

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Luiz Felipe Baldo Marques

**MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE ASSINATURA DE CORRENTE E FLUXO
MAGNÉTICO**

Santa Cruz do Sul, dezembro de 2016.

Luiz Felipe Baldo Marques

**MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE ASSINATURA DE CORRENTE E FLUXO
MAGNÉTICO**

Trabalho de conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade de Santa Cruz do Sul para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Fabrício Antônio
Egert

Santa Cruz do Sul, dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, queria agradecer à Universidade de Santa Cruz do Sul, minha segunda casa, onde tanto as pessoas quanto a instituição contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal.

À minha mãe, Beatriz Baldo Marques, que sempre me deu todo o apoio e estímulo possível durante esta etapa da minha vida, assim como em todas as outras.

Ao meu irmão, Luiz Fernando Baldo Marques, que sempre compartilhou comigo o gosto pela engenharia e a vontade de aprender tendo me ensinado mais do que imagina.

À minha amada, Marcela Bublitz, que sempre esteve presente para me dar carinho e alegrias nos momentos difíceis, e também compartilhar comigo a felicidade dos bons momentos.

Ao meu orientador, Prof. Fabrício Antônio Egert, que se dedicou à me orientar neste último ano, sendo vital no desenvolvimento deste trabalho.

A todo o corpo docente do Departamento de Engenharia, do qual tive o prazer de absorver muito conhecimento, em especial ao Prof. Adriano José Bombardieri, que sempre foi um tutor, conselheiro e amigo durante todo o curso.

Ao Eng^o Carlos Rafael Guimarães Pena, que além de me dar uma oportunidade única de aprendizado, me deu suporte técnico e administrativo durante todo o desenvolvimento deste trabalho, bem como ao meu colega e sempre disposto tutor, Carlos Zenilto Treicha Garcia, por toda a sabedoria e vivência profissional que compartilhou comigo.

E finalmente, meu eterno agradecimento ao Eng^o Jorge Luiz Rodrigues Marques, meu ídolo, meu eterno professor, meu exemplo, meu conselheiro, meu companheiro para toda a vida, meu pai.

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.” Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de um método de manutenção preditiva de motores de indução trifásicos baseado na análise de espectro de frequência de corrente e fluxo magnético em motores de uma empresa do ramo petroquímico. A proposta principal foi estudar os métodos que a empresa utiliza em relação às técnicas citadas, compará-los com os métodos e procedimentos estudados e propostos pelos principais pesquisadores do assunto, e então, sugerir melhorias no sistema de manutenção preditiva de motores trifásicos de indução da empresa.

O objetivo da aplicação da manutenção preditiva por análise de corrente e fluxo magnético é detectar falhas e defeitos no motor que possam causar ou que já tenham causado danos ao motor. Tais falhas podem ser: desbalanceamento magnético dos enrolamentos, barras de rotor quebradas, excentricidade do entreferro e rotor, e outras falhas eletromecânicas.

A técnica estudada se baseia na aquisição e comparação de assinaturas de corrente e fluxo magnético dos motores, nos quais são utilizados sensores conectados a um equipamento de coleta e processamento de sinais, que faz a leitura dos sinais no domínio do tempo e faz o seu processamento para o domínio da frequência, através da Transformada Rápida de Fourier, a fim de detectar as frequências eletromagnéticas características do motor. A localização gráfica, a amplitude e a diferença de amplitude (em dB) destas frequências em relação à frequência fundamental do motor (60 Hz) é o que define a presença ou não de falhas no motor.

Ao final deste trabalho, foram sugeridas melhorias e foi elaborado um plano de implementação das melhorias, baseado na comparação das técnicas estudadas com sua aplicabilidade prática. Desta forma, foi possível notar a evolução das técnicas de análise preditiva de motores elétricos.

Palavras-chave: Manutenção preditiva, motores trifásicos de indução, análise de espectro de frequência.

ABSTRACT

This paper presents the study of a three-phase induction motor predictive maintenance method based on the frequency spectrum analysis of current and magnetic flux of motors from a petrochemical industry company. The main proposal was to study the methods that the company uses in relation to the mentioned techniques, compare them with the methods and procedures studied and proposed by the main researchers from the subject, and then, suggest improvements in the three-phase induction motors predictive maintenance system of the company.

The objective of the application of the predictive maintenance by current and magnetic flux analysis is to detect faults and defects in the motor that may cause or has already caused damage to the motor. Such faults can be: windings magnetic unbalancing, broken rotor bars, airgap and rotor eccentricities, and other electromechanical faults.

The studied technique is based on the acquisition and comparison of the motors current and magnetic flux signatures, in which are used sensors connected to an signal processing and gathering equipment, which makes the signals reading in the time domain and makes its processing to the frequency domain, through the Fast Fourier Transformer, in order to detect the characteristic electromagnetic frequencies of the motor. The graphic location, the amplitude and the amplitude difference (in dB) of these frequencies in relation to the motor fundamental frequency (60 Hz) are what defines the presence or not of faults in the motor.

At the end of this paper, improvements were suggested and it was elaborated an implementation scheme of the improvements, based in the comparison of the studied techniques with its practical applicability. Thus, it was possible to notice the evolution of the predictive analysis techniques of electrical motors.

Keywords: Predictive maintenance, three-phase induction motors, frequency spectrum analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes do motor trifásico de indução.....	12
Figura 2 - Estator do motor trifásico	13
Figura 3 - Construção do rotor bobinado.....	14
Figura 4 - Circuito esquemático do rotor bobinado.....	14
Figura 5 - Construção do rotor gaiola de esquilo	15
Figura 6 - Gaiola de esquilo	15
Figura 7 - Curva de torque em função da velocidade.....	19
Figura 8 - Circuito equivalente (monofásico) de um motor de indução	20
Figura 9 - Alicates amperímetro medindo corrente de um motor elétrico.....	24
Figura 10 - Exemplo de sinal contínuo periódico	25
Figura 11 - Exemplo de sinal contínuo não-periódico	25
Figura 12 - Exemplo de sinal discreto	26
Figura 13 - Representação gráfica por série de Fourier.....	27
Figura 14 - Sinal representado no domínio da frequência.....	28
Figura 15 - Sinal representado por Transformada de Fourier	29
Figura 16 - Implementação das bobinas para medição de fluxo	30
Figura 17 - Fluxo magnético no tempo de um motor.....	31
Figura 18 - Espectros de frequência de corrente e fluxo magnético	31
Figura 19 - Bandas de análise de barras quebradas.....	32
Figura 20 - CSI 2130 Machinery Health Analyzer	43
Figura 21 - Bobina de fluxo do CSI 2130	44
Figura 22 - Alicates do CSI 2130.....	44
Figura 23 - Lista de planos de manutenção para um equipamento	47
Figura 24 - Plano de manutenção de fluxo magnético	47
Figura 25 - Picos do espectro de fluxo magnético axial do 12IEX202	50
Figura 26 - Picos do espectro de corrente da fase A do 12IEX202.....	51
Figura 27 - Picos do espectro de corrente da fase B do 12IEX202.....	51
Figura 28 - Picos do espectro de corrente da fase C do 12IEX202	52
Figura 29 - Fluxograma de implementação das sugestões de melhoria	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade comerciais de motores para f_0 de 60 Hz.	18
Tabela 2 - Severidade e recomendações para análise de corrente.	33
Tabela 3 - Cronograma de atividades	40
Tabela 4 - Comparação das técnicas utilizadas vs. estudadas.....	56
Tabela 5 - Relação criticidade/quantidade dos motores da empresa.....	58

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Justificativa	1
1.2.	Área de limitação do tema	2
1.3.	Objetivos	3
1.3.1.	Objetivo geral	3
1.3.2.	Objetivos específicos	3
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1.	Noções de manutenção.....	4
2.1.1.	Confiabilidade	5
2.1.2.	Manutenabilidade	6
2.1.3.	Disponibilidade	7
2.1.4.	Manutenção corretiva.....	7
2.1.5.	Manutenção preventiva	8
2.1.6.	Manutenção preditiva	9
2.2.	Motores trifásicos de indução	10
2.2.1.	Aspectos construtivos	11
2.2.1.1.	Estator	12
2.2.1.2.	Rotor	13
2.2.1.3.	Carcaça.....	16
2.2.1.4.	Caixa de ligação.....	16
2.2.1.5.	Tampa defletora	16
2.2.2.	Princípio de funcionamento.....	16
2.2.2.1.	Velocidade e escorregamento	17
2.2.2.2.	Conjugado	19
2.2.2.3.	Circuito equivalente	20

2.2.3.	Falhas	22
2.3.	Sensores e medição	22
2.3.1.	Corrente elétrica	23
2.3.2.	Fluxo magnético	24
2.4.	Análise de sinais.....	25
2.4.1.	Série de Fourier	26
2.4.2.	Transformada de Fourier	28
2.5.	Análise de corrente e fluxo magnético	29
2.5.1.	Instrumentação	30
2.5.2.	Forma de análise	31
2.5.3.	Diagnósticos de falhas.....	32
2.5.3.1.	Barras quebradas	32
2.5.3.2.	Excentricidade de entreferro	33
2.5.3.3.	Falhas mecânicas	34
3.	METODOLOGIA.....	35
3.1.	Estudo e avaliação das técnicas empregadas	35
3.1.1.	Equipamentos utilizados nas medições	36
3.1.2.	Procedimentos de medição	36
3.1.3.	Planos de manutenção.....	36
3.2.	Comparação com outras técnicas	37
3.3.	Oportunidades de melhoria	37
3.3.1.	Identificação de necessidades	38
3.4.	Implementação das melhorias.....	38
3.5.	Resultados obtidos e conclusão.....	39
4.	CRONOGRAMA.....	40
5.	DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO	41
5.1.	Técnicas utilizadas pela empresa	41

5.1.1.	Equipe de manutenção.....	41
5.1.2.	CSI 2130.....	42
5.1.4.	Planos de manutenção.....	46
5.1.4.1.	Critérios de seleção.....	47
5.1.4.2.	Periodicidade	48
5.1.5.	Análise dos dados coletados	49
5.1.6.	Caso de sucesso	50
5.2.	Técnicas utilizadas vs. Técnicas estudadas	53
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
6.1.1.	Comparação	54
6.1.1.1.	Similaridades	54
6.1.1.2.	Divergências	55
6.2.	Sugestões de melhoria.....	56
6.2.1.	Coleta e análise.....	56
6.2.2.	Apresentação para as equipes	57
6.2.3.	Novos motores analisados	58
6.2.4.	Plano de implementação.....	59
7.	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A constante demanda da indústria por maior produtividade leva à uma necessidade da evolução da confiabilidade de sistemas produtivos. Como os motores elétricos de indução são os atuadores e acionadores mais utilizados industrialmente, segundo Lamin Filho (2003) e Pereira (2011), eles devem receber uma atenção especial, principalmente em relação as formas de detecção de falhas.

De acordo com Thakur (2015), ter conhecimento do estado funcional dos motores elétricos evita perdas econômicas por eventos catastróficos e também aumenta a produtividade, confiabilidade e manutenibilidade dos sistemas produtivos. Com isso pode se dizer que a manutenção, especialmente a preditiva, colabora para a melhoria dos sistemas e processos industriais.

Em função do acima exposto é necessário demonstrar o domínio da técnica, para se ter uma maior confiança nos diagnósticos de falhas, formando-se então uma base sólida para o desenvolvimento e otimização dos métodos de manutenção preditiva de motores elétricos.

1.1. Justificativa

Este trabalho se baseia na necessidade do domínio e desenvolvimento das técnicas de manutenção preditiva de motores elétricos e sua adaptação e otimização no meio industrial.

O método de detecção de falhas por análise de assinatura de corrente e fluxo magnético vem sendo estudado nos últimos anos, e tem chamado atenção das equipes de manutenção de diversas empresas (THAKUR, 2015). Vários autores vêm estudando estas técnicas na última década, como Brito, Lamin Filho e Thakur. Todos eles obtiveram avanços significativos, especialmente em relação a análise das assinaturas de corrente e fluxo magnético de motores. Porém isso não limita este assunto a tais avanços.

