenvolvida para atender os seguintes requisitos básicos: realizar a monitoração de quatro canais, não apresentando limite para o número de sensores gravados em cada fibra óptica. Esta estrutura permite ao programa ser usado não apenas para pequenos motores, onde poucos sensores são gravados em uma ou duas fibras, como o presente

caso, mas também podendo ser aplicado para máquinas de grande porte onde são necessárias redundâncias ou aquisições em diferentes componentes ou localizações da máquina.

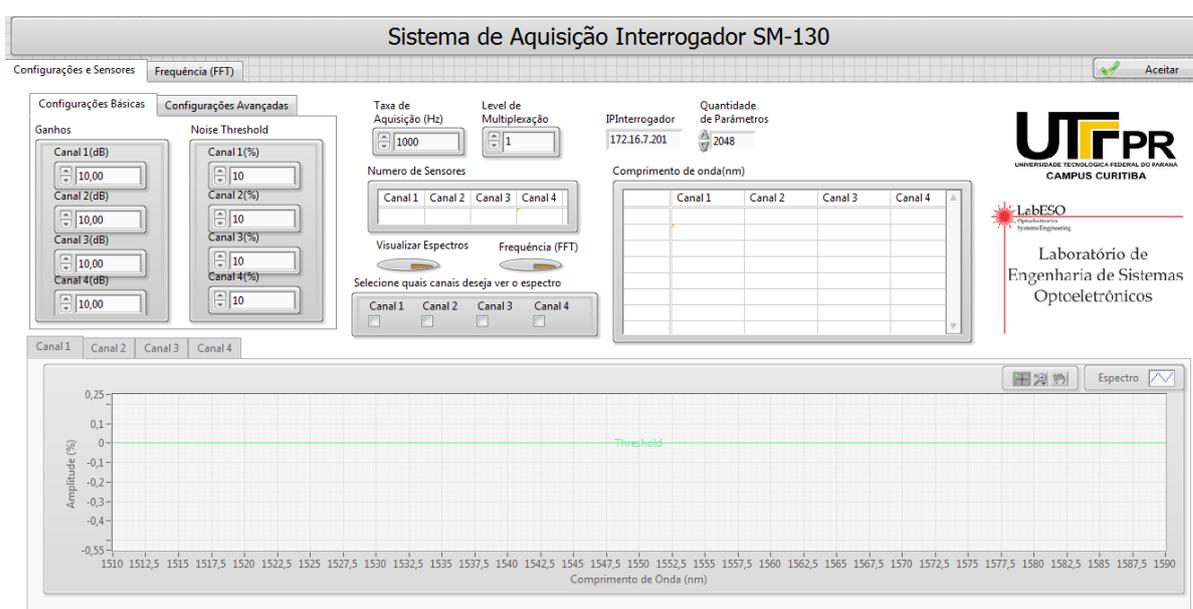
A arquitetura geral para o usuário é composta de duas janelas. A primeira janela, denominada “Configuração e Sensores” contém os parâmetros de entrada que podem ser modificados pelo usuário conforme a necessidade da aquisição. Estes valores são enviados ao SM130, e são usados por ele para parametrizar os dados enviados ao programa. As configurações do SM130 são: Ganhos, para cada canal; *Noise Treshold*, ; Número de médias em cada canal; Índice de refletividade de cada canal; Taxa de aquisição; Nível de multiplexação; e o IP do interrogador. O valor de entrada chamado “quantidade de parâmetros” não é um controle para configurar o interrogador, e sim o tamanho do vetor que o programa irá usar para ser realizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT-*Fast Fourier Transform*). Uma breve explicação de cada um destes parâmetros é dada a seguir:

- Número de médias: Valor que gera filtros diretamente na aquisição. Não utilizado para as aquisições deste trabalho, mas pode ser do interesse de trabalhos futuros;
- Índice de refletividade: Parâmetro utilizado para o interrogador realizar correções devido à velocidade em seu algoritmo por conta da velocidade da luz na fibra ser diferente para diferentes índices de refração;
- *Noise Treshold*: é o valor mínimo que o canal deve receber para aceitar o sinal como a reflexão de um sensor. Evita que ruídos de baixa intensidade sejam vistos como sensores;
- Taxa de aquisição: Quantidade de pontos que devem ser lidos em um intervalo de um segundo. Ou seja, uma Taxa de 1000 Hz entrega 1000 pontos por segundo de cada sensor para o programa;
- Nível de multiplexação: Informa ao SM130 se há um módulo de multiplexação (como o SM041, por exemplo), e quantos canais há neste módulo. “1” significa que não há módulo, “2” há um módulo de 4 a 8 canais, e “3” um módulo de 4 a 16 canais.
- IP do interrogador: Endereço IPV4 dado ao interrogador na rede local. É aconselhado que o equipamento não esteja em modo DHCP, mas com IP fixo, para não haver perda de conexão por mudança do endereço na rede interna.

Nessa mesma janela há uma sequência de abas indicadas pelos números dos canais (canal 1, canal 2, ...) onde o usuário pode visualizar os picos dos comprimentos de onda refletidos em cada canal. A partir desta interface gráfica é fácil o operador regular os valores de *Noise Treshold* e ganho para cada canal, a fim de que todos os sensores sejam percebidos pelo interrogador e, ao mesmo tempo, ruídos não sejam interpretados como sensores. A visualização destes gráficos pode ser ligada ou desligada pela seleção de canais. As duas tabelas

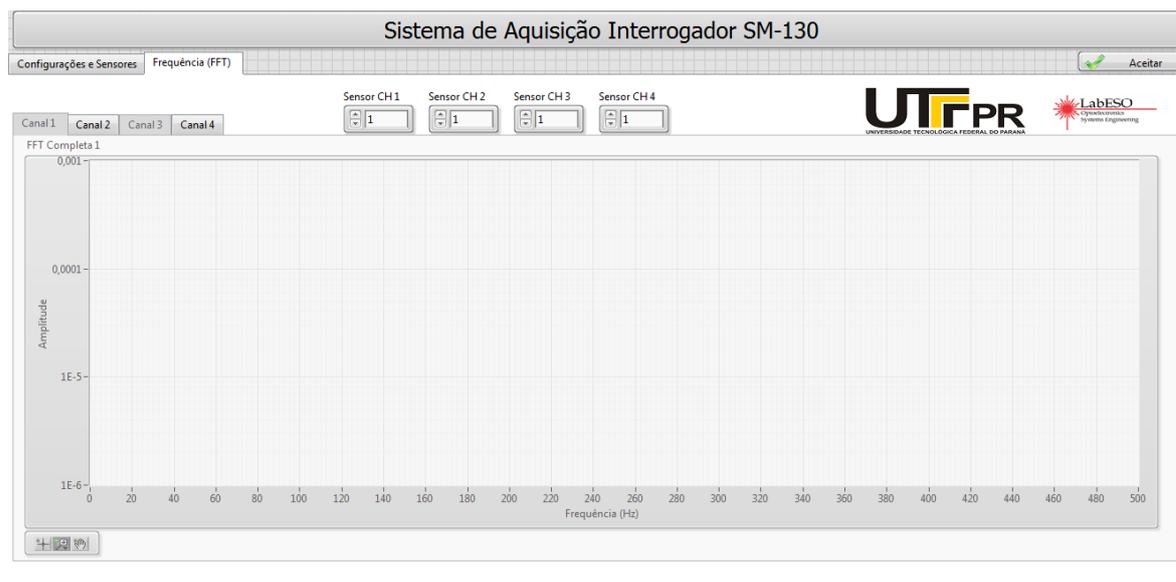
ali presentes indicam o número de sensores sendo notados em cada canal e os respectivos comprimentos de onda dos sensores

Ainda em “Configurações e Sensores” é possível selecionar o modo de operação do programa. Caso “Visualizar Espectros” esteja ativo, apenas os gráficos desta aba serão atualizados com os novos valores de medição. Caso “Frequência (FFT)” seja ativo, então os gráficos da próxima janela, de mesmo nome, serão processados no programa, e “Visualizar Espectros” é desativado para economia de processamento. A figura 13 apresenta a interface na primeira janela.



**Figura 13: Janela “Configurações e Sensores” do programa em Labview.
Fonte: Autoria própria**

A janela “Frequência (FFT)” é onde serão colhidos os resultados a serem analisados para comprovar a existência de excentricidade no motor de indução. A janela consiste de quatro abas, uma para cada canal, e quatro campos onde deve ser escolhido o sensor a ser analisado para cada canal. Diferente da primeira janela, caso seja detectado um sensor em um dos canais, automaticamente o programa começa a realizar a FFT para um sensor deste canal, e não é possível desligar o canal. A sua interface pode ser vista na figura 14.



**Figura 14: Janela “Frequência (FFT) do programa em Labview.
Fonte: Autoria Própria.**

Inicialmente para cada canal havia também um outro gráfico mostrando a resposta temporal dos sensores. Após serem realizados os ensaios, percebeu-se que estes gráficos não forneciam ao usuário uma informação que pudesse ser útil na análise de vibração ou qualquer outra de interesse deste trabalho. Outro fator negativo da análise no tempo foi o alto custo computacional dos laços necessários para otimizar a imagem gerada.

A iteração do programa que realiza a leitura das componentes temporais das FBG's apresentava um tempo de processamento muito alto. Como a programação é baseada em diagrama de blocos e a execução das funções do algoritmo é sequencial, o tempo computacional do programa tornava-se comprometido, adicionando atrasos a cada varredura de atualização dos dados temporais das redes. A função da transformada de Fourier (*FFT – Fast Fourier Transform*) no algoritmo não recebia, portanto, os dados temporais mais atualizados e a análise de frequência apresentou um atraso de resposta muito alto, comprometendo a simultaneidade dos eventos no motor com as respostas do software.