Como esta é uma área de estudos relativamente nova, possui um potencial grande para novos desenvolvimentos, tanto no âmbito de evolução tecnológica da análise de espectro, quanto na sua aplicabilidade e eficácia no meio operacional e até mesmo administrativo das indústrias e outros setores que demandam atividades de manutenção preditiva de motores elétricos.

Tendo em vista a demanda de sistemas mais eficientes e confiáveis de manutenção, e o solo fértil para o desenvolvimento da técnica abordada neste trabalho, torna-se imprescindível o estudo contínuo e progressivo de tais técnicas, sempre com o intuito de se desenvolver tanto novas formas de análise de falhas, quanto a melhoria das técnicas conhecidas e utilizadas na indústria.

1.2. Área de limitação do tema

Assim como a maioria dos trabalhos e atividades de engenharia, este abrange diversos assuntos que, quando analisados individualmente podem não apresentar muita relação, mas quando reunidos em um propósito comum, se mostram bastante eficientes.

O tema núcleo deste trabalho são os motores elétricos trifásicos, portanto é um conteúdo que demanda conhecimento aprofundado, pois a análise de falhas proposta por este trabalho se dá nos detalhes construtivos do motor, fazendo-se necessário então um conhecimento além do trivial.

Como o desenvolvimento da técnica é destinado a otimizar os processos de manutenção industrial, o assunto possui um vínculo direto com os conceitos de manutenção, fazendo-se necessário um conhecimento sólido dos aspectos técnicos e gerenciais das metodologias de manutenção aplicadas à indústria.

A aquisição de dados para análise é feita por sensores e instrumentos específicos, portanto é necessário um conhecimento sobre instrumentação e técnicas de medição. E inerente a isso está a teoria de análise de sinais, tanto em domínio do tempo quanto em domínio da frequência, através das ferramentas matemáticas como as Séries e Transformadas de Fourier.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar, conhecer e sugerir melhorias para os procedimentos e métodos de manutenção preditiva de motores trifásicos de indução baseado em detecção de falhas através da análise espectral de corrente e fluxo magnético em uma empresa brasileira do ramo petroquímico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudo dos processos, técnicas e procedimentos de manutenção preditiva utilizados pela empresa em questão.
- Comparar os procedimentos utilizados na empresa com os métodos de manutenção preditiva de motores elétricos baseados em análise de espectro de corrente e fluxo magnético desenvolvidos pelos pesquisadores da área.
- Explorar as oportunidades de melhoria dos processos de manutenção preditiva dos motores da empresa.
- Elaborar um plano de implementação para as melhorias sugeridas, se houver.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem por finalidade o levantamento teórico e textual de informações pertinentes ao trabalho, para consolidar todos os conhecimentos referentes ao tema em questão.

Primeiramente, no item 2.1 é feita uma ambientação em relação à conceitos básico de manutenção. O item 2.2 fornece uma visão resumida do funcionamento dos motores trifásicos de indução, referentes à suas aplicações, estrutura construtiva, características de funcionamento e falhas potencias e mais comuns na indústria.

O item 2.3 trata de uma leitura mais técnica em relação ao sensores utilizados e as formas de medição dos motores elétricos, a fim de fazer a aquisição de dados para a análise espectral. Já os métodos de análise dos sinais adquiridos é explicado de melhor forma no item 2.4.

Por fim no item 2.5 serão abordadas as técnicas de detecção de falhas em motores elétricos estudadas pelos principais pesquisadores nacionais e internacionais do assunto, como Brito, Dias, Lamin Filho e Tharkur. Assim, é possível de se ter um embasamento satisfatório para o desenvolvimento e aplicação da metodologia deste trabalho.

2.1. Noções de manutenção

A crescente demanda por maior produtividade e lucratividade no meio industrial nas últimas décadas forçou os empresários a darem cada vez mais atenção à qualidade de funcionamento de suas fábricas e linhas de produção. Todas as máquinas, ao longo do tempo, tendem a se desgastar ou até mesmo a sofrer danos não previstos em sua vida útil (NEPOMUCENO, 1989), fazendo-se necessárias metodologias técnicas e de gestão para minimizar as perdas decorrentes destes desgastes, danos e falhas.

As primeiras definições e propostas relativas à manutenção de máquinas e equipamentos surgiram na década de 40, no setor militar. Nesta época o

mundo estava com a indústria bélica no seu auge de produção e desenvolvimento, e em função da importância estratégica que tal ramo apresentava, os governos começaram a exigir cada vez mais garantias de que as armas, veículos e outros equipamentos funcionassem de forma desejada e previsível (NEPOMUCENO, 1989).

Como tais métodos e ferramentas de gestão se mostraram bastante eficazes, logo foram absorvidos pela indústria não-bélica, onde começaram a se desenvolver e se dispersar de tal forma que hoje em dia se torna quase impossível de se encontrar qualquer máquina ou equipamento no mundo que não possua algum procedimento ou técnica para garantir seu funcionamento de forma desejada.

É fato indiscutível que toda e qualquer máquina e equipamento apresenta um certo envelhecimento devido ao uso. Com o desenvolvimento tecnológico observado a partir da década dos quarenta, foram criados conceitos novos e outros foram aperfeiçoados, compatibilizando uma série de abstrações a aplicações eminentemente práticas. Entre tais conceitos, que foram estudados e aperfeiçoados nas últimas quatro décadas, tem-se a confiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade. (NEPOMUCENO, 1989, p. 55).

A manutenção, por fim, pode ser definida como um conjunto de técnicas e procedimentos padronizados que visam garantir o funcionamento de um dado equipamento, máquina ou dispositivo dentro de suas funções e regimes estabelecidos pelo fabricante do mesmo (KARDEC, 2001) e (NEPOMUCENO, 1989).

2.1.1. Confiabilidade

A confiabilidade é um dos termos mais importantes e mais utilizados no âmbito da manutenção, que carrega consigo um significado até muitas vezes

matemático e estatístico, pois ele em resumo matematicamente o quão confiável é uma máquina ou equipamento. Conforme (Fogliatto, 2009, p. 2):

“A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.”

Os fabricantes de máquinas e equipamentos, com aplicações industriais ou outras que exijam um mínimo de confiabilidade, como defesa, segurança pública, etc., atualmente já fornecem junto o valor percentual de confiabilidade de seu produto. Isto não é útil apenas para o cliente conhecer a confiabilidade do equipamento que está adquirindo, mas também utiliza esta informação para calcular a confiabilidade de todo o sistema onde este equipamento ou dispositivo estará inserido, considerando que todos os componentes do sistemas possuam um valor de confiabilidade definido pelos fabricantes, fornecendo uma base para a elaboração de planos de manutenção para o equipamento ou sistema.

2.1.2. Manutenibilidade

Diferente da confiabilidade e da disponibilidade, a manutenibilidade é uma característica mais qualitativa, que à primeira vista parece ter um conceito muito similar à confiabilidade, porém através de uma leitura mais focada é possível ver que se trata de uma característica muito diferente e de extrema importância.

Nepomuceno (1989, p. 65) conceitua manutenibilidade como a propriedade de um produto projetado com dada finalidade de funcionar conforme determinado pelo fabricante e que possa ser sustentada durante toda a sua vida útil e com custos de trabalho minimizados. Ou seja, a manutenibilidade é o grau de desenvolvimento do produto que permite que ele tenha sua manutenção operacionalizada da forma mais eficiente e eficaz possível.

A manutenibilidade de uma máquina ou dispositivo carrega consigo também algumas qualidades mais específicas como padronização,

modularização, permutabilidade, acessibilidade, etc. Estes conceitos ajudam a definir de forma mais palpável a manutenibilidade de um produto (PEREIRA, 2011).

2.1.3. Disponibilidade

A disponibilidade de um certo equipamento é uma propriedade muito simples, que exprime a relação de tempo em que equipamento está em funcionamento, ou seja, uma espécie de “tempo útil” do equipamento. A disponibilidade de um equipamento é adimensional e pode ser facilmente calculado conforme a eq. 1 abaixo:

$$Disponibilidade = \frac{\textit{tempo disponível}}{\textit{tempo disponível} + \textit{tempo ocioso}} \quad (1)$$

Neste caso o tempo disponível é o tempo em que o equipamento está apto à operar sem apresentar problemas e desempenhando a função a qual foi destinado. Já o tempo ocioso apresenta o intervalo em que o equipamento não opera como citado anteriormente, seja por tempo parado por estrago, por manutenção programada ou não-programada, *setup* de máquina, inspeção, etc. (NEPOMUCENO, 1989).

2.1.4. Manutenção corretiva

A forma mais clássica e simples de manutenção é a corretiva. Ela se baseia no ato de corrigir um problema após a sua ocorrência, como uma ação de correção. É a forma mais indesejada de manutenção do ponto de vista empresarial e industrial, pois normalmente gera paradas longas nas linhas de produção, e geralmente se faz necessária a substituição de equipamentos e peças, ou seja, gera mais custos à empresa (KARDEC, 2001).

Pereira (2011, pg. 102) diz que a manutenção corretiva pode ocorrer pela falta de planejamento, levantamento de custos ou até mesmo por desprezo pelas

perdas de produção, mas também afirma que existem especialistas que dividem a manutenção corretiva em emergencial e programada. A primeira segue o quadro normal citado anteriormente, onde a correção é feita apenas após a quebra ou pane, enquanto a segunda é uma manutenção corretiva com planejamento prévio, mas que não é muito utilizada, sendo substituída muitas vezes pela manutenção preventiva, sendo efetuada apenas quando necessária.

2.1.5. Manutenção preventiva

Na década de 1930, começou-se a perceber que a manutenção corretiva era muito custosa para as empresas, surgindo então a necessidade um método mais eficaz de manutenção, que aumentasse principalmente a disponibilidade e confiabilidade dos ativos e diminuísse o custo em reparos e intervenções emergenciais (PEREIRA, 2011). A partir desta necessidade foi criado o conceito de manutenção preventiva, que como o próprio nome indica, se trata de medidas técnico-administrativas para prevenir falhas, panes e danos físicos imprevistos nos ativos industriais.

A manutenção preventiva se dá pela elaboração e aplicação de rotinas de verificação e levantamento de dados periódicos para verificar o funcionamento e condições das máquinas e equipamentos em utilização. Um dos exemplos mais práticos que se pode ver é o Plano de Manutenção, que consiste em um documento completo que define, para um dado equipamento, quais os tipos de verificações, medições e testes a serem feitos, com qual frequência devem ser feitos, com quais equipamentos, quem deve realizá-los, e quais os indicadores e parâmetros (provenientes das medições e testes) que definem se o ativo está apto a continuar em funcionamento ou se deve passar por uma manutenção corretiva programada (KARDEC, 2001).

Para o desenvolvimento destes métodos, se faz necessário um bom conhecimento da máquina ou equipamento em questão, bem como um considerável nível de organização técnica e administrativa da empresa. Isto evidencia como o crescimento da manutenção preventiva trouxe consigo também o desenvolvimento da gestão e da responsabilidade das empresas em

relação aos seus ativos industriais, tomando-os muitas vezes como fatores importantes para a competitividade e sobrevivência da empresa.

2.1.6. Manutenção preditiva

Diferentemente da manutenção preventiva, a manutenção preditiva se baseia na aquisição de dados através dos quais se possa identificar irregularidades que possam vir a causar uma pane ou quebra. Uma vez detectadas estas irregularidades, é programada uma intervenção corretiva no equipamento, para justamente evitar uma correção emergencial (KARDEC, 2001). Pereira (2011, pg. 124) ressalta que as duas principais técnicas de manutenção preditiva são a Termografia e a Análise de Vibração.

A Termografia é feita através do uso de sensores de radiação térmica ou infravermelha, para que se possa verificar as nuances de temperatura em uma superfície e identificar tensões térmicas (NEPOMUCENO, 1989). Em máquinas que fazem o uso de energia elétrica e eletromagnética, como motores elétricos por exemplo, a presença de “pontos quentes” geralmente se origina de regiões com impedância mais elevada que o normal (provocando o aquecimento por efeito Joule), elevação essa causada por terminais frouxos, condutores danificados, ou até mesmo pontos com grande relutância magnética, que também causa perdas de energia por calor, uma vez que motores elétricos estão sujeito a uma quantidade elevada de energia em forma de fluxo magnético (LAMIN FILHO, 2003).

Vibrações mecânicas são as causas mais comuns de quebras e falhas em equipamentos rotativos. A análise de tais vibrações é muito importante, pois podem indicar desbalanceamento e excentricidade de eixo, rolamentos danificados, e até mesmo desbalanceamentos magnéticos no caso de máquinas elétricas. Estas vibrações normalmente não são percebidas por verificação visual, sendo apenas percebidas e quantificadas por equipamentos específicos, a partir de onde é possível gerar um diagnóstico mais concreto (NEPOMUCENO, 1989).

Similar a análise por vibração, em máquinas elétricas no geral, tem sendo desenvolvida também a análise de assinatura de corrente e de fluxo magnético. Este método consta na análise dos espectros de frequência dos sinais de corrente de enrolamentos e fluxo magnético de rotores, estatores e núcleos, com o intuito de se encontrar frequências anômalas que podem representar irregularidades elétricas, magnéticas e mecânicas na máquina (LAMIN FILHO, 2003).

2.2. Motores trifásicos de indução

Os atuadores mais utilizados atualmente na indústria são os motores elétricos. Além de representar a maioria dos acionamentos de máquinas e equipamentos, geralmente são os maiores consumidores de energia. Dentre os motores elétricos, existem os de corrente contínua e os de corrente alternada (MAMEDE FILHO, 2015).

Os motores que utilizam corrente contínua são aplicados em situações em que se necessita de um torque proporcionalmente mais elevado e um controle mais fácil de velocidade. Estes motores porém possuem uma construção relativamente complexa, tornando-os caros e de onerosa manutenção (NASCIMENTO JUNIOR, 2011).

Motores de corrente alternada são divididos em duas categorias, os síncronos e assíncronos. Os motores síncronos são assim denominados pois o rotor (onde normalmente se encontra o enrolamento de campo fixo) gira na mesma frequência do fluxo magnético do estator (na maioria das vezes a armadura, onde se encontra o campo girante). Este giro em sincronismo (origem do nome) é causado por uma corrente contínua que circula no enrolamento do rotor, fazendo com que o motor síncrono também possua maior complexidade construtiva, acarretando em empecilhos similares ao do motor de corrente contínua. Motores síncronos são mais utilizados principalmente em aplicação que exijam maior solicitação de potência mecânica (UMANS, 2014).

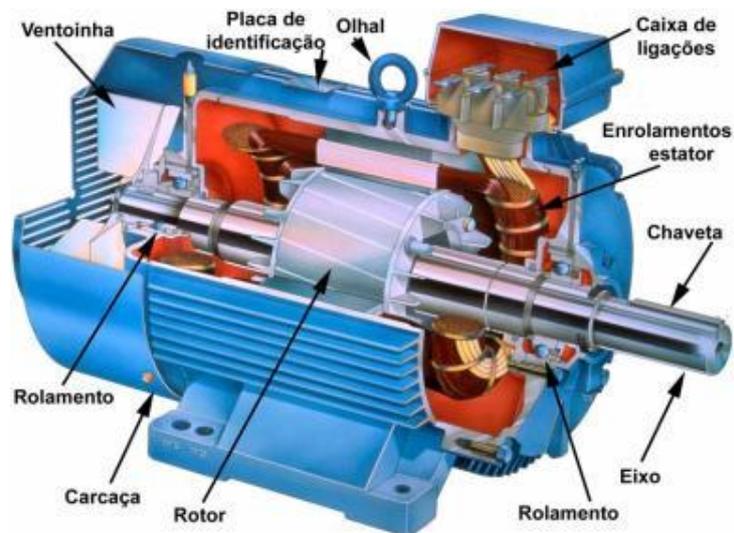
O motor assíncrono por sua vez apresenta maior simplicidade quando comparado com o motor de corrente contínua e com o motor síncrono. Ele não faz o uso de escovas e comutadores pois a corrente no rotor é induzida pelo campo girante do estator, fazendo com que seja conhecido também como motor de indução (NASCIMENTO JUNIOR, 2011).

O motor de indução, diferentemente do motor síncrono, não gira na mesma velocidade que o campo girante, pois possui um escorregamento *s*, fazendo com que o rotor gire à uma velocidade levemente inferior à velocidade síncrona. Esta peculiaridade torna o controle de velocidade do motor de indução um pouco mais complexa em relação aos motor de corrente contínua e o motor síncrono, porém os recentes avanços em eletrônica de potência, *softstarters*, inversores de frequência, etc., tornaram o motor de indução mais fácil de ser controlado.

2.2.1. Aspectos construtivos

Assim como a maioria das máquinas, os motores elétricos podem ser divididos em várias partes diferentes, cada um com uma função específica. Os motores de indução possuem diversas partes e submontagens que são muito importantes para o seu funcionamento, proteção e confiabilidade. Dentre as partes mais importantes dos motores de indução, podem ser citadas de forma resumida, o estator, rotor, carcaça e caixa de ligação (MAMEDE FILHO, 2015).

Figura 1 - Componentes do motor trifásico de indução

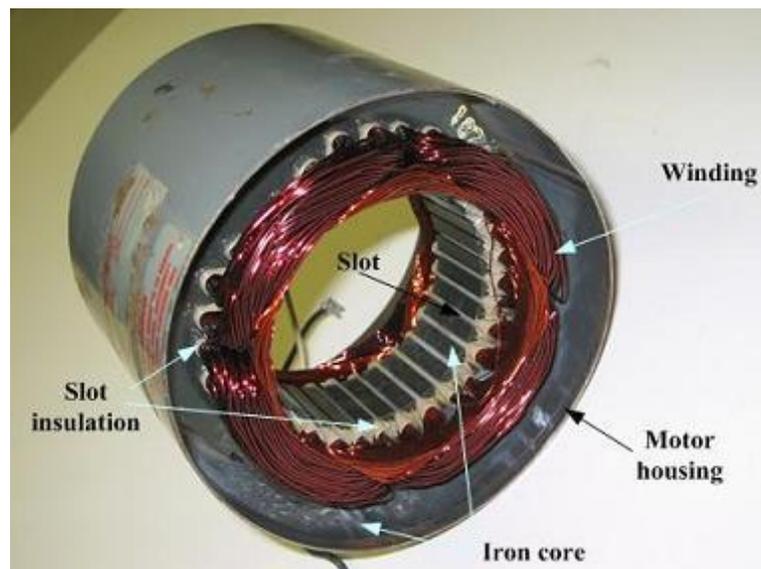


Fonte: disponível em <http://www.portaleletricista.com.br/wp-content/uploads/2015/03/motor-de-inducao.jpg>. Acesso em: 26 mar. 2016.

2.2.1.1. Estator

Como o nome indica, é a estrutura estática do motor. O estator é composto por um núcleo ferromagnético que contém ranhuras axiais internas onde são montados os enrolamentos. Estes enrolamentos são alimentados pela rede trifásica e são responsáveis por gerar o campo girante do motor, que irá oscilar de acordo com a frequência da rede e o número de pólos por fase. Os enrolamentos são montados de forma a ficarem afastados mecanicamente 120° um do outro, para se obter a equivalência mecânica da configuração trifásica, onde cada fase está defasada em 120° elétricos uma da outra (MAMEDE FILHO, 2015).

Figura 2 - Estator do motor trifásico



Fonte: disponível em: <http://docplayer.com.br/docs-images/23/2013647/images/56-0.jpg>.

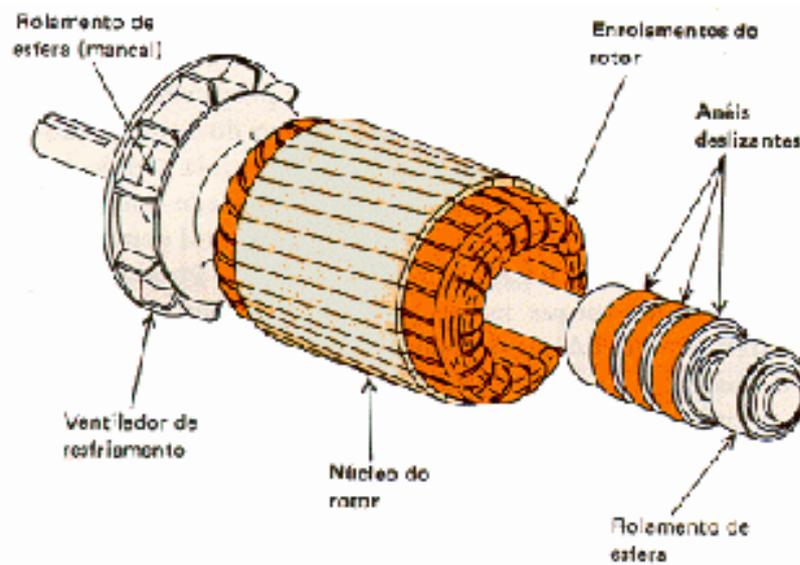
Acesso em: 26 mar. 2016.

2.2.1.2. Rotor

O rotor é a parte móvel do motor, que gira através da interação com o campo girante do estator. Os motores de indução apresentam basicamente dois tipos de diferentes de rotor: bobinado ou “gaiola de esquilo”.

O rotor do tipo bobinado possui enrolamentos que são conectados a anéis coletores presentes no eixo, que por sua vez são conectados ao meio externo por escovas. Desta forma é possível monitorar e controlar o circuito do rotor, tornando possível a inserção de impedâncias nos enrolamentos do rotor para controlar a corrente de partida e produzir um torque mais suave (UMANS, 2014).

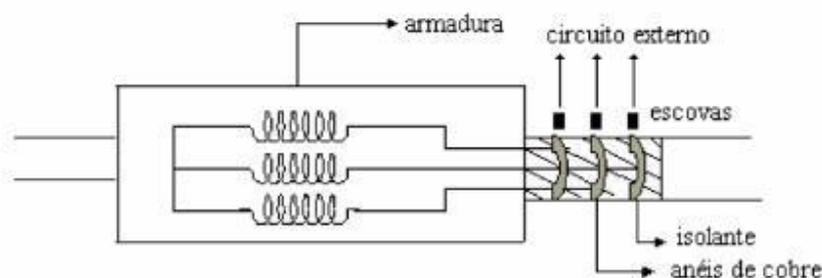
Figura 3 - Construção do rotor bobinado



Fonte: disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAdsYAK/motores-inducao>.

Acesso em: 26 mar. 2016.

Figura 4 - Circuito esquemático do rotor bobinado



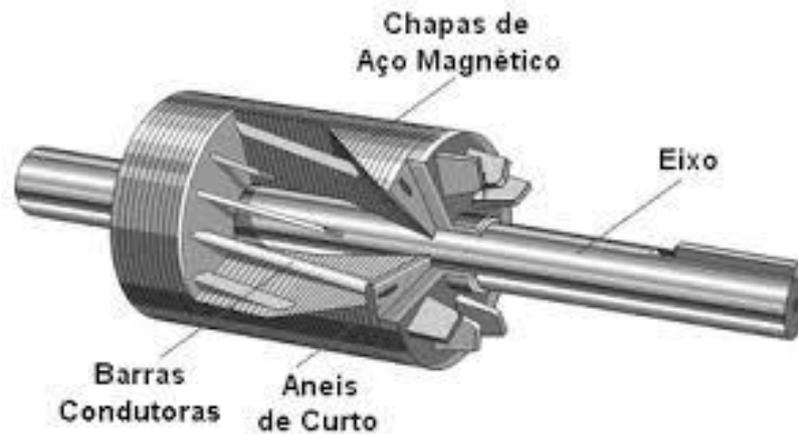
Fonte: disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAALDsAD/electronica-maquina-cnc?part=2>.

Acesso em: 26 mar. 2016.