A solução para este problema foi a retirada da análise temporal do programa. Os dados recebidos pelo interrogador são transferidos diretamente para a função FFT, trazendo aos dados espectrais um ganho de velocidade considerável, sem distorções das componentes.

A programação de um sistema de instrumentação virtual como esta é extensa e complexa, apesar de ser mais facilmente compreendida do que uma programação em linha, pois para cada etapa de processamento (parametrização do interrogador, aquisição, processamento gráfico, transformadas, etc.) pode ser facilmente separada em *frames* que garantem o sequenciamento correto das iterações. Ainda assim, a título de exemplificação, a seguir é

apresentado somente o SubVI implementado da Transformada Rápida de Fourier, ou mais conhecida pela sigla inglesa FFT.

A FFT é uma função numérica muito conhecida e aplicada na engenharia há vários anos. Na engenharia elétrica ela é utilizada para a decomposição de sinais de tensão e corrente de uma rede de distribuição ou de um equipamento em frequências fundamentais. A sua utilização em larga escala se dá pelo fato de apresentar uma boa relação de custo computacional e resultado apresentado.

A FFT é necessária pois o interrogador ótico fornece ao programa *Labview* apenas os valores de pico de cada sensor segundo a taxa de aquisição requerida. Ou seja, se escolhido uma taxa de 1000 Hz, serão enviados ao programa mil leituras do pico de cada sensor em um segundo. Um vetor deve então armazenar estes dados, que apresentam as periodicidades de variação das amplitudes. A resposta é dada com base no ponto de onde o valor de pico foi medido, ou seja, a resposta é temporal. Assim que o vetor acumula uma quantidade de pontos, uma função condicional é satisfeita na programação e o vetor é enviado ao processamento pela FFT. A Figura 15 mostra o diagrama de blocos deste trecho do programa.

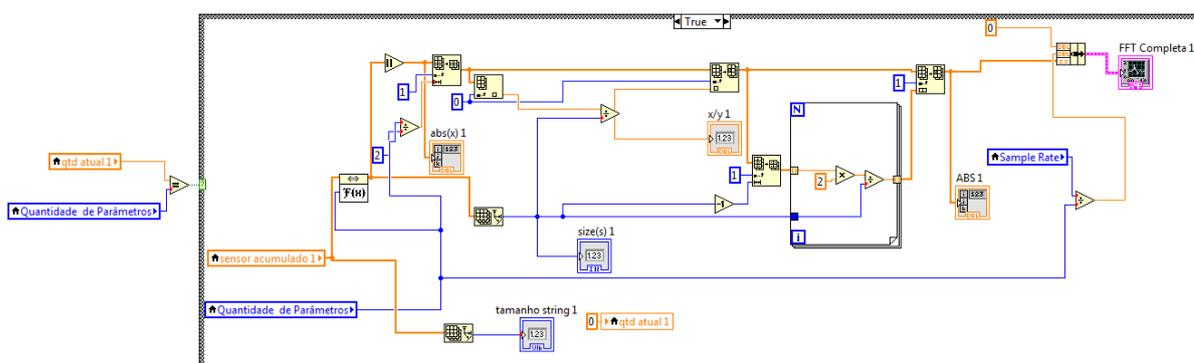


Figura 15: Diagrama de blocos da FFT.

Fonte: Autoria própria.

Todo este processo entrega ao usuário a resposta em frequência das vibrações do estator. No item 2.3 Frequências Fundamentais de Deformação, é explicado como estes resultados são importantes no reconhecimento da excentricidade.

3.4 MÉTODO DE GRAVAÇÃO

Das técnicas existentes atualmente, uma das mais utilizadas para a gravação de Redes de Bragg em fibras óticas é o de Máscara de Fase (Brutkowski, 2016). Este método é largamente usado por apresentar facilidade na reprodução em larga escala de um mesmo comprimento de onda e apresenta vantagem em casos onde é necessária a multiplexação, pois cada máscara de fase grava um comprimento de Bragg bem definido. Ou seja, na multiplexação é possível ter a garantia da não sobreposição dos comprimentos de onda.

A máscara de fase provoca a difração em várias ordens do laser incidente, $m = 0$, $m = \pm 1$, $m = \pm 2 \dots$. Ambos os raios, incidente e difratado, atendem a equação de difração. Assim, sendo Λ_{pm} o período da máscara de fase temos a seguinte relação (Kashyap, 2009):

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\text{sen}\left(\frac{\theta_m}{2}\right) - \text{sen}(\theta_i)}, \quad (3.4)$$

Onde λ_{uv} é o comprimento de onda do raio ultravioleta incidente; θ_m é o ângulo da ordem difratada; θ_i é o ângulo de incidência do feixe.

Assim, quando o ângulo de incidência θ_i é igual a 90° , ou seja, o feixe é perpendicular à superfície da máscara, a radiação é difratada nas ordens $m = 0$ e $m = \pm 1$. Neste caso, o padrão de interferência formado pelo par de feixes $m = \pm 1$ é de período Λ_g que está relacionado ao comprimento de onda de Bragg pela equação:

$$\Lambda_g = \frac{N\lambda_B}{2n_{eff}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2}, \quad (3.4.1)$$

onde N é um número inteiro e maior que 1, indicando a ordem do período da rede.

Neste trabalho as redes de Bragg foram gravadas no laboratório FOTON, da UTFPR-CT. Foram empregadas quatro máscaras de fase com diferentes comprimentos de onda cada uma delas. As duas fibras óticas foram gravadas com as mesmas máscaras para dar comparabilidade aos dois sistemas de aquisição.

As fibras óticas escolhidas são do tipo monomodo da empresa THORLABS, modelo GF. As fibras são fotossensíveis, a fim de diminuir o tempo de exposição ao laser UV durante o processo de gravação, e sua faixa de operação é entre 1500 e 1600 nm de comprimento de onda. Faixa que compreende todo espectro de leitura do SM-130. O laser UV utilizado para a gravação das FBG's foi o disponibilizado pelo laboratório de fotônica, FOTON, do campus Curitiba da UTFPR. O laser é do fabricante Coherent, e modelo Xantos XS. O feixe de laser é formado de excímero de fluoreto de argônio (ArF). A figura 16 mostra uma das máscaras de

fase momentos antes da gravação de uma das FBG's. As linhas azuis indicam o caminho percorrido pelo laser UV, e a linha vermelha está sobre a fibra ótica.

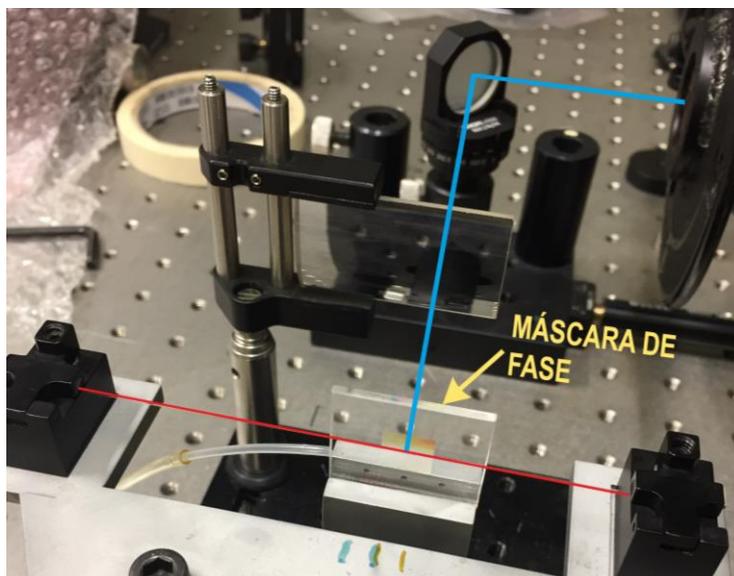


Figura 16: Máscara de fase na gravação de uma rede de Bragg.
Fonte: Autoria própria

Garantir a correta gravação das redes de Bragg na fibra ótica requer uma sequência de procedimentos e cuidados a serem tomados ao longo do processo. A seguir, serão listados estes procedimentos bem como os aspectos que merecem atenção para cada etapa.

- O primeiro passo é tirar um modelo das distâncias que as redes devem ser gravadas na fibra, para que elas fiquem dispostas de 90° entre si. Faz-se uso de uma linha de nylon a ser colada na mesma posição que a fibra ótica será colada.
- As marcações nas linhas de nylon devem ser copiadas então para as fibras que serão gravadas. Nos locais das marcações, com o auxílio de um alicate especial, a fibra deve ter a camada de acrilato retirada e a região deve ser limpa com álcool isopropílico. A retirada desta camada protetora fragiliza a região, por isso deve ser tomado um cuidado redobrado no manuseio e principalmente na hora da colagem próximo às redes.
- Na sequência deve ser realizado a emenda por fusão destas fibras óticas com os conectores tipo Pigtail, que oferecem uma conexão aos canais do interrogador, e em seguida uma proteção deve ser colocada na região da emenda.
- Com os terminais prontos, as fibras são levadas ao laser para gravação das FBG's. O terminal da fibra deve ser acoplado a um interrogador, no caso o utilizado foi o SM-130 da MicronOptics. E o interrogador deve estar conectado ao computador com o programa que auxiliará no acompanhamento do espectro de reflexão da FBG (Refletividade e Comprimento de onda).

- A fibra ótica deve ser posicionada, conforme a Figura 16, tomando o cuidado de a fibra estar toda descascada ao longo da máscara de fase. Também a fibra deve ser levemente tensionada ao ser fixada, e as regiões periféricas, onde ainda há a camada de acrilato, devem encostar na região do vidro ao lado da máscara. Este último requisito é importante, pois assim é mantida a distância necessária entre a máscara e a região da fibra a ser gravada.
- Iniciada a gravação, é necessário o constante monitoramento do surgimento da rede pelo programa. Além de conferir o comprimento de onda que está sendo gravado, é primordial acompanhar a refletividade da FBG. As refletividades das FBG's devem apresentar intensidades próximas umas das outras para o posterior software de medição poder distinguir os comprimentos de onda gravados e adquirir corretamente os sinais dos sensores.