O rotor do tipo gaiola de esquilo por sua vez é muito mais simples e robusto, tornando-se o tipo mais utilizado atualmente na indústria (UMANS, 2014). Sua estrutura é composta por barras condutoras dispostas de forma axial e curto-circuitadas nas extremidades por anéis condutores, ambos normalmente de alumínio fundido, que contribuem para o seu relativo baixo custo de fabricação. Também são utilizadas chapas ferromagnéticas laminadas e isoladas entre si e entre as barras para concentrar o fluxo magnético induzido no

rotor. As barras são responsáveis por gerarem o campo induzido, que irá interagir com o campo girante, provocando a rotação do eixo.

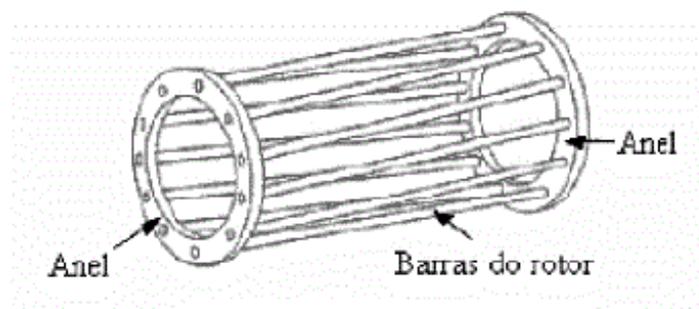
Figura 5 - Construção do rotor gaiola de esquilo



Fonte: disponível em:

http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/farias/materiais/Aula_25_MAE.pdf. Acesso em: 26 mar. 2016.

Figura 6 - Gaiola de esquilo



Fonte: disponível em: [http://2.bp.blogspot.com/-](http://2.bp.blogspot.com/-wbw2Jbm6t1M/UQMc5nKUmZI/AAAAAAAAAK8/liGIb4QI89g/s1600/esquilo.gif)

[wbw2Jbm6t1M/UQMc5nKUmZI/AAAAAAAAAK8/liGIb4QI89g/s1600/esquilo.gif](http://2.bp.blogspot.com/-wbw2Jbm6t1M/UQMc5nKUmZI/AAAAAAAAAK8/liGIb4QI89g/s1600/esquilo.gif). Acesso em: 26 mar. 2016.

Mancais e rolamentos presentes nas extremidades do eixo do rotor são responsáveis por sustentar o rotor e proporcionar a possibilidade de giro livre, para fornecer potência mecânica na ponta do eixo.

2.2.1.3. Carcaça

A carcaça compõe a estrutura mecânica externa do motor, normalmente de ferro fundido, e com aletas axiais na parte externa para melhorar a refrigeração do motor. E onde se encontra também a estrutura de base para a fixação do motor.

2.2.1.4. Caixa de ligação

Um pequeno painel na parte externa do motor, onde se encontram os terminais para se realizar as ligações externas do motor, como a forma de ligação da alimentação (estrela ou triângulo) e/ou das bobinas. As ligações são normalmente feitas por porcas e arruelas de pressão com bornes anelares.

2.2.1.5. Tampa defletora

É a peça que fica do lado da ponta oposta à de fornecimento de potência mecânica do motor. É responsável pela ventilação forçada do motor, e possui uma ventoinha que aproveita o próprio giro do eixo para gerar uma corrente de ar, que irá defletir na tampa, criando um fluxo de ar constante no estator, facilitando a refrigeração por dissipação de calor através do ar.

2.2.2. Princípio de funcionamento

No motor de indução trifásico, o estator é alimentado por uma fonte trifásica externa, criando fluxo magnético que se concentra no núcleo magnético do motor. O rotor, por sua vez não é alimentado por nenhuma fonte externa, tem seus enrolamentos atravessados pelas linhas de fluxo do estator, onde então são induzidas correntes através da Lei de Faraday (HALLIDAY, 1966) como em um transformador (UMANS, 2014).

A corrente no rotor tende a ser contrária ao sentido do campo que lhe atravessa. Desta forma, surge um vetor campo magnético fixo (em relação ao

rotor) que interage com o campo girante do estator, criando então o efeito de giro mecânico no eixo do motor.

A peculiaridade do motor de indução é que a velocidade de giro mecânica no eixo é sempre inferior à velocidade síncrona do campo no estator, o que o origina sua classificação como máquina *assíncrona*. Conforme (Umans, 2014):

“É interessante observar que, embora o rotor opere de forma assíncrona, a onda de fluxo produzida pelas correntes induzidas no rotor giram em sincronismo com a onda de fluxo do estator. De fato, isso é um requisito e está coerente com a capacidade de uma máquina de indução de produzir conjugado líquido.”

Desta forma, admite-se que o torque em um motor de indução depende diretamente da diferença de velocidade entre o campo do estator e o giro do rotor.

2.2.2.1. Velocidade e escorregamento

A rotação síncrona é a velocidade de oscilação do campo no estator, que é definida conforme a eq. 2 abaixo:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_o}{p} \quad (2)$$

Onde f_o é a frequência de tensão da rede e p é o número de pólos no estator (sempre em números pares).

No sistema elétrico brasileiro, a frequência padrão da rede é de 60 Hz, então é possível de se montar um quadro com as velocidades síncronas mais comuns encontradas no mercado para motores de indução.

Tabela 1 - Velocidade comerciais de motores para f_o de 60 Hz.

Nº de pólos	n_s (rpm)
2	3600
4	1800
6	1200
8	900

Fonte: tabela elaborada pelo autor.

O escorregamento de um motor de indução é a diferença entre a velocidade síncrona e assíncrona do motor, e é responsável pelo desempenho dos motores (UMANS, 2014). O escorregamento s é definido conforme a eq. 3 abaixo:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

Onde n é a velocidade assíncrona do rotor.

Este escorregamento também é responsável pela frequência f_r das correntes induzidas nos enrolamentos do rotor, que é relativo também à frequência f_e do fluxo do estator (UMANS, 2014), conforme a eq. 4 abaixo:

$$f_r = s \cdot f_e \quad (4)$$

2.2.2.2. Conjugado

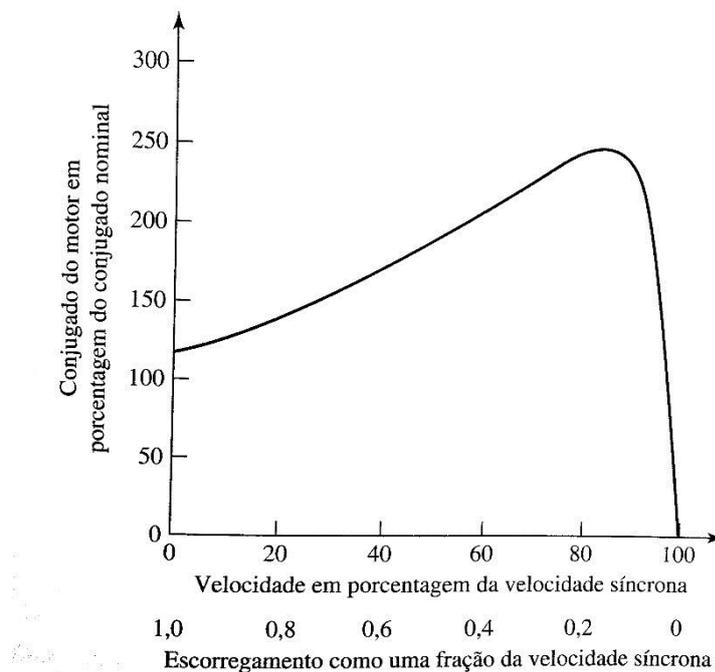
Considerando que a alimentação do estator possui tensão e frequência constantes, o fluxo no entreferro pode ser considerado constante (UMANS, 2014). Desta forma, o conjugado mecânico ou torque T do motor pode ser expresso pela eq. 5 abaixo:

$$T = -K \cdot I_r \cdot \text{sen} \delta_r \quad (5)$$

Onde K é uma constante característica do motor, I_r é a corrente induzida no rotor e δ_r é o ângulo (adiantado) entre a onda de FMM (*força magnetomotriz*) do rotor em relação à FMM do entreferro.

A figura 7 abaixo mostra a relação do conjugado de um motor de indução em função do escorregamento/velocidade assíncrona.

Figura 7 - Curva de torque em função da velocidade



Fonte: (Umans, 2014).

O conjugado também pode ser descrito em função da potência e a velocidade angular, conforme a eq. 6 abaixo:

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (6)$$

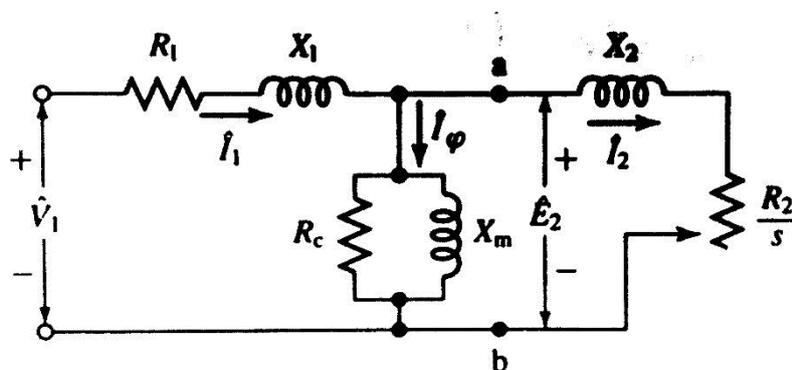
Onde P_{mec} é a potência mecânica disponível no eixo, P_g é a potência total fornecida ao rotor pelo estator através do entreferro, ω_m é a velocidade angular mecânica, e ω_s é a velocidade angular mecânica síncrona (UMANS, 2014).

2.2.2.3. Circuito equivalente

Para auxiliar na análise dos sinais elétricos e potência no motor de indução, se faz o uso de circuitos equivalentes, montado com componentes básicos de circuitos elétricos, tais como resistores, indutores e fontes de tensão.

Os circuito equivalente básico (monofásico) está demonstrado na figura 8 abaixo:

Figura 8 - Circuito equivalente (monofásico) de um motor de indução



Fonte: (Umans, 2014).

Onde:

\hat{V}_1 = Tensão de fase de terminal do estator

\hat{E}_2 = FCEM de fase gerada pelo fluxo de entreferro resultante

\hat{I}_1 = Corrente do estator

R_1 = Resistência efetiva do estator

X_1 = Reatância de dispersão do estator

\hat{I}_φ = Corrente de excitação do fluxo resultante no entreferro

R_C = Resistência de perdas no núcleo

X_m = Reatância de magnetização

\hat{I}_2 = Corrente de carga no rotor, que produz a FMM do entreferro

$\frac{R_2}{s}$ = Resistência do rotor, em função da carga mecânica/escorregamento

X_2 = Reatância de dispersão do rotor

Desta forma é possível deduzir as potências do motor a partir das equações abaixo:

$$P_g = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \quad (7)$$

$$P_{rotor} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (8)$$

$$P_{mec} = P_g - P_{rotor} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (9)$$

E portanto, considerando a eq. 6, é possível determinar o conjugado mecânico através da análise anterior do circuito equivalente, considerando ω_e e f_e a velocidade e a frequência de excitação elétrica (da fonte), respectivamente.

$$T_{mec} = \left(\frac{p}{2 \cdot \omega_e}\right) \cdot \left(3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s}\right) \quad (10)$$

$$\omega_e = 2 \cdot \pi \cdot f_e \quad (11)$$

2.2.3. Falhas

Considerando o circuito equivalente e suas equações, é possível relacionar as possíveis falhas em um motor com seus efeitos na corrente e fluxo magnético (LAMIN FILHO, 2003).

As falhas mais comuns em termos elétricos, são aquelas que distorcem a corrente no estator e o fluxo magnético no entreferro, como: desbalanceamento de enrolamentos de estator e bobinas em curto que variam a impedância do estator; excentricidades no rotor/eixo que alteram a impedância de magnetização do entreferro; sobre e subtensões na alimentação; baixa isolamento e barras quebradas ou enrolamentos defeituosos no rotor (LAMIN FILHO, 2003), (SPAMER, 2009) e (NEPOMUCENO, 1989).

Desta forma é possível de se dizer que muitas das falhas que podem ocorrer em um motor de indução podem ser detectadas por medições de corrente e fluxo magnético.

2.3. Sensores e medição

Nepomuceno (1989, p. 166) enfatiza, em relação à manutenção preditiva que é necessário e imprescindível a presença de informações quantitativas, ou seja, numéricas, para se ter um parecer mais confiável se um determinado equipamento está funcionando de forma correta ou não.

De acordo com Aguirre (2013, p. 3), *transdutores* são elementos capazes de transformar uma forma de energia em outra. Aguirre (2013, p. 3) também define *sensores* como transdutores que transformam grandezas físicas em sinais elétricos.

A correta utilização e escolha dos instrumentos de medição é muito importante para se obter um diagnóstico confiável do equipamento ou sistema em questão. Para a análise de falhas realizadas neste trabalho, serão utilizadas dois tipos básicos de medições de grandezas: corrente elétrica no estator e fluxo magnético.

2.3.1. Corrente elétrica

A corrente elétrica, em um motor trifásico de indução pode ser medido facilmente por um alicate amperímetro. Este possui circuito em forma de espira que circunda o cabo onde circula a corrente a ser medida.

Pela Lei de Ampère (HALLIDAY, 1966), sabe-se que um condutor de corrente elétrica produz ao seu redor um campo magnético. Pela corrente do condutor ser do tipo alternada, o campo gerado também possui intensidade e direção variáveis. O campo magnético B produzido pelo condutor é definido conforme a eq. 12 abaixo:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi r} \quad (12)$$

Onde μ_0 é a constante de permeabilidade magnética, i é a corrente que passa pelo condutor e r é a distância radial em relação ao condutor.

Neste caso, o núcleo do amperímetro é induzido pelo campo do condutor pela Lei de Faraday (HALLIDAY, 1966), gerando uma diferença de potencial \mathcal{E} em seus terminais proporcional à corrente do condutor, conforme as eq. 13 e 14 abaixo. Esta DDP então é medida pelo circuito eletrônico do aparelho.

$$\mathcal{E} = -N \cdot \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

$$\Phi_B = B \cdot S \quad (14)$$

Onde Φ_B é o fluxo magnético, N é o número de espiras da bobina e S é a área interna formada por cada espira.

Figura 9 - Alicate amperímetro medindo corrente de um motor elétrico



Fonte: disponível em: http://youtube-downloader-mp3.com/watch-aula-sobre-multmetro-minipa-parte-1-de-2-id-vact_CEOBRs.html?similar

É importante salientar que este equipamento apenas pode medir a corrente de um único condutor por vez, pois o alicate apenas consegue medir a o campo resultante das corrente que circulam dentro de sua espira, o que gera problemas ao se medir vários condutores simultaneamente.

2.3.2. Fluxo magnético

Com um funcionamento baseado nos mesmos princípios do alicate amperímetro, as bobinas de fluxo são utilizadas para a medição de fluxo magnético, e são constituídas de uma ou mais espiras de material condutor. Novamente com base na Lei de Faraday (HALLIDAY, 1966), a bobina é posicionada de forma que seja atravessada pelo fluxo magnético a ser medido (LAMIN FILHO, 2003).

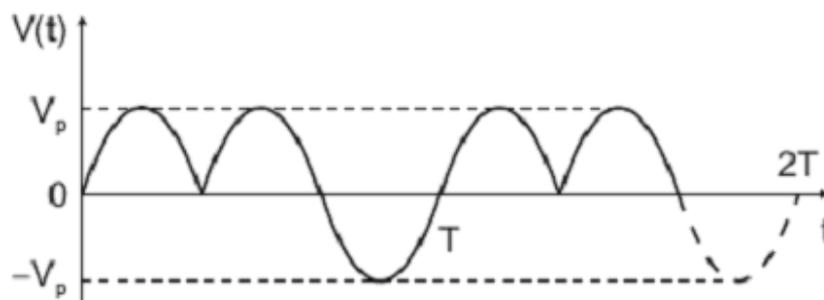
Assim como no alicate amperímetro, a variação de campo gera uma DDP nos terminais da bobina, que se torna o sinal de saída do transdutor de fluxo magnético, podendo ser conferido em diversos instrumentos de medição elétrica, como osciloscópios, analisadores de espectro, etc.

2.4. Análise de sinais

De acordo com Oppenheim (2010), sinais podem representar diversos fenômenos físicos, como sinais elétricos, vibrações mecânicas, transmissão de dados digitais, ondas eletromagnéticas, etc. Sinais podem ser classificados quanto a sua periodicidade como periódicos e não-periódicos, e em relação a sua continuidade como contínuos ou discretos.

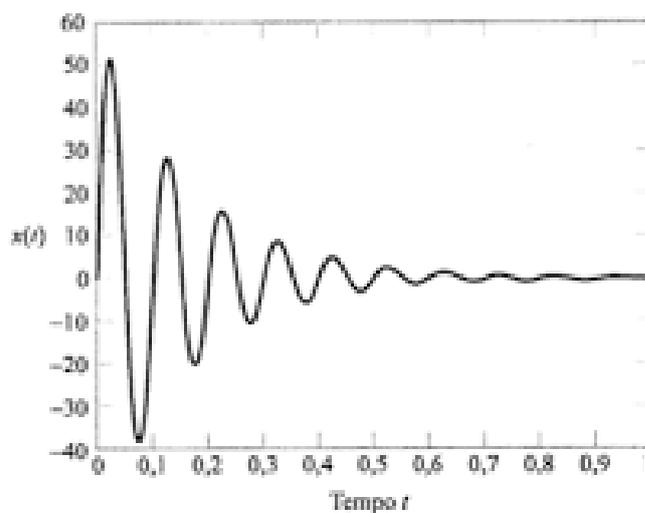
Sinais periódicos no tempo são aqueles que, para um período positivo T , se repetem, independente do deslocamento temporal t , enquanto os sinais não-periódicos são aqueles que não satisfazem esta condição (OPPENHEIM, 2010).

Figura 10 - Exemplo de sinal contínuo periódico



Fonte: disponível em: <http://www.sabereletrico.com/concursos3/fig3.gif>

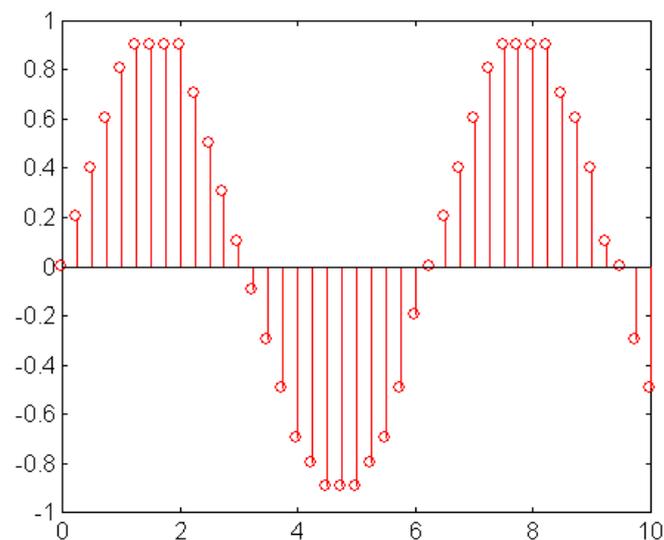
Figura 11 - Exemplo de sinal contínuo não-periódico



Fonte: disponível em: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRjWxl-11JQIOXDI_gQjV8s6QdyQAaqHT_idsB4HD3oZclQL3ld1A

De acordo com Lathi (2010) sinais contínuos são aqueles que podem ser representados para qualquer valor da variável independente, enquanto os sinais discretos apenas podem ser especificados em valores discretos da variável independente. As figuras 10 e 11 representam sinais contínuos, enquanto a figura 12 abaixo mostra um sinal discreto.

Figura 12 - Exemplo de sinal discreto



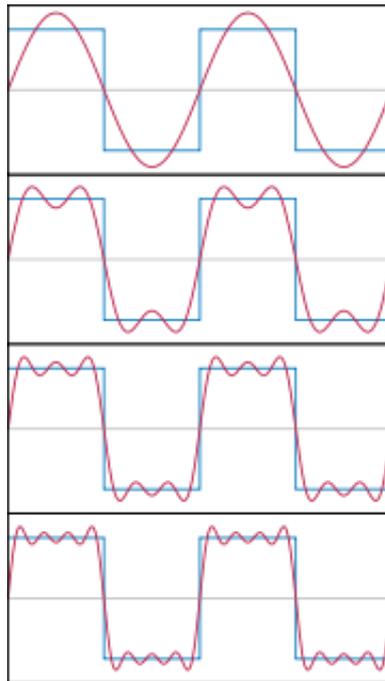
Fonte: disponível em: <http://www.eee.ufg.br/~leamos/Image8.gif>

Além da forma de classificação de sinais, também é importante conhecer as formas de análise de sinais, que serão discutidas na sequência deste trabalho, abordando as Séries e Transformadas de Fourier.

2.4.1. Série de Fourier

A Série de Fourier é utilizada para representar sinais contínuos quaisquer por uma soma de n harmônicas trigonométricas (senoideais e cossenoidais) no domínio do tempo (NEPOMUCENO, 1989). A figura 13 abaixo mostra um sinal representado por Série de Fourier, com diferentes quantidades de harmônicas.

Figura 13 - Representação gráfica por série de Fourier



Fonte: disponível em:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2c/Fourier_Series.svg/432px-Fourier_Series.svg.png

A representação matemática de uma Série de Fourier é feita através das equações abaixo:

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos\left(\frac{k\pi x}{L}\right) + b_k \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \right] \quad (15)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

$$a_0 = \frac{1}{2L} \int_0^{2L} f(x) dx \quad (17)$$

$$a_k = \frac{1}{L} \int_0^{2L} f(x) \cdot \cos\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx \quad (18)$$

$$b_k = \frac{1}{L} \int_0^{2L} f(x) \cdot \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx \quad (19)$$

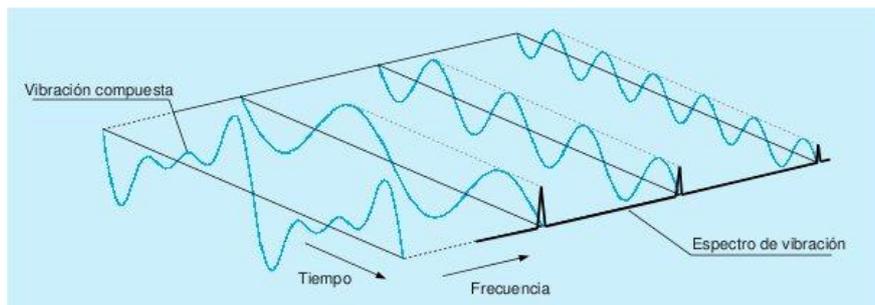
Onde k é a ordem da harmônica, L é metade do período T da função e a_k e b_k são as componentes de cada harmônica.

2.4.2. Transformada de Fourier

Assim como a Série de Fourier é utilizada para representar sinais no domínio do tempo, a Transformada de Fourier é responsável por representá-los no domínio da frequência. Esta tipo de transformada (para sinais periódicos) é definida por Oppenheim (2010, p. 171) como “um trem de impulsos no domínio da frequência com as áreas dos impulsos proporcionais aos coeficientes da série de Fourier”.