Após a gravação, a fibra fica ainda mais fragilizada na região onde ocorreu a gravação, pois além de não possuir a casca (acrilato), ocorre enfraquecimento da matriz vítrea em função da energia do laser aplicada durante o processo. Por isso o contato e a flexão da região devem ser evitados, sendo necessários apenas no momento da colagem.

3.5 COLAGEM

O método de colagem seguido é o mesmo de Brutkowski (2016). Com exceção de que não foi necessário o lixamento dos dentes do estator, pois o motor em questão foi recentemente fabricado e não apresentava sinal algum de oxidação. Para a colagem da fibra ótica na cabeça de bobina o mesmo procedimento foi seguido, com as devidas diferenças estruturais do local, e de que a colagem com cianoacrilato foi feita sobre os fios que seguram as bobinas.

A sequência do processo de colagem ocorreu da seguinte maneira:

- A superfície dos dentes do estator foram limpos com bastonetes de algodão embebidos em álcool isopropílico;
- Uma pequena quantidade de cianoacrilato é depositada sobre o dente do estator, e com o auxílio de um bastão de polipropileno, que não adere ao cianoacrilato, o trecho anterior a FBG é colado em um dos dentes ou cordame (Figura 17). Deve ser tomado o cuidado para que o cianoacrilato cubra uma pequena superfície da fibra sem a casca, a fim de garantir a fixação;



Figura 17: Colagem da fibra na cabeça de bobina do estator.
Fonte: Autoria Própria

- Após a secagem (3 a 4 minutos) o outro trecho deve ser colado no próximo dente ou cordame do estator. A fibra deve ser levemente tracionada, e com o auxílio do bastonete ficar desta maneira até que se seque a nova colagem (3 a 4 minutos);
- Após a colagem de todas as FBG's, é realizado a colagem de mais pontos, garantindo assim a boa colagem e fixação em todo o trecho.

Houve o aumento da dificuldade da instrumentação com relação ao trabalho de Brutkowski (2016), este usa um motor de indução de potência 3 cv, carcaça 90L da WEG. O presente trabalho faz uso de um motor de indução do mesmo fabricante, porém, de 1 cv de potência e carcaça 80, diminuindo o diâmetro interno da máquina.

Ao final da colagem da fibra ótica ambas foram emendadas por fusão a prolongações de fibra ótica com conectores pigtail para conexão ao interrogador. Após as emendas, as fibras foram passadas para o perímetro externo da cabeça de bobina e foram coladas ao longo de pouco mais de uma volta para garantir fixação e robustez mecânica aos cabos na saída da tampa do motor.

Quando uma das prolongações estava sendo colada sobre a cabeça de bobina do motor, aconteceu de um pingo de cianoacrilato, depositado sobre um dos cordames, escorrer e atravessar o corpo da bobina. Coincidentemente, o cianoacrilato atingiu a segunda FBG da cabeça de bobina, como indica a Figura 18. Desta forma, apenas a primeira FBG da cabeça de

bobina permaneceu intacta, e o software de monitoramento deixou de mostrar os três outros sensores desta fibra.

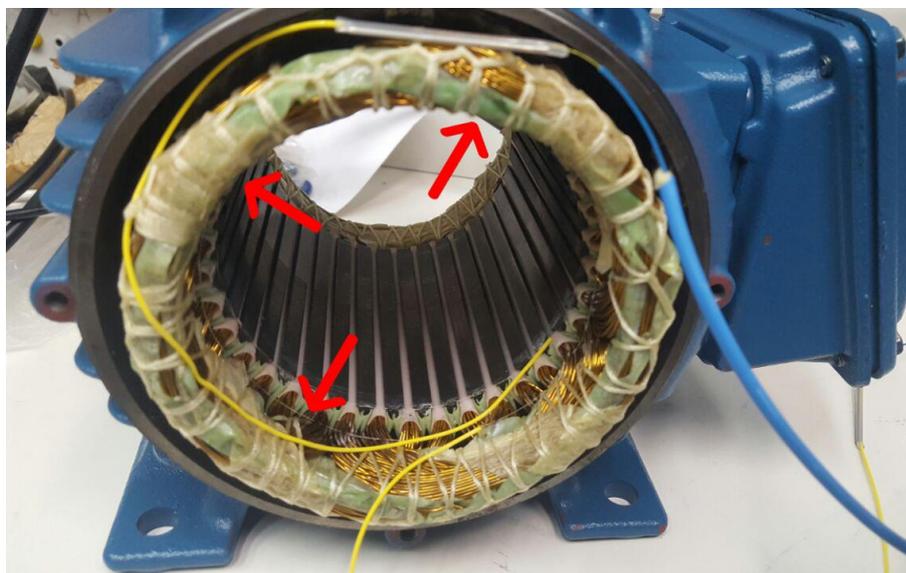


Figura 18: FBG's perdidas na colagem.

Fonte: Autoria própria.

O resultado final da instrumentação com as indicações de posicionamento das FBG's que estão disponíveis para monitoramento pode ser visto na Figura 19.

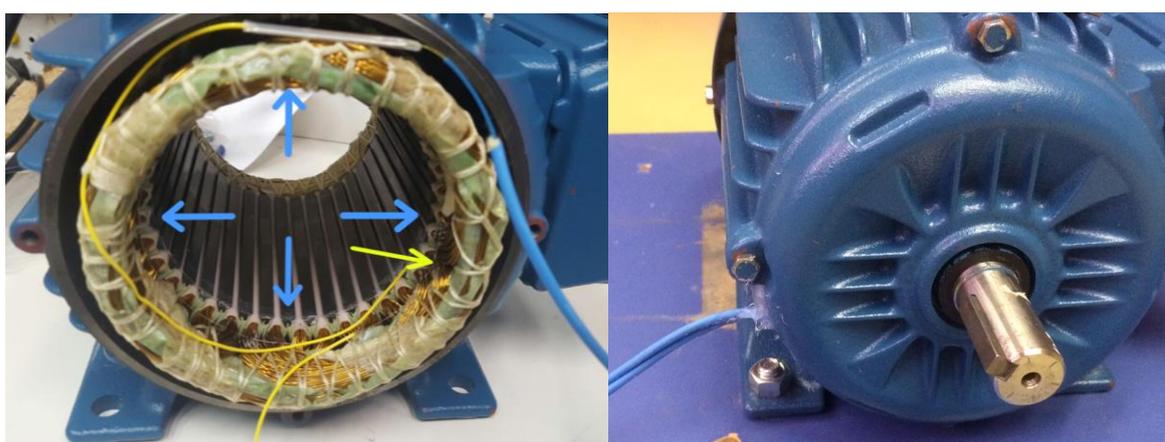


Figura 19: FBG's posicionadas, à esquerda motor sem tampa e rotor; à direita, o motor com tampa fechada e as fibras saindo da tampa.

Fonte: Autoria Própria.

3.6 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Para isso, foi realizado primeiramente o ensaio a vazio e posteriormente o ensaio causando uma excentricidade no motor. Esses ensaios possibilitam validar a metodologia utilizada até aqui. É sempre importante frisar que apesar dos ensaios serem realizados em uma máquina de pequeno porte, a metodologia de gravação e colagem das FBG's podem ser replicadas em máquinas elétricas de grande porte.

A seguir, na Tabela 2, estão contidos os dados de placa do motor utilizado neste experimento:

Tabela 2: Especificações motor de indução

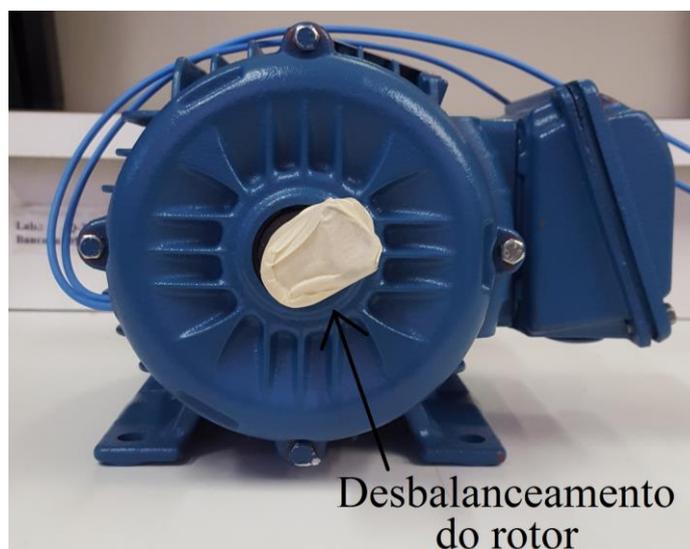
<i>Fabricante</i>	<i>WEG</i>
Número de fases	3
Frequência	60 Hz
Potência	0,75 kW / 1 cv - HP
Rotação nominal por minuto	1730
Fator de serviço	1,15
Tensão nominal de operação	220/380 V
Corrente nominal de operação	3,02/1,75 A
Rendimento	80,5%

3.6.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Para realizar os ensaios, o motor foi conectado na rede trifásica de 220 V_{ac} e 60 Hz do laboratório C003 - Laboratório de Máquinas Elétricas, do DAELT na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. As FBG's foram conectadas no interrogador SM130 do LabESO, e este foi conectado via cabo UTP à conexão LAN de um computador pessoal. Um primeiro ensaio de controle foi realizado através do programa *Catman Easy* instalado em um computador do LabESO, modelo DELL XPS 14L421X. O segundo ensaio foi realizado com um computador pessoal, modelo DELL Inspiron 14R 5420, de um integrante da equipe, onde o software apresentado neste trabalho foi então usado para aquisição dos dados.