A figura 14 abaixo exemplifica, de forma simples, a transformação de um sinal periódico do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Figura 14 - Sinal representado no domínio da frequência



Fonte: disponível em: <http://www.sinais.es/images/Recursos/Curso%20vibraciones/fft.jpg>

Matematicamente, a Transformada de Fourier para sinais periódicos pode ser definida conforme as eq. 20 e eq. 21 abaixo:

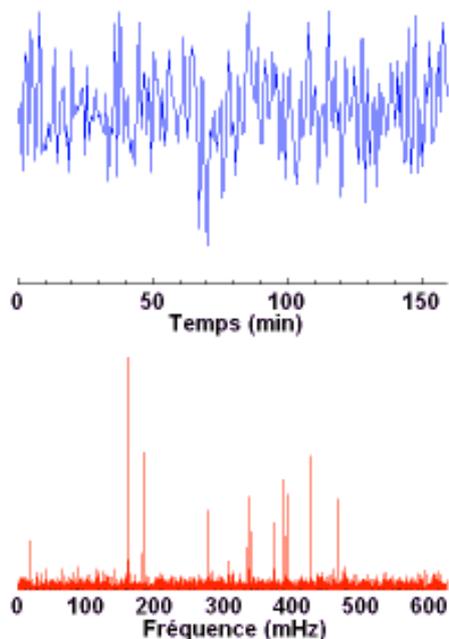
$$F(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} 2\pi a_k \delta(\omega - \omega_o) \quad (20)$$

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T} \quad (21)$$

Onde δ é o impulso, ω é a frequência (variável independente) e ω_o é a frequência natural do sinal.

A figura 15 abaixo mostra um exemplo de como se apresenta graficamente uma transformada de Fourier de um sinal contínuo qualquer.

Figura 15 - Sinal representado por Transformada de Fourier



Fonte: disponível em: https://media4.obspm.fr/public/VAU/images_page/tratar/tempfreq.png

2.5. Análise de corrente e fluxo magnético

A detecção de falhas e motores elétricos por análise de corrente e fluxo magnético já vem sendo estudada nos últimos anos por diversos autores, como Brito, Dias, Lamin Filho e Thakur.

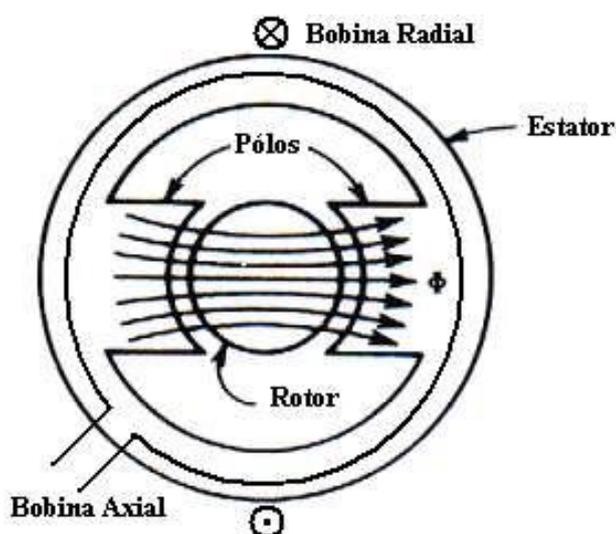
Tais estudos se baseiam na coleta de sinais de corrente elétrica de alimentação do motor, e o fluxo magnético gerado pelos campos girantes do motor. O tipo de detecção mais pesquisado é relativo à barras quebradas em motores como rotor do tipo gaiola, por (BRITO *et al*, 2004), (DIAS, 2006), (LAMIN FILHO, 2003) e (THAKUR, 2015), porém também foram estudadas outras fontes de falhas e defeitos, como desbalanceamento de tensão, subtensão, sobretensão, desbalanceamento mecânico e excentricidade do entreferro (LAMIN FILHO, 2003) e (THAKUR, 2015).

2.5.1. Instrumentação

Os instrumentos utilizados na coleta dos sinais de corrente e fluxo magnético são os mesmos ou similares aos estudados no item 2.3. São utilizadas ponteiras do tipo alicate nos condutores de alimentação dos motores (BRITO *et al*, 2004) e (LAMIN FILHO, 2003) para a medição de corrente.

Para a medição de fluxo magnético, Lamin Filho (2013) utilizou bobinas de fluxo, que foram posicionadas radial e axialmente em relação ao rotor do motor, conforme a figura 16 abaixo, além de uma bobina de fluxo comercial CSI, também instalada axialmente ao eixo do motor.

Figura 16 - Implementação das bobinas para medição de fluxo



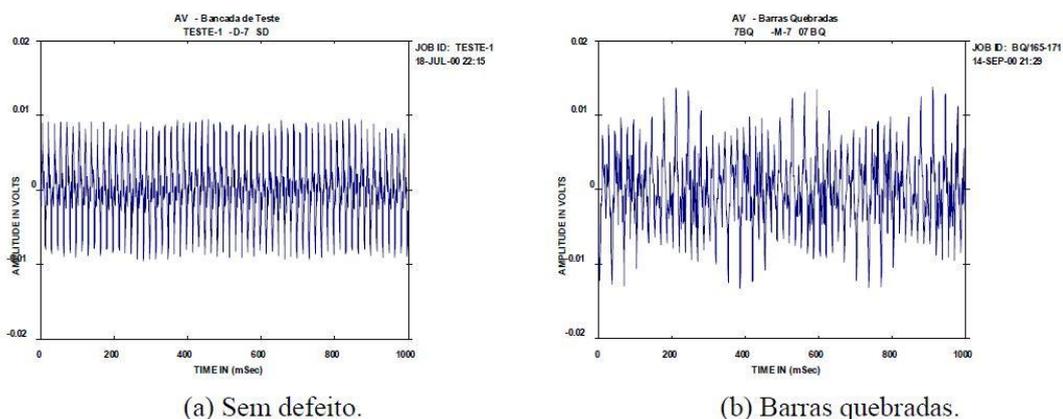
Fonte: (LAMIN FILHO, 2003).

Para monitorar os sinais obtidos nos sensores, tanto Brito *et al* (2004) e Lamin Filho (2003) utilizaram um analisador Ultraspec 8000 da CSI (*Computational Systems Incorporated*). Esses analisadores oferecem tanto a possibilidade de monitoramento portátil da condição dos motores, através de um aparelho com visor próprio, como também possibilita que seja conectado ao computador para transmitir dados em tempo real.

2.5.2. Forma de análise

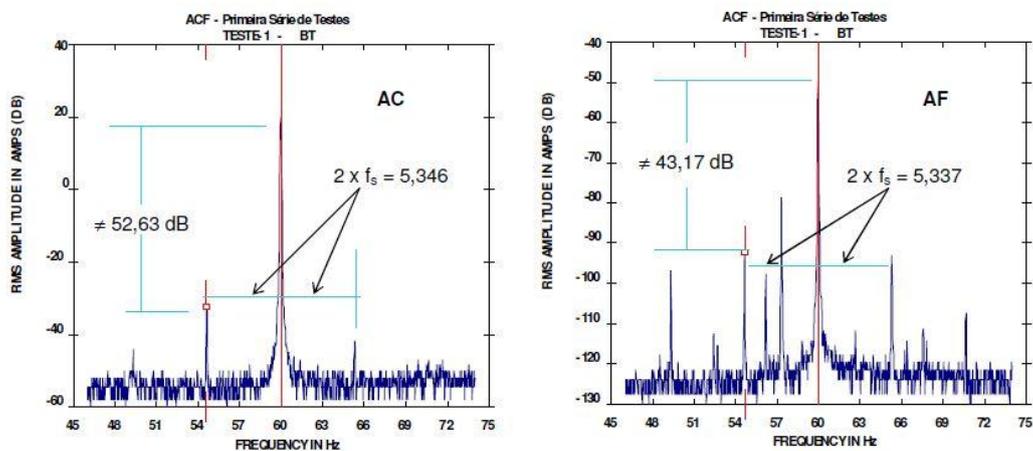
Uma vez que os instrumentos tenham sido instalados, é feita a coleta dos sinais de corrente e fluxo magnético do motor. A partir desse ponto, os coletores/analísadores dos sinais irão gerar gráficos no domínio do tempo e no domínio da frequência, através da FFT (*Fast Fourier Transformer* - Transformada Rápida de Fourier) (BRITO *et al*, 2004), (LAMIN FILHO, 2003) e (THAKUR, 2015), conforme as figuras 17 e 18 abaixo, tanto para sinais de corrente quanto de fluxo magnético.

Figura 17 - Fluxo magnético no tempo de um motor



Fonte: (Lamin Filho, 2003).

Figura 18 - Espectros de frequência de corrente e fluxo magnético



Fonte: (Brito *et al*, 2004).

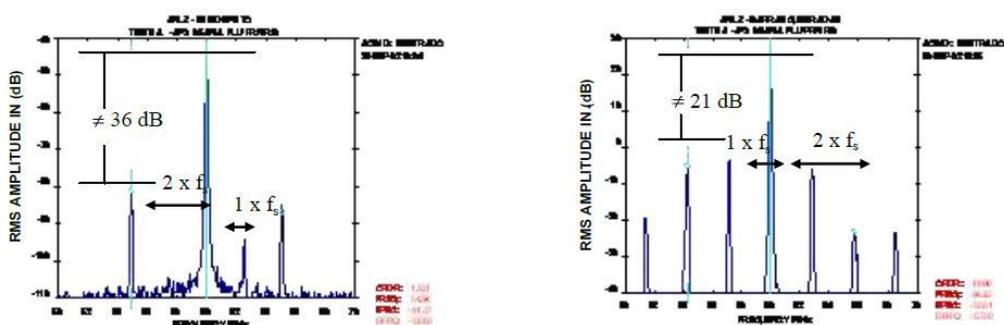
2.5.3. Diagnósticos de falhas

Com os espectro coletados e analisados, pode se chegar a diagnósticos quando à saúde do motor. Como visto nos capítulos anteriores, defeitos e falhas em motores elétricos tendem a variar sua corrente e fluxo de estator, gerando então harmônicas e distúrbios nas ondas destas grandezas. Com os sinais coletados, é possível identificar estas harmônicas e distúrbios e relacioná-los a falhas em potencial.

2.5.3.1. Barras quebradas

Para a detecção de barras quebradas, os autores utilizam como padrão a diferença entre as a frequência de rede (fundamental) f_l e as frequências laterais $f_l \pm 2f_s$, onde f_s é frequência de escorregamento do motor (BRITO *et al*, 2004), (LAMIN FILHO, 2003) e (THAKUR, 2015) . Lamin Filho (2003, p. 93) porém afirma que para as medições de fluxo magnético podem ser feitas utilizando as frequências de $f_l - 1f_s$, com o uso das bobinas de fluxo radial.

Figura 19 - Bandas de análise de barras quebradas



(a) Espectro de fluxo sem defeito.

(b) Espectro de fluxo com 7 barras quebradas.

Fonte: (Lamin Filho, 2003).

Para a interpretação do espectro de corrente, Brito *et al* (2004) e Lamin Filho (2003) se baseiam nas recomendações de fabricantes dos equipamentos de análise, como consta na tabela 2 abaixo, baseada na *Liberty Technologies Inc.* (LAMIN FILHO, 2003).

Tabela 2 - Severidade e recomendações para análise de corrente.

A (dB) <i>fl ± 2fs</i>	Avaliação da condição	Ação recomendada
> 50	Excelente	Nenhuma
44 a 50	Boa	Nenhuma
39 a 44	Moderada	Continuar inspeção e analisar somente tendências
35 a 39	Desenvolvendo trinca na barra do rotor ou juntas com alta resistência	Reduzir intervalo de inspeção e observar curva de tendência
30 a 35	Provavelmente duas barras trincadas ou quebradas, ou juntas de alta resistência	Fazer análise espectral de vibrações para confirmar a fonte do problema
25 a 30		Desmontar o rotor para inspeção
< 25		Desmontar ou substituir o rotor para inspeção

Fonte: Lamin Filho (2003).

2.5.3.2. Excentricidade de entreferro

Para a verificação da existência de excentricidades do entreferro, Thakur (2015) sugere que tais excentricidades geram distúrbios de frequência, que podem ser verificadas pela análise de corrente, e conseqüentemente, na análise de fluxo. Tais frequências tendem a se apresentar conforme a equação 22 abaixo.

$$f_{ec} = f_l \cdot \left[(R \pm 1) \cdot \left(1 - \frac{s}{p} \right) \pm nws \right] \quad (22)$$

Onde:

f_{ec} = componentes de frequência em função da excentricidade (Hz)

f_l = frequência de alimentação da rede (Hz)

R = quantidade de ranhuras no rotor

s = escorregamento

p = pares de polos

$nws = 1, 3, 5, 7, \dots$

2.5.3.3. Falhas mecânicas

Referente à detecção de falhas por influências mecânicas, como mal acoplamento do eixo do motor, problemas em mancais e rolamentos, e outros fatores que geram distúrbios dinâmicos no motor, Thakur (2015) sugere que podem ser verificadas harmônicas de frequência f_e na análise de corrente que podem representar tais distúrbios, conforme a equação 23 abaixo:

$$f_e = f_l \pm m f_r \quad (23)$$

Onde f_r frequência de giro do motor (Hz) e m é a ordem da harmônica (1,2,3,...).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão detalhadas as atividades a serem realizadas no decorrer deste trabalho, bem como os métodos de aplicação dessas atividades.

Como o trabalho se baseia no estudo e otimização das atividades de manutenção preditiva dos motores elétricos de uma indústria, primeiramente deve-se conhecer o processo de manutenção da empresa, conforme descrito no item 3.1, para então se fazer uma comparação com os estudos dos principais pesquisadores na área, de acordo com o item 3.2.

Tanto através da avaliação dos métodos da empresa quanto da sua comparação com os estudos, é previsto que sejam identificadas oportunidades de melhoria nos processos existentes, bem como a possibilidade de se implementar novas técnicas ainda não utilizadas, conforme detalhado nos itens 3.3. e 3.4.

Por fim, será feita a análise dos resultados obtidos e a conclusão do trabalho, conforme previsto no item 3.5.

3.1. Estudo e avaliação das técnicas empregadas

Primeiramente na aplicação deste trabalho, será feito o estudo dos procedimentos, técnicas e ferramentas que a empresa utiliza na realização da manutenção preditiva de seus motores trifásicos de indução. É previsto que a maioria destas informações estejam detalhadas em documentos oficiais da empresa, que definem as atividades e ferramentas a serem utilizadas. No caso de não haver registro formal de tais informações, se recorrerá aos responsáveis pelas atividades para se obter uma descrição que seja o mais detalhada possível dos procedimentos a serem estudados.

Esta primeira etapa se dividirá nas seguintes tarefas de identificar e conhecer: os equipamentos utilizados nas medições de manutenção preditiva; a forma de aquisição de dados através destes equipamentos; a avaliação dos planos de manutenção das máquinas.

3.1.1. Equipamentos utilizados nas medições

Seja por análise de documentos ou informado pelos responsáveis, serão identificados os equipamentos para a aquisição das assinaturas e sinais de fluxo e corrente dos motores elétricos. Estes equipamentos serão estudados e terão seus princípios de funcionamento e utilização detalhados no corpo do trabalho.

3.1.2. Procedimentos de medição

Uma vez que se conheça os equipamentos utilizados nas medições, serão estudados os procedimentos estabelecidos pela Engenharia de Manutenção da empresa para a aquisição precisa e segura dos dados necessários para análise de manutenção preditiva. Estas informações podem ser prospectados em documentos do tipo “Instrução de Trabalho” (IT) ou semelhantes.

3.1.3. Planos de manutenção

Os planos de manutenção já existentes serão avaliados para se conhecer como a Engenharia de Manutenção da empresa faz a gerência da manutenção preventiva e preditiva de seus motores de indução. Esta etapa será uma das mais importante, pois é bem provável que nela sejam encontrados a maioria das oportunidades de melhoria.

Os principais itens avaliados dos planos de manutenção serão:

- Quais os equipamentos contemplados pelas técnicas preditivas;
- Periodicidade de aplicação das medições e verificações;
- Tipos de medição e equipamentos aplicados em cada motor;
- Tempo previsto de realização das atividades;
- Recursos humanos envolvidos;

- Resultados esperados (ideais);
- Ações no caso de identificação de falha.

No caso de motores que não possuam planos de manutenção preditiva, mais especificamente que não possuam análise de assinatura de fluxo e corrente, será feito um levantamento dos motivos pelos quais não são contemplados pela técnica.

3.2. Comparação com outras técnicas

Após se ter estudado e ter ciência dos métodos utilizados pela empresa, será feita então a comparação com os métodos utilizados pelos principais autores e pesquisadores (BRITO, LAMIN FILHO, THAKUR, etc.) sobre o assunto de manutenção preditiva de motores por análise de corrente e fluxo magnético, que estão descritos no referencial teórico deste trabalho.

Esta comparação será de extrema importância para a detecção de melhorias na técnica de aquisição de dados, bem como a identificação de novas técnicas ainda não utilizadas pela Engenharia de Manutenção da empresa.

3.3. Oportunidades de melhoria

Com base nos estudos e comparações, será feita uma análise crítica de como se pode melhorar, de forma técnica e administrativa, os métodos utilizados e, dentre os motores que ainda não são contemplados com a análise de corrente e fluxo, quais poderiam ter tal técnica inclusa em seus planos de manutenção preditiva.

Obviamente, durante o desenvolvimento do trabalho, acredita-se que possam surgir outras ideias de melhorias, não apenas na técnica utilizada, mas a adoção de novas técnicas, que utilizem equipamentos diferentes, sempre seguindo sempre na linha de pensamento deste trabalho, que é análise de

espectro de frequência das assinaturas de corrente e fluxo magnético de motores trifásicos de indução.

3.3.1. Identificação de necessidades

Primeiramente, nesta etapa, será feito o levantamento junto com a empresa, de quais são os pontos que a mesma deseja que hajam melhorias, ou seja, o que a empresa gostaria de melhorar no presente, que é de seu conhecimento. Estas necessidades podem ser obtidas tanto através de consulta dos responsáveis pela manutenção dos equipamentos, quanto em demandas da alta gerência da empresa e/ou da manutenção, que incluem: redução de custos operacionais e de equipamentos; aumento da confiabilidade dos planos e procedimentos de manutenção preditiva; melhor organização dos documentos (planos, ITs, etc.); redução do tempo de realização das atividades de manutenção preditiva; etc.

Em sequência, será feita uma análise minuciosa, que visa a identificação de necessidades e oportunidades que possam não ter sido notadas pelos integrantes e gestores da empresa. Estas possíveis sugestões seriam comunicadas ao corpo de gestores e técnicos para avaliar em equipe a possibilidade de sua implementação.

3.4. Implementação das melhorias

Uma vez que se tenha elencado quais as oportunidades de melhoria, e dentre elas quais podem ser aplicadas, será feita a tentativa de sua implementação. Tais implementações terão como objetivo provar a eficácia e eficiência das hipóteses de melhoria, oriundas do estudo.

Pelo fato deste trabalho estar sendo desenvolvido dentro de uma empresa, nem todas as sugestões podem vir a ser implementadas, pois podem haver obstáculos não previstos no decorrer da aplicação do trabalho, como por exemplo: falta de tempo hábil para a realização das tarefas; falta ou

indisponibilidade momentânea de mão-de-obra especializada e autorizada para realização das atividades; falhas técnicas de equipamentos, softwares e sistemas; indisponibilidade dos motores para análise; ou a não aceitação das sugestões pela diretoria da empresa.

3.5. Resultados e conclusão

Com a implementação adequada das sugestões, serão coletados os resultados, que podem se apresentar como: melhora da aquisição de dados das medições; redução de custos operacionais, administrativos e de recursos humanos de manutenção; maior confiabilidade nas medições; identificação de novas falhas não identificáveis na técnica anteriormente utilizada; utilização de equipamentos mais simples e/ou baratos; etc.

Serão considerados resultados deste trabalho, além da avaliação dos dados coletados, outras sugestões identificadas na análise de necessidades, mesmo que não tenha sido possível a sua implementação dentro do período de desenvolvimento e aplicação deste trabalho, mas que possam ser aplicadas futuramente.

Por fim será feita a conclusão geral deste trabalho, onde se espera uma compreensão mais aprofundada sobre o assunto estudado, a percepção da aplicação prática das técnicas e as expectativas para novos trabalhos na área.

4. CRONOGRAMA

Tabela 3 - Cronograma de atividades

ATIVIDADE	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
Revisão teórica	X	X	X						
Elaboração textual	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Estudo e definição da metodologia		X	X	X	X				
Estudo das técnicas empregadas				X	X				
Comparação com a teoria					X	X			
Sugestão de melhorias						X	X		
Elaboração do plano de implementação							X	X	
Análise dos resultados								X	X
Conclusão									X

Fonte: tabela elaborada pelo autor.

5. DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO

Neste capítulo do trabalho, é relatada a aplicação da metodologia proposta no capítulo 3. Primeiramente foram estudados os procedimentos de manutenção preditiva utilizados na empresa: qual setor/equipe é responsável pela manutenção, quais os equipamentos utilizados, como são selecionados os motores a serem analisados, como é feita a análise, etc. A maioria destas informações foram obtidas através de questionamentos diretos com a equipe técnica da empresa, embora algumas informações mais específicas tenham sido obtidas por meio de documentos e sistemas de gerenciamento de informação da empresa.

A segunda etapa do desenvolvimento se deu através da sugestão de melhorias para os processos utilizados na empresa, bem como a elaboração de um plano de implementação das melhorias sugeridas.

5.1. Técnicas utilizadas pela empresa

A primeira parte da aplicação deste trabalho foi conhecer e estudar quais as técnicas e procedimentos, de engenharia e administrativos, utilizados pela empresa no que diz respeito à manutenção preditiva de motores elétricos. Além disso, foi importante conhecer a hierarquia e responsabilidades da equipe técnica de manutenção para posteriormente conseguir avaliar administrativamente a possibilidade de implementação das melhorias sugeridas, pois como este trabalho foi desenvolvido dentro de uma empresa de iniciativa privada, toda e qualquer atividade, divulgação de informação ou melhoria devem ser autorizadas pela gestão da empresa.

5.1.1. Equipe de manutenção

Como a empresa possui uma grande área fabril, com diversos equipamentos elétricos, eletrônicos e mecânicos, a mesma possui um setor

responsável apenas pela manutenção destes equipamentos, subdividido nas devidas especialidades técnicas.

Mesmo que os motores elétricos sejam máquinas elétricas, a especialidade de mecânica da manutenção da empresa possui um grande responsabilidade da manutenção desses equipamentos, no que diz respeito às rotinas de manutenção preventiva e preditiva dos motores, até mesmo pelo fato de que a maioria das falhas em motores elétricos sejam de origem mecânica, como rolamentos, lubrificação, desbalanceamento mecânico, etc. Porém isso não causou à exclusão da especialidade de elétrica no desenvolvimento deste trabalho, tornando o mesmo um desenvolvimento conjunto e multidisciplinar, de duas áreas técnicas diferentes mas complementares.

Como a empresa é de grande porte e possui unidades fabris separadas, existe certa autonomia administrativa em cada unidade. Em função disso, os procedimentos preditivos estudados neste trabalho são utilizados oficialmente em apenas uma das unidades, sendo que as equipes de manutenção das outras unidades não utilizam formalmente essas técnicas.

5.1.2. CSI 2130

O equipamento utilizado para realizar a coleta de informações dos motores é o coletor de dados Emerson “CSI 2130 Machinery Health Analyzer” de dois canais, certificado para áreas classificadas.

Figura 20 - CSI 2130 Machinery Health Analyzer



Fonte: (Emerson, 2012).

Este equipamento consegue coletar diversos parâmetros diferentes, entre eles vibração mecânica, temperatura, fluxo magnético e corrente. Ele é capaz de coletar os dados no domínio do tempo e gerar os espectros de frequência pela FFT (Transformada Rápida de Fourier), armazenar estes resultados internamente e fornecer um resultado prévio da análise. Os dados então podem ser transferidos para um software em um computador para realizar uma análise mais completa, com diagnósticos mais detalhados.

O CSI 2130 coleta o fluxo magnético utilizando uma bobina de fluxo posicionados na carcaça metálica do motor, enquanto a corrente é coletada com o auxílio de alicates ligados nos condutores de alimentação do motor, ou os condutores de saída dos transformadores de corrente (TCs) para medição.

Figura 21 - Bobina de fluxo do CSI 2130



Fonte: (Emerson, 2004).