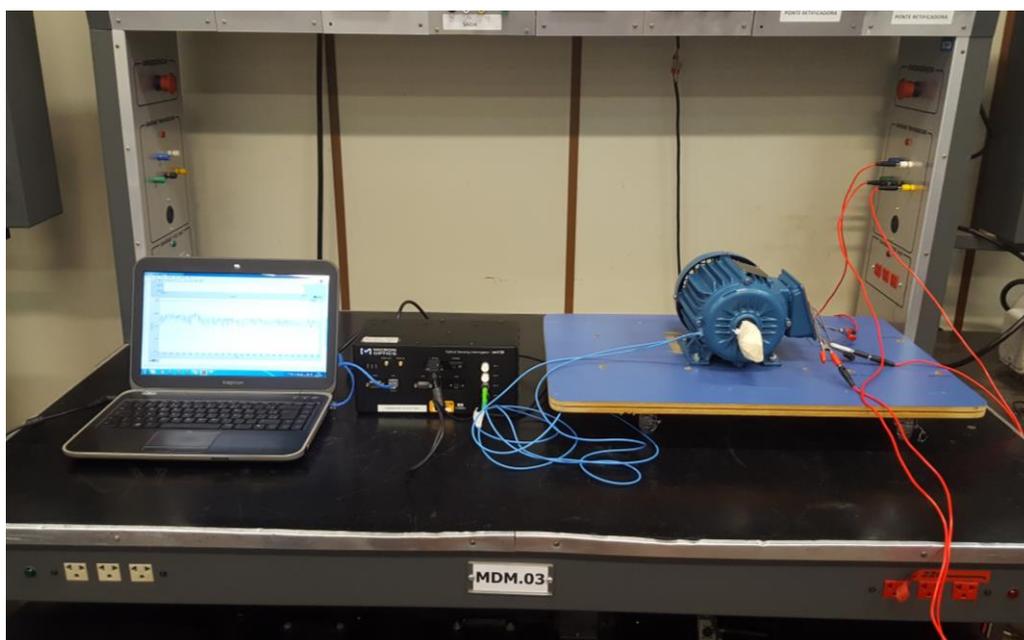
Para o ensaio com excentricidade foi necessário forçar este defeito, uma vez que o motor é novo e sua excentricidade de fábrica é bem próxima da ideal. A fim de causar a excentricidade foi colocado um contrapeso de 37,44g no eixo do motor (figura 20) a fim de avaliar a sua contribuição na excentricidade, uma vez que esse contrapeso adiciona um desbalanceamento

ao eixo. Para a análise de excentricidade é necessário que os resultados sejam mostrados no domínio da frequência. O software fornece as formas de onda no domínio do tempo, sendo necessária a realização da transformada de Fourier do sinal, para então, serem obtidos os resultados no domínio da frequência.



**Figura 20: Contrapeso para criar a excentricidade forçada.
Fonte: Autoria própria**

A configuração dos equipamentos é a mesma apresentada pela figura 9. Na figura 21, a seguir, pode ser visto a montagem do ensaio em bancada.



**Figura 21: Montagem dos equipamentos para ensaio
Fonte: Autoria própria**

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram organizados em duas partes: primeiramente, os resultados espectrais da fibra ótica presente na cabeça de bobina, pois trata-se de uma localização antes não testada para a implementação de sensoriamento ótico; e por fim, os dados obtidos a partir dos dentes do estator, composto por quatro sensores distintos e dispostos ao longo do comprimento do estator, formando uma defasagem de 90 graus entre FBG's.

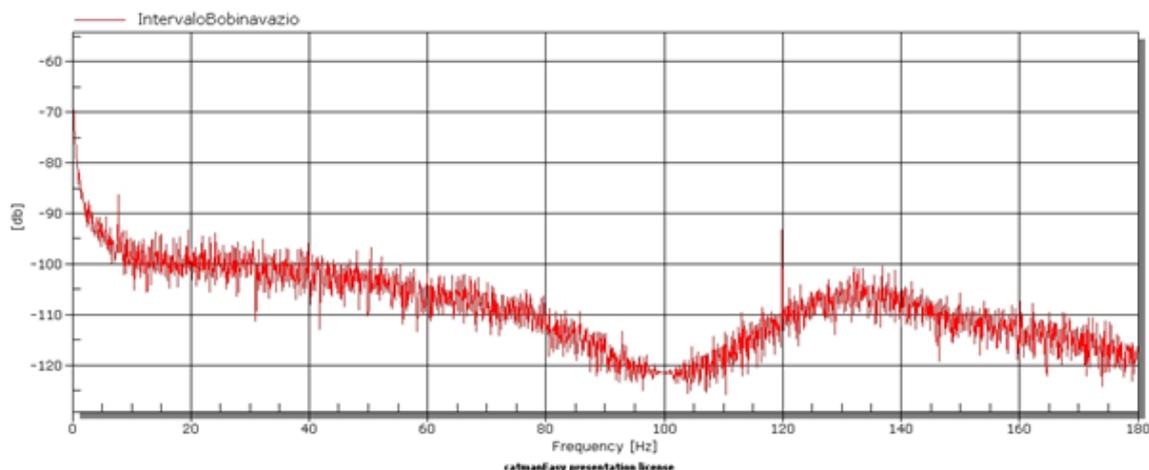
Vale lembrar que como dito anteriormente, três das quatro FBG's gravadas para a localização dos enrolamentos estatóricos foram quebradas ao longo do processo de colagem sobre as bobinas. Porém como a FBG intacta foi posta entre dois enrolamentos distintos, a sua localização é a ideal para sofrer as distorções de tração e compressão durante a operação da máquina.

4.1.1 ENSAIOS DE CONTROLE

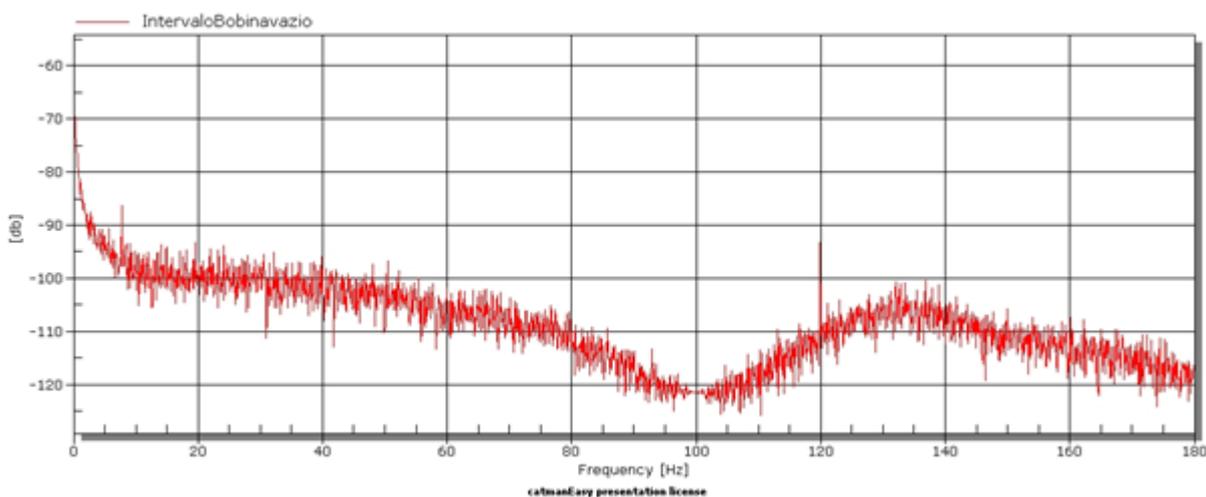
Para comprovar os resultados do programa desenvolvido e a eficácia da instrumentação, foi necessário realizar um ensaio de controle para ser comparado com os resultados.

A primeira análise realizada é a partir da FBG fixada na cabeça de bobina do motor. Para esta análise foram realizadas as aquisições mostradas nas figuras 22 e 23. Essa foi uma tentativa de se utilizar um novo arranjo de colagem das FBG's, que possibilitaria uma instrumentação menos intrusiva no motor. Apesar de estar em pleno funcionamento a FGB não demonstrou diferença nas medições. Essa ineficácia ocorreu porque a bobina do motor apresenta muitos ruídos, e a bobina em si apresenta uma rigidez muito menor do que o material ferromagnético do estator, dificultando assim, uma deformação periódica das FBG's. Apesar de ser tentada uma nova metodologia de colagem, ela não demonstrou a eficácia esperada.

Na seção 4.2 será mostrado novamente as aquisições da colagem na cabeça de bobina, então adquiridos pela ferramenta em *Labview*, e também conterà uma análise mais detalhada sobre os resultados encontrados.



**Figura 22: FFT da FBG da cabeça de bobina do ensaio a vazio.
Fonte: Autoria própria**



**Figura 23: FFT da FBG da cabeça de bobina do ensaio com excentricidade.
Fonte: Autoria própria**

A seguir, as figuras 24 e 25 apresentam as aquisições das FFT's nas FBG's instaladas nos dentes do estator. A análise mais detalhada do ensaio a vazio e do com o fenômeno de excentricidade é apresentada na seção 4.2.1 e 4.2.2, respectivamente. Nesta seção é feita apenas a análise de eficácia do método de colagem e também do pleno funcionamento do software desenvolvido para o presente trabalho.

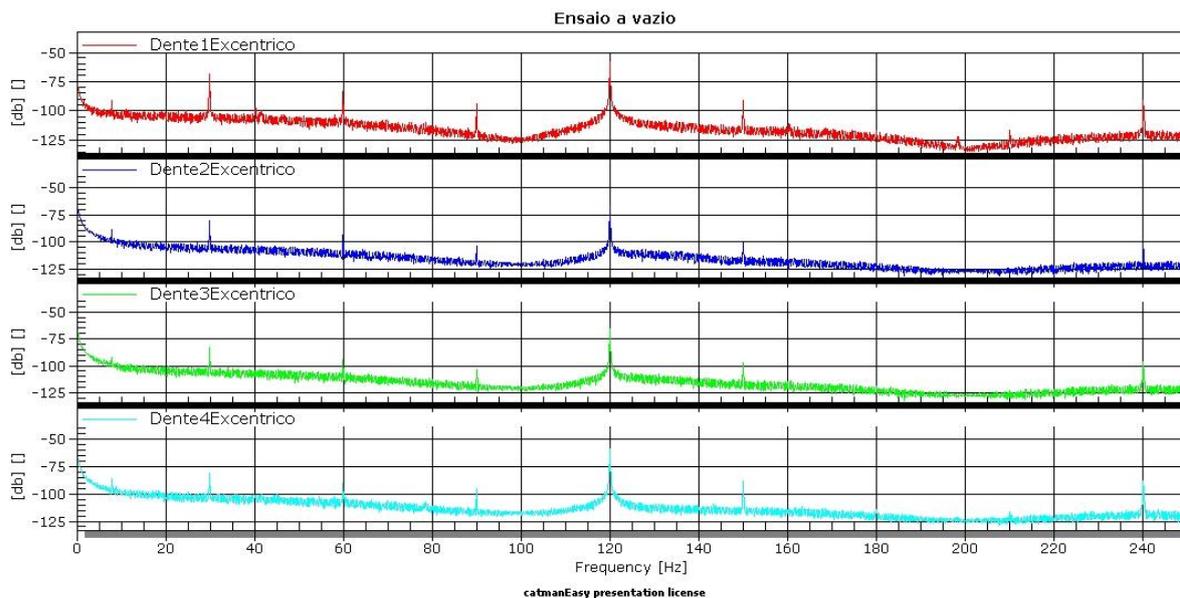


Figura 24: FFT da FBG dos dentes do estator do ensaio a vazio.

Fonte: Autoria própria

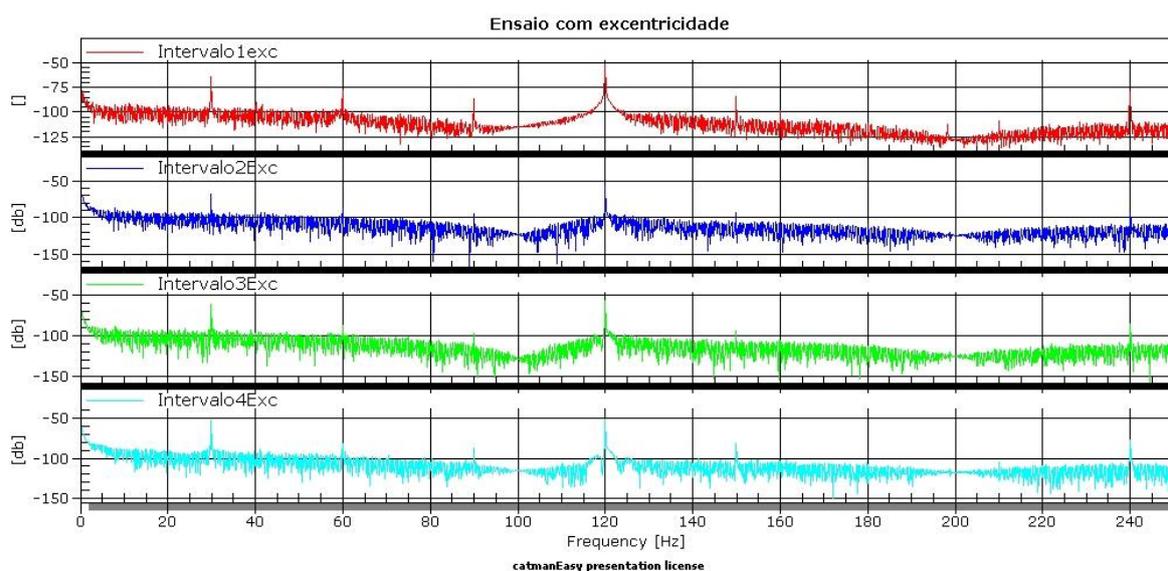


Figura 25: FFT da FBG dos dentes do estator do ensaio com excentricidade

Fonte: Autoria própria.

O ensaio de controle mostrou que a carga acoplada para gerar excentricidade foi insuficiente para causar uma alteração significativa em relação a excentricidade inerente do motor em sua construção. A presença das componentes de 90 Hz e 150 Hz mostram que mesmo operando a vazio o motor possui uma excentricidade construtiva diferente de zero. As outras componentes de frequência, de 30 Hz, 60 Hz e 120 Hz podem ser constatadas, comprovando que a colagem dos sensores foi realizada corretamente, e são comprimidos e tracionados conforme o desejado.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM O SOFTWARE LABVIEW

Esta seção é dedicada a análise dos resultados obtidos a partir das aquisições do software desenvolvido para instrumentação virtual do sistema de aquisição. Essas análises são divididas em duas partes: os ensaios a vazio e ensaios com excentricidade a partir de uma carga desbalanceada presa ao eixo.

Em ambos os ensaios, por se tratar de um motor de pequeno porte (1 cv), foi empregada a partida direta do motor. As medições de corrente, tensão e potência elétrica nas pontas do motor não foram realizadas, porque mesmo o ensaio efetuado com o desbalanceamento não possui valores representativos de carga para o motor. Assim, estes dados não teriam relevância para as análises e resultados.

Para resolver os problemas encontrados ao final dos ensaios de controle, o peso para os ensaios com excentricidade foi aumentado de 37,44 g para 150,58 g. Além disso, a escala adotada para visualização foi passada para a logarítmica, assim as variações ficam mais nítidas. Vale ressaltar que não é objetivo deste estudo analisar as amplitudes dos sinais adquiridos, mas sim suas frequências. A amplitude varia de acordo com a potência e as condições de carga do motor.

4.2.1 ENSAIOS A VAZIO

O ensaio a vazio de uma máquina elétrica é de extrema importância na coleta de dados referentes ao seu funcionamento. Aqui, pode-se analisar as perdas inerentes da máquina e também a magnetização necessária para a mesma entrar em funcionamento. Para o ensaio a vazio, é esperado como resultado a presença das componentes de frequências oriundas da alimentação CA da rede e também de frequências que são funções da rotação do rotor.

O motor de indução de quatro polos tem como característica a rotação de 1800 rpm do campo girante do estator, como o mesmo está a vazio e o escorregamento é praticamente nulo, o rotor terá uma velocidade de giro muito próxima ao valor do campo estatórico.

As aquisições dos resultados apresentados pelo programa para os ensaios em vazio do motor são apresentadas a seguir pelas figuras de 26 a 30. Sendo as 4 primeiras figuras dos sensores entre as ranhuras do estator, e a última do sensor sobre os enrolamentos estatóricos.

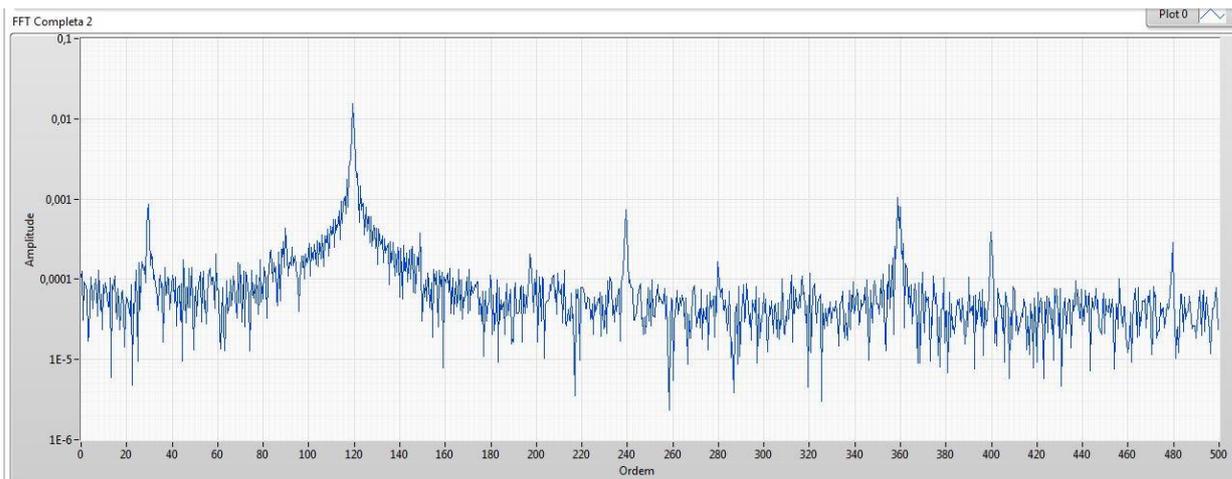


Figura 26: FBG 1 - Dentes do Estator (A Vazio)
Fonte: Autoria própria

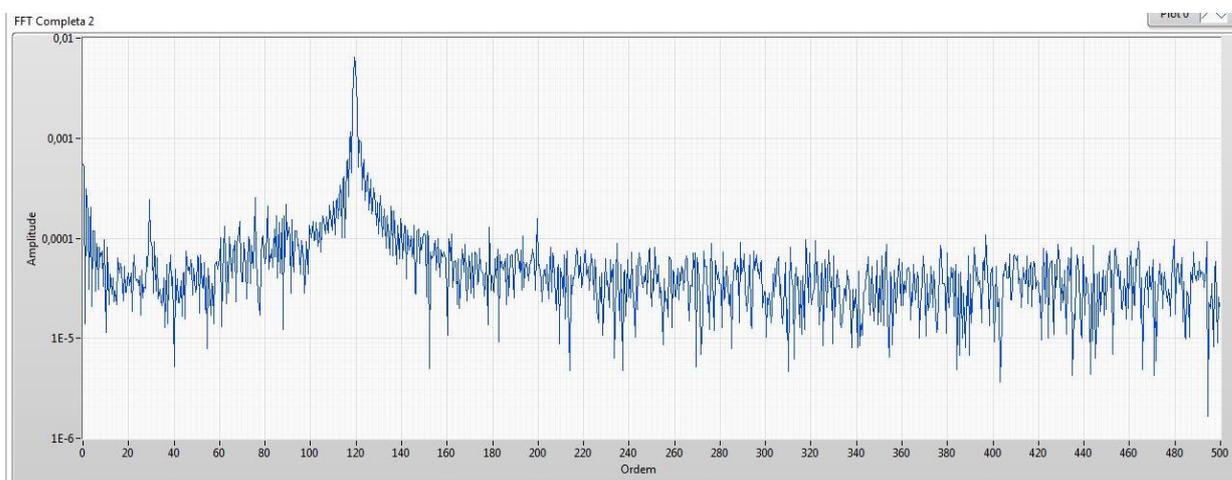


Figura 27: FBG 2 - Dentes do Estator (A Vazio)
Fonte: Autoria própria

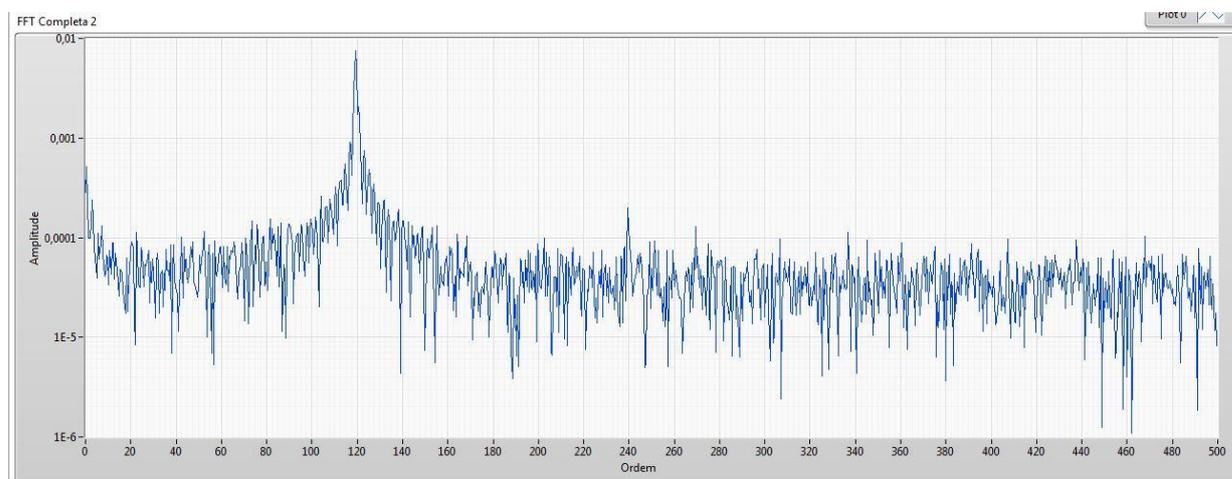


Figura 28: FBG 3 - Dentes do Estator (A Vazio)
Fonte: Autoria própria

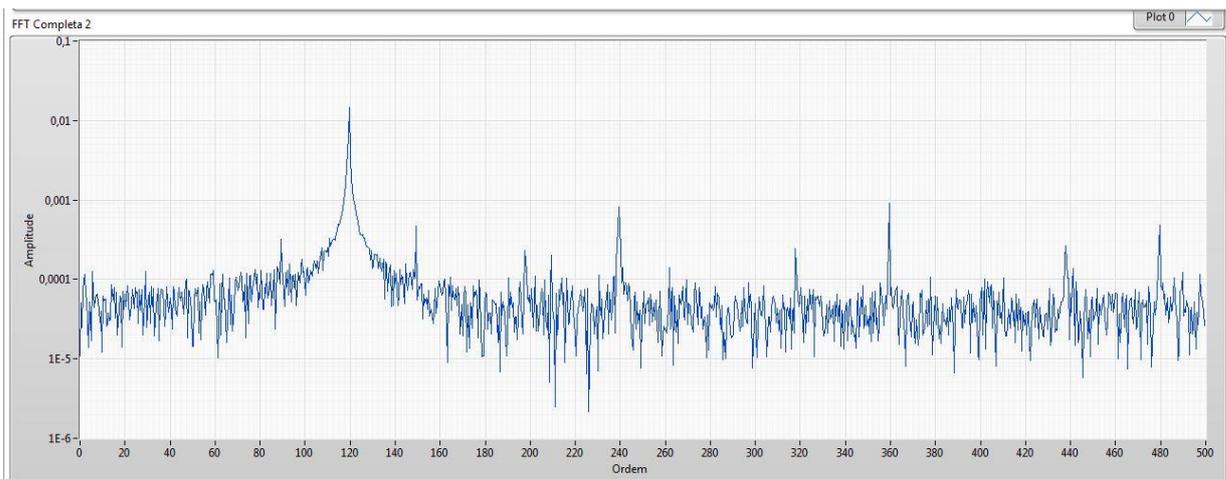


Figura 29: FBG 4 - Dentes do Estator (A Vazio)

Fonte: Autoria própria

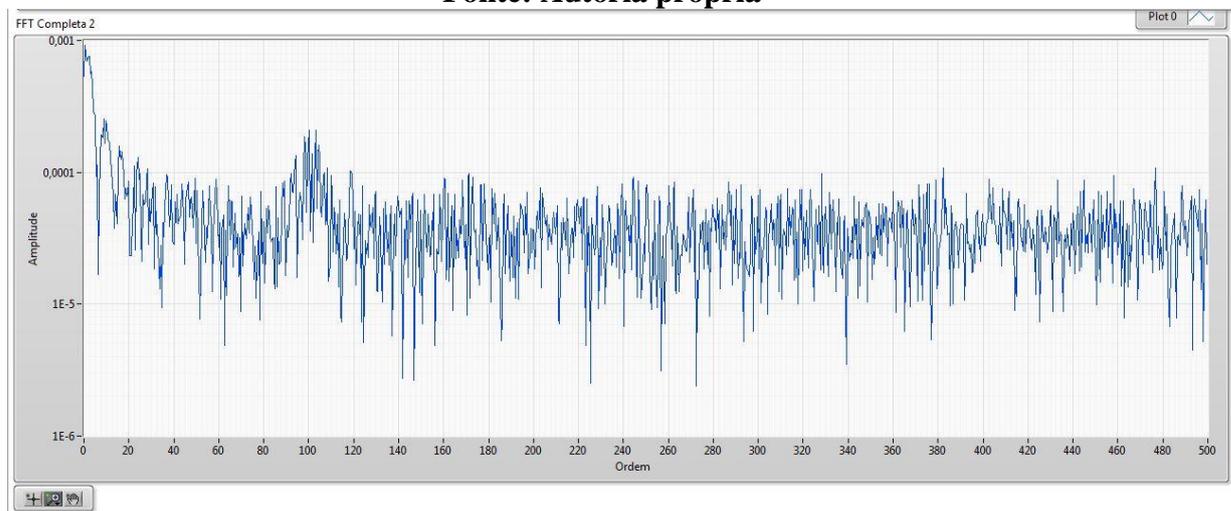


Figura 30: FBG 4 – Bobina (A Vazio)

Fonte: Autoria própria

As FBG's alocadas sobre os dentes do estator, se provaram eficazes na leitura espectral da máquina. Aqui observa-se a presença de frequências em 30, 60 e 120 Hz, algo que já era esperado e apresentado pelas equações da seção 2.3.

A componente em 30 Hz surge pelo fato do motor de indução ter rotação nominal de 1800 rpm, o que implica em 30 revoluções a cada segundo. No caso de um motor com quantidade de polos diferentes, a frequência de 30 Hz não seria detectada, e em seu lugar surgiria outra componente.

Em geral, o emprego das FBG's na ranhura do estator, como visto no trabalho de (DE MORAES SOUZA, 2015), se revela uma boa opção para a análise vibracional da máquina, e aqui pode-se comprovar o porquê de sua implementação neste trabalho, para servir com uma referência de medição para outras tentativas de localização dos sensores.

Por último, o espectro observado pela FBG na cabeça de bobina não apresentou um resultado satisfatório, pela não percepção das componentes esperadas de forma explícita. Uma possível explicação para tal fenômeno pode ser o fato de que como as cabeças de bobinas, construtivamente, são dispostas sem nenhum tipo de estrutura que promova sua sustentação, recebemos em nossas leituras um alto nível de ruído que poluiu os dados.

4.2.2 ENSAIOS COM EXCENTRICIDADE

A presença de uma carga com excentricidade dinâmica no eixo da máquina inclui ao espectro de vibrações componentes dependentes do seu nível de desbalanceamento. Na presença de desbalanceamento, portanto, além se ser esperado a detecção das frequências da rede de alimentação e das obtidas no ensaio a vazio, podem-se esperar frequências adicionais, de 90 e 150 Hz, como já mostrado na seção 2.3, surgem devido à excentricidade dinâmica do eixo.

A seguir são mostradas as aquisições realizadas nos dentes do estator e por último da cabeça de bobina.

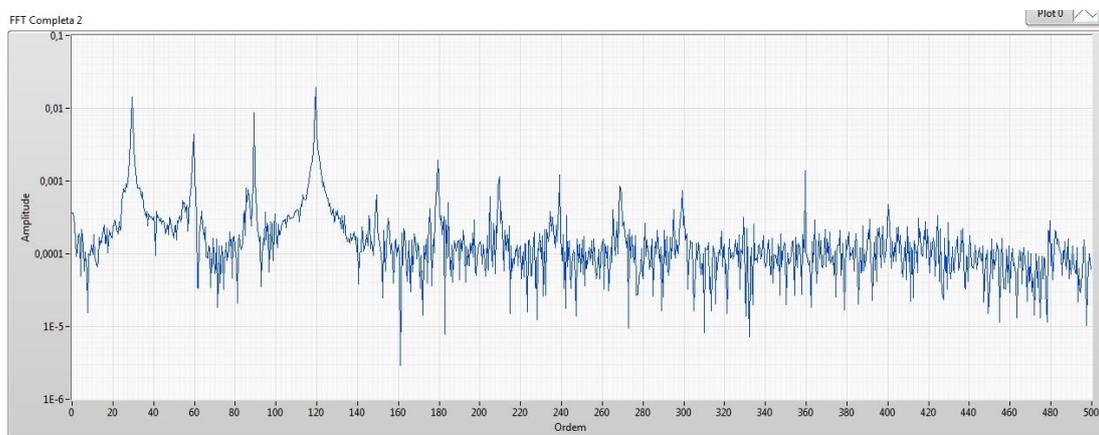
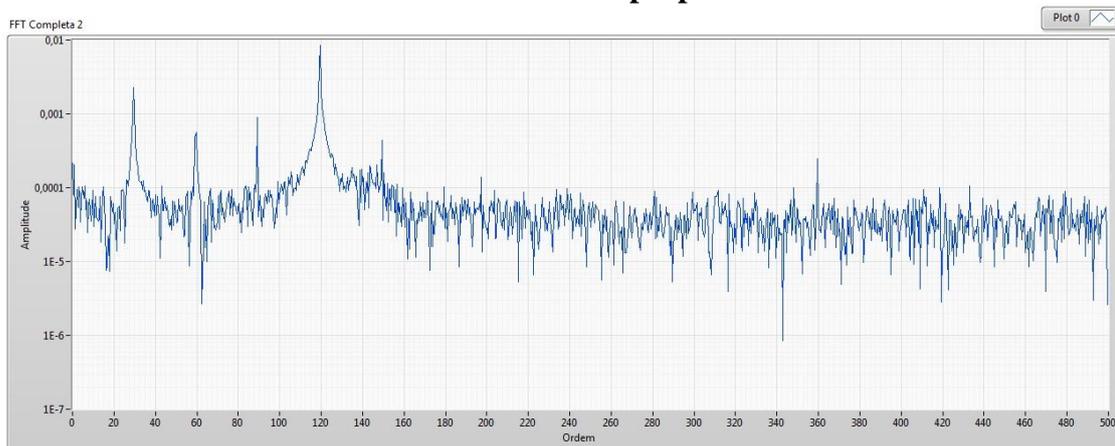


Figura 31: FBG 2 - Dentes do Estator (Excentricidade)

Fonte: A autoria própria



Fonte: A autoria própria

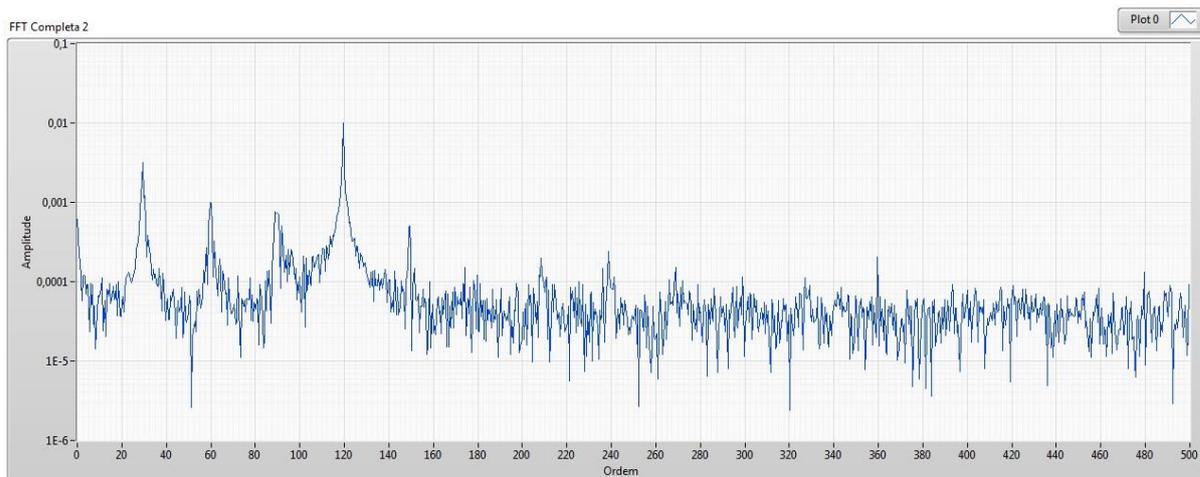


Figura 33: FBG 3 - Dentes do Estator (Excentricidade)
Fonte: Autoria própria

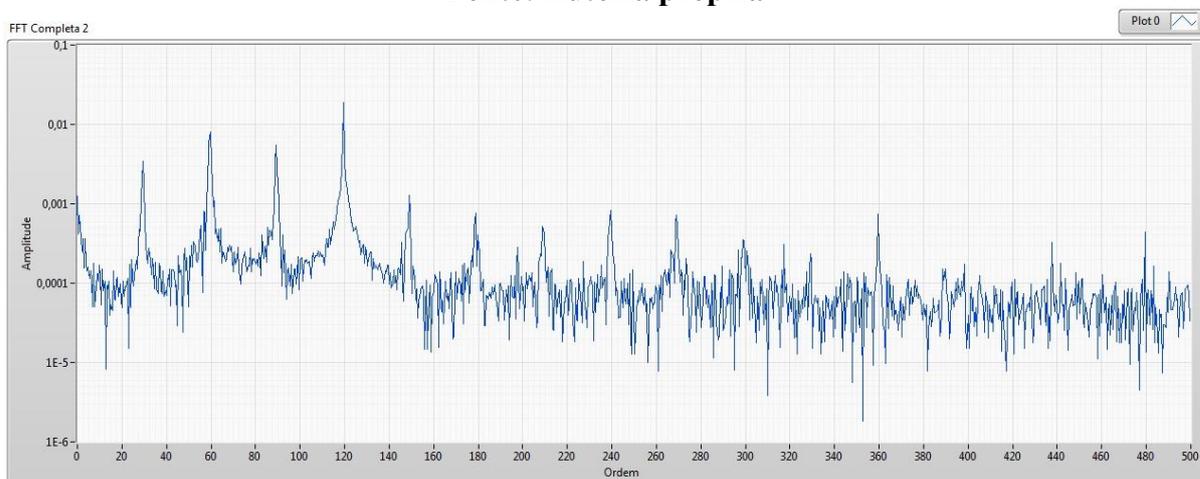


Figura 34: FBG 4 - Dentes do Estator (Excentricidade)
Fonte: Autoria própria

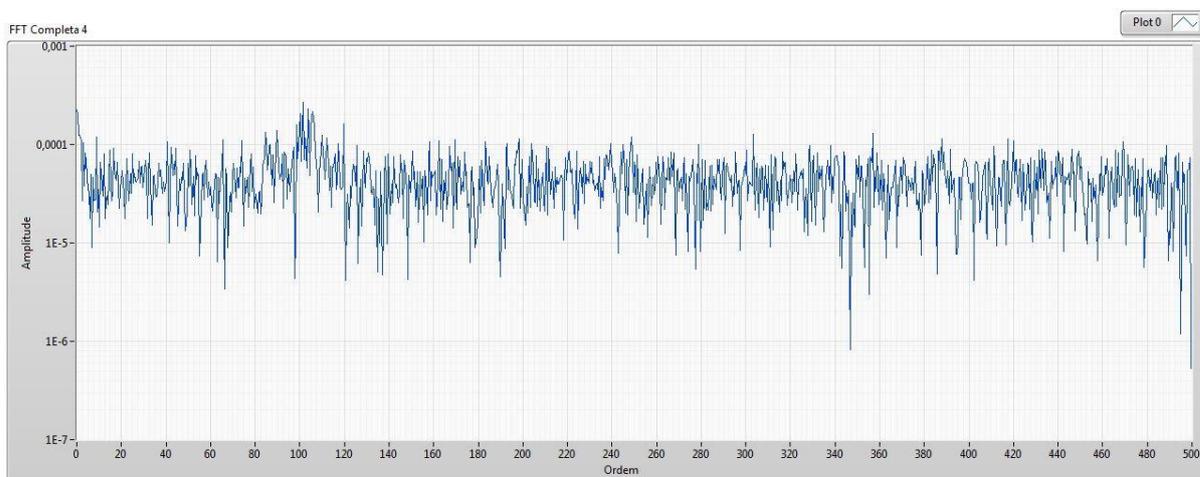


Figura 35: FBG 4 – Bobina (Excentricidade)
Fonte: Autoria própria

Os sensores posicionados entre as ranhuras do estator mostraram-se adequados para a captação das componentes espectrais esperadas. Nessas aquisições, percebemos componentes

de frequência muito bem definidas, sendo elas: 30, 60, 90, 120 e 150 Hz. A excentricidade pode ser comprovada na detecção das frequências 90 e 150 Hz, advindas da presença do desbalanceamento do eixo e que possuem intensidade considerável em comparação à outras frequências.

Como visto anteriormente, no ensaio a vazio, o sensoriamento proposto nos enrolamentos de campo do estator não se mostrou capaz de capturar as componentes esperadas. O alto nível de ruído se mistura à leitura da FBG da bobina e distorce de forma comprometedora os resultados para o ensaio com excentricidade na mesma forma. O resultado final se mostra inviável para a análise pretendida neste trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho constituiu-se de quatro principais partes: a gravação das FBG's, a instrumentação de um motor de indução, implementação de um sistema de instrumentação virtual para análise dos defeitos que causam deformação no estator (neste caso estudado o defeito de excentricidade), e ensaio de máquinas elétricas com posterior análise dos resultados encontrados.

A técnica utilizada aqui permite uma medição rápida e em tempo real para o monitoramento de excentricidade em um motor de indução. Os sensores a base de redes de Bragg em fibra ótica possuem tamanho reduzido e possibilidade de multiplexação, além de apresentarem resposta à vibração e temperatura, o que permite serem medidos mais parâmetros no motor, e à realização de outras análises de vibração. Por possuírem imunidade eletromagnética podem ser inseridos dentro de grandes máquinas elétricas, dentro de regiões onde os campos eletromagnéticos são intensos, sem sofrer interferência. Portanto a utilização destes sensores permite uma instrumentação precisa e permanente, já que uma vez colados, não precisam de manutenção.

O principal intuito deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de aquisição, medição e monitoramento da excentricidade através da análise de vibrações do estator. Este software mede as deformações dinâmicas do estator utilizando sensores de deformação baseados em redes de Bragg. Os resultados são entregues no domínio da frequência, e o trabalho apresenta as componentes que referenciam a excentricidade. O programa oferece maleabilidade para projetos futuros onde possam ser implementados filtros e sinalizadores a partir das faixas de frequência que surgem decorrentes de defeitos detectáveis por vibrações no estator.

A instrumentação do motor apresentou uma dificuldade na hora da colagem, quando foram perdidos três sensores, mas esse obstáculo não influenciou no resultado final. De maneira preventiva foram gravados quatro sensores baseados em FBG para a cabeça de bobina, e também quatro para os dentes do estator, sendo que para as medições era necessário apenas um sensor. Os outros sensores eram apenas redundâncias para aumentar a confiabilidade da técnica utilizada aqui caso houvessem problemas.

Para a realização dos ensaios foi necessário causar a excentricidade com um contrapeso no eixo. Em um primeiro momento isso foi feito com peso de 37,44g, não suficiente para que surgisse a excentricidade. Para a posterior análise dos dados foi necessário aumentar o peso

para 150,58g. Após essa adição de peso foi observado o surgimento das frequências fundamentais de deformação, comprovando o aparecimento da excentricidade. Para o estudo de excentricidade em motores elétricos ser mais confiável e mensurável é necessária a criação de um *setup* específico para este caso. Novas metodologias utilizadas para criar a excentricidade permitiram que seja possível obter-se mais dados, e com isso, mensurar o impacto que esse defeito causa na eficiência de um motor elétrico.

O motor de indução, 1 cv e 4 polos, adquirido pela equipe para o desenvolvimento deste trabalho, foi instrumentado com as fibras óticas gravadas. Uma pelo método já conhecido em trabalhos passados, nos dentes do estator. E a outra fibra foi instrumentada para averiguar se na cabeça de bobina seria possível ter aquisição com mesma confiabilidade e precisão. Verificou-se que esta nova instrumentação não obteve êxito pois os resultados fugiram dos apresentados pela teoria. Mesmo não sendo o resultado desejado, é importante salientar que é sempre necessário serem estudadas novas alternativas que possibilitem a melhoria de pesquisas realizadas anteriormente.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A metodologia de estudo aplicada aqui permite estudar não somente o defeito de excentricidade, mas também, todos os defeitos que causam deformação do estator. Isso é possível pelo alto grau de flexibilidade que sensores a fibra ótica proporcionam, portanto, além do desenvolvimento de um software capaz de ler os dados de vibração durante a operação de um motor e também de uma nova proposta de alocação dos sensores para a medição de excentricidade no eixo, é importante que este trabalho sirva ainda para as futuras aplicações e estudos que têm como foco a análise de falhas em máquinas elétricas de forma geral.

Durante o preparo do arranjo experimental, notou-se uma certa dificuldade na colagem das fibras óticas na parte interna da máquina. Por se tratarem de materiais muito frágeis, a facilidade de danificar uma rede de Bragg gravada é alta. E por isso, como continuação de estudo desta tecnologia seria importante o desenvolvimento de um encapsulamento capaz de proteger as redes gravadas e que fosse composto de material maleável para garantir uma resistência extra aos sensores. Uma aplicação interessante, seria em máquinas elétricas de grande porte, que sempre foi a justificativa deste trabalho.

Para futuros trabalhos seria interessante o estudo de novos locais para a colagem das FBG's, que possibilitassem assim, uma alocação menos intrusiva à máquina – algo de extrema importância no que tange máquinas de grande porte e como garantir seu funcionamento pleno,

sem paradas necessárias para a instrumentação. Outro ponto importante para melhoria, seria o desenvolvimento de um novo setup para a criação da excentricidade e avaliação de como esta impacta o seu desempenho. Seria possível, dessa forma, estudar a influência da excentricidade na vida útil de um motor elétrico de indução bem como na sua eficiência energética.

Considerando o momento atual da indústria, onde inversores de frequência são utilizados em larga escala, a aplicação do programa desenvolvido pela equipe pode se tornar uma ferramenta útil para a leitura das componentes harmônicas da vibração, que se deslocam ao alterar a frequência da fonte e a velocidade do rotor. Como os sensores a FBG são imunes a radiofrequência esta aplicação se torna muito interessante.

O sensor utilizado para o trabalho pode ser empregado como sensor de temperatura, pois a temperatura é considerada um evento lento, e não interfere nas aquisições de deformação do estator. Basta uma intervenção no software e utilizar na saída um filtro passa alta que analisará a vibração mecânica do motor, já demonstrada neste trabalho, e um filtro passa baixa que realizará a medição de temperatura.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). Banco de Informações de Geração: BIG. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 13 de maio de 2016.

ALMEIDA, M. T. **Análise de vibrações na manutenção preditiva de motores elétricos**. Technical report, Fupai, 1996.

ARAÚJO, Rui Gonçalo Clara. **Desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução**. 2015. Tese de Doutorado.

ASSUNÇÃO, Renato Pinto. **Ensino de detecção de avarias em motores de indução**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Nova de Lisboa.

BACCARINI, Lane Maria Rabelo. **Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução**. 2005.

BELLINI, Alberto et al. **Advances in diagnostic techniques for induction machines**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 12, n. 55, p. 4109-4126, 2008.

BONNETT, Austin H.; YUNG, Chuck. **Increased efficiency versus increased reliability**. IEEE Industry Applications Magazine, v. 14, n. 1, p. 29-36, 2008.

BONNETT, Austin H. **Root Cause Methodology for Induction Motors: A Step-by-Step Guide to Examining Failure**. IEEE Industry Applications Magazine, v. 18, n. 6, p. 50-62, 2012.

CHENG, L. K.; OOSTDIJCK, B. W. High-speed structural monitoring using a Fiber Bragg Grating sensor system. In: **Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. OfS 2002, 15th**. IEEE, 2002. p. 215-218.

DE MORAIS SOUSA, Kleiton et al. **Vibration measurement of Induction Motor under dynamic eccentricity using optical fiber Bragg grating sensors**. In: Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International. IEEE, 2015. p. 1-5.

DE MORAIS SOUSA, Kleiton et al. **Dynamic Eccentricity Induced in Induction Motor Detected by Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors**. In: IEEE Sensor J., vol. 12, no. 10, pp. 3054-3061

EMATSU, Márcio Yoshikazu et al. **Análise espectral da corrente de partida de motores de indução para detecção de falhas nas barras do rotor**.2008.

FABIAN, M. et al. Vibration measurement of electrical machines using integrated fibre Bragg gratings. In: **International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)**. International Society for Optics and Photonics, 2015. p. 963417-963417-4.

FAIZ, J.; MOOSAVI, S. M. M. **Review of eccentricity fault detection techniques in IMs focusing on DFIG**. In: 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). IEEE, 2015. p. 513-520.

FITZGERALD, A. E.; JR, CHARLES K.; UMANS, STEPHEN. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**.6ª Edição. Artmed Editora, 2006. 603 p.

GHATAK, A.; THYAGARAJAN, K. **An Introduction to Fiber Optics**. Cambridge University Press, 2009. ISBN 0521577853.

GODOY, Wagner Fontes. **Multiclassificador inteligente de falhas no domínio do tempo em motores de indução trifásicos alimentados por inversores de frequência**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.

GONÇALVES, Vinícius Sell et al. **Desenvolvimento de uma metodologia numérica para a predição dos três primeiros modos de vibração de um motor elétrico fixo em base rígida**.2012.

GRIEGER, J, et al. **Estimation of Static Eccentricity Severity in Induction Motors for On-Line Condition Monitoring**. 2006.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings, Second Edition (Optics and Photonics Series)**. Academic Press, 2009.

KERSEY, A. D., “**A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology**”, *Optical Fiber Technology*, vol. 2, p. 291-317, 1996.

MENEGOTTO, Giovana de Fatima. **Tratamento termoquímico de hidrogenação em fibras Óticas**.2006.

NAHA, Arunava et al. **A Method for Detecting Half-Broken Rotor Bar in Lightly Loaded Induction Motors Using Current**, 2016.

SANTOS, Fernanda Maria da Cunha et al. **Sobre a aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de falhas em máquinas de indução-uma visão geral**. Sba: Controle &Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 23, n. 5, p. 553-569, 2012.

SANTOS, Winderson. **Introdução a Programação com LabVIEW**.Curitiba:UTFPR,2009.

SIDDIQUE, Arfat; YADAVA, G. S.; SINGH, Bhim. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. **Energy conversion, IEEEtransactionson**, v. 20, n. 1, p. 106-114, 2005.

SILVA, Jean Carlos Cardozo da. **Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra óptica**. 2005.

TOLIYAT, H. A.; NANDI, S.; CHOI, S.; MESHGIN-KELK, H. **Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis**. CRC Press, 2012.

TRIGEASSOU, Jean-Claude (Ed.). **Electrical Machines Diagnosis**. John Wiley & Sons, 2011.

HECHT, Eugene. **Optics, Fourth Edition**. Addison Wesley, 2002.