Figura 22 - Alicates do CSI 2130



Fonte: (Emerson, 2012).

Para realizar a análise corretamente, os dados do motor devem estar cadastrados no CSI. Os dados são: potência e corrente nominais, tensão de alimentação, rotação nominal e rotação real. Com esses dados, o equipamento

se ajusta automaticamente para fazer as coletas e as análises da melhor forma possível.

5.1.3. Procedimentos de medição

A coleta de fluxo magnético é feita utilizando a bobina de fluxo, posicionando-a na tampa defletora do motor, axialmente ao eixo do motor. No caso de não ser possível posicionar a bobina axialmente, pode ser posicionada radialmente, e então deve ser informado ao equipamento que a coleta está sendo feita em posição radial. A bobina possui 3 ímãs que a deixam fixa na estrutura do motor. Uma vez posicionada a bobina, o equipamento é acionado e realiza 3 amostras, e esse procedimento dura cerca de 1 minuto. Normalmente, junto à coleta de fluxo também são feitas as medições de temperatura e vibração, utilizando também o CSI 2130.

A aquisição dos dados de corrente elétrica do motor, por outro lado, não é feita no local de instalação do motor. Como a medição de corrente deve ser feita nos condutores de alimentação do motor, e estes não são acessíveis no local de instalação do motor, essa coleta é feita então no painel elétrico de alimentação e controle do motor, também chamado de gaveta. A coleta é feita utilizando o alicate de corrente, que é colocado ao redor de cada condutor vivo do motor, referentes às fases R, S e T, um de cada vez, e então são feitas, assim como para o fluxo magnético, 3 amostras por fase, para gerar uma média mais precisa dos espectros. O operador do equipamento deve segurar o alicate no condutor enquanto a coleta é feita.

É importante salientar que toda e qualquer medição preditiva deste tipo, como fluxo magnético, corrente, vibração e termografia, devem ser feitos com o motor atuando com carga, ou seja, em operação normal, pois se ele estiver desligado ou funcionando a vazio, os dados coletados não serão corretos.

A coleta de fluxo magnético, falando-se de liberações administrativas e de segurança, é muito simples, e é feita pela equipe de técnicos mecânicos responsáveis pela atividade, que ao chegarem no local de instalação do motor,

comunicam os operadores de processo de que estarão fazendo a coleta de dados, e a coleta é feita sem mais procedimentos, considerando é claro que o técnico foi designado para fazer esta coleta.

Por outro lado, a coleta de corrente é um pouco mais complexa, uma vez que o técnico deve ser acompanhado de um eletricista ou técnico capacitado e autorizado na subestação, por ter que acessar partes energizadas dos equipamentos. A coleta de corrente possui um cuidado especial na sua liberação de execução, pois envolve uma equipe maior e mais liberações e autorizações, o que faz com que não seja feita com a mesma frequência com que é feita a coleta de fluxo magnético por exemplo.

5.1.4. Planos de manutenção

Os responsáveis pela manutenção preditiva dos motores da empresa foram consultados para se saber como é o processo de organização da manutenção dos motores, aos quais foram feitos os seguintes questionamentos: qual o critério de escolha dos motores que serão analisados e quais os fatores que influenciam na definição da periodicidade das coletas e como é feito o planejamento da periodicidade das coletas e análises.

Também foi estudado uma das análises mais recentes por assinatura de corrente e fluxo magnético, que ocorreu em na unidade que já utilizava essas técnicas, e que teve um resultado positivo quando a detecção de uma falha em um motor elétrico.

Os planos de manutenção dos motores da empresa são elaborados e disponibilizados no *software* de gestão SAP, cada equipamento possui uma lista de planos de manutenção, e cada plano possui seu objetivo, sua periodicidade e uma lista de operações específica. Cada operação, dentro de um plano de manutenção, possui tempo de realização e número de profissionais envolvidos. As figura 23 abaixo mostra a lista de planos de manutenção de um motor da empresa, e nesta lista está presente um plano de medição de fluxo magnético, que é detalhado na figura 24.

Figura 23 - Lista de planos de manutenção para um equipamento

Local de instalação	Descrição item de manutenção	Denominação do loc. instalação	A	Ciclo	Un. ciclo
RS01-SMC-201	Preventiva do motor SMC-201	DO COMPRESSOR DE CIRCULAÇÃO DO R201	A	180	DIA
	Preventiva do motor SMC-201	DO COMPRESSOR DE CIRCULAÇÃO DO R201	A	365	DIA
	LUBRIFICAÇÃO DO SMC-201	DO COMPRESSOR DE CIRCULAÇÃO DO R201	A	180	DIA
	M-Flux-Medir FluxMagn RS01-SMC201-90D	DO COMPRESSOR DE CIRCULAÇÃO DO R201	A	90	DIA

Fonte: *software* SAP.

Figura 24 - Plano de manutenção de fluxo magnético

Síntese geral de operações									
Oper	Sb...	Cen Trab	Cen.	Ctrl	Descrição operação	TxD	Trab.	Un.	Ex.
0010		RS01MP	RS01	PM01	COLETAR RPM	<input type="checkbox"/>	0,1	H	1
0020		RS01MP	RS01	PM01	VERIFICAR CARGA(AMPERAGEM NOMINAL/REAL)	<input type="checkbox"/>	0,1	H	1
0030		RS01MP	RS01	PM01	COLETAR FLUXO MAGNÉTICO COM AUX.BOBINA	<input type="checkbox"/>	0,3	H	1
0040		RS01MP	RS01	PM01	COLETAR TEMPERATURA COM AUX.PIRÔMETRO	<input type="checkbox"/>	0,1	H	1
0050		RS01MP	RS01	PM01	CLASSIFICAR CONDIÇÕES MOTOR(LIMPEZA)	<input type="checkbox"/>	0,1	H	1

Fonte: *software* SAP.

5.1.4.1. Critérios de seleção

Pelo fato da coleta e análise de fluxo magnético e corrente demande um tempo e atenção consideráveis da equipe de manutenção, não são todos os motores que recebem este tipo de análise preditiva. Basicamente os critérios de seleção dos motores a serem analisados são dois: sua classificação de criticidade e a sua tensão nominal de alimentação.

A empresa utiliza um sistema de classificação de equipamentos quanto a criticidade, que pode classifica-los como A, B, C, D ou E, sendo que os itens A são os mais críticos e devem receber sempre maior atenção, enquanto itens E são os menos críticos. Esta classificação é feita através de um cálculo que leva em conta fatores como: a falha do equipamento causa riscos à segurança de pessoas e processo; qual o custo que a falha do equipamento gera para empresa; se o equipamento é de fácil reparo ou reposição; etc. Então para o

caso da seleção dos motores a serem analisados, foi arbitrado que motores com criticidade A seriam contemplados com análise de fluxo magnético e corrente.

Motores que possuam altas tensões de alimentação, entre 1000V e 13800V no caso da empresa, possuem maior atenção na sua manutenção, especialmente pelo seu porte e custo, sendo que reparos, intervenções, desmontagens, etc., são complexas e onerosas para a empresa. Motores de alta tensão que não possuam itens de reposição no estoque (e mesmo que não sejam de criticidade A) também são monitorados pelas técnicas de fluxo e corrente.

5.1.4.2. Periodicidade

As coletas de fluxo magnético ocorrem a cada três meses para cada motor cadastrado. As coletas de vibração e termografia, por exemplo, ocorrem mensalmente, pois sabe-se que a maioria dos problemas em motores elétricos são de origem mecânica, muitas vezes sendo detectados por esses dois métodos. Como a longevidade das partes elétricas e magnéticas do motor é maior que a das partes mecânicas, as coletas de fluxo magnético são menos frequentes.

As coletas de corrente não são programadas para ocorrer de forma periódica. Esse tipo de coleta é feito quando um novo motor é instalado na planta, para captar suas características elétricas quando em funcionamento normal, para que o software de análise possa se calibrar e gerar uma referência para as próximas análises, que normalmente são feitas apenas com a coleta de fluxo magnético. A coleta de corrente também ocorre sob demanda em casos mais específicos em que um motor esteja sendo analisado de uma forma especial, onde seja necessária uma avaliação minuciosa, além do fluxo, vibração e temperatura, já que normalmente as conclusões oriundas das análises de fluxo magnético são normalmente suficientes para se encontrar o problema.

5.1.5. Análise dos dados coletados

A análise dos dados coletados ocorre em duas etapas. Primeiramente os espectros coletados pelo CSI são transferidos para o computador, que utiliza o software Motorview para fazer a análise. É importante que para cada motor que for analisado, que exista uma primeira coleta de corrente elétrica, feita quando o motor está novo e/ou com condições de funcionamento normais, sem falhas. Esta coleta inicial serve como uma referência para o software, que irá calibrar seus parâmetros para futuras análises, uma vez que cada motor possui características elétricas e magnéticas únicas, o que aqui é chamado de assinatura do motor. Desta forma, o software irá gerar um gráfico no domínio da frequência dos espectros de fluxo magnético coletados, já indicando quais as frequências características do motor, para facilitar a análise visual do gráfico.

A segunda etapa é a análise feita pelo avaliador. Este utiliza os gráficos gerados e as indicações do software para se basear em suas decisões. A primeira coisa a ser analisada são as bandas de frequência laterais à frequência fundamental do motor, neste caso 60 Hz. As bandas analisadas são basicamente aquelas localizadas em $fl \pm 1fs$, porém ocasionalmente podem ser analisadas outras bandas múltiplas da frequência de escorregamento, sendo então que a diferença de amplitude entre essas frequências laterais e a fundamental é avaliada conforme a tabela 2, mostrada anteriormente no subcapítulo 2.5.3.1.

Outros fatores analisados são: a simetria do espectro; a presença de amplitudes significativas em outras faixas de frequências que não as fundamentais, de escorregamento e harmônicas; e as próprias harmônicas e suas amplitudes. Essas análises se tornam mais qualitativas, levando em conta percepção do avaliador quanto a presença de anomalias, que podem levar a indicação da presença de alguma falha.

5.1.6. Caso de sucesso

Durante o desenvolvimento deste trabalho, ocorreu na empresa a investigação de possível falha em um motor elétrico da empresa. A situação era a de que havia desbalanceamento em um motor, visível a olho nu. O motor analisado, de código 12IEX202 (padrão da empresa), possui as seguintes características: motor trifásico de indução rotor tipo gaiola de esquilo, 8 polos (aproximadamente 900 rpm), 125cv de potência de saída no eixo, 440 Vca de tensão de alimentação, acionado por inversor de frequência.

Foi feita coleta de fluxo e corrente do motor, e os dados foram enviados para o computador, onde o software de análise fez as seguintes análises, demonstradas nas imagens abaixo, onde estão indicados os pontos críticos analisados. Não foi possível a inclusão do gráfico dos espectros pela baixa qualidade das imagens fornecidas.

Figura 25 - Picos do espectro de fluxo magnético axial do 12IEX202

```

Equipment:      (PE6;) 12IEX202
Meas. Point:    12IE202  -FC1  --> Flux - Axial - Center
Date/Time:      27-mai-16  16:40:42  RPM= 836.  Units=Flux AU dB
  
```

PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE	PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE
1	30.87	-32.2	2.216	13	58.03	-54.8	4.164
2	35.53	-56.4	2.550	14	58.34	-52.8	4.187
3	37.52	-51.1	2.693	15	59.20	-41.2	4.248
4	41.27	-9.0	2.961	16	60.02	-29.9	4.307
5	47.01	-55.1	3.374	17	60.85	-41.3	4.367
6	47.48	-56.3	3.407	18	61.70	-54.9	4.428
7	51.45	-48.2	3.693	19	62.49	-51.2	4.485
8	51.56	-51.1	3.700	20	63.38	-56.0	4.548
9	54.98	-55.6	3.945	21	65.76	-55.9	4.719
10	55.91	-55.7	4.012	22	72.25	-54.5	5.185
11	56.65	-54.7	4.066	23	78.78	-51.8	5.653
12	57.55	-51.4	4.130	24	82.53	-19.2	5.923

Fonte: *software* Motorview.

Figura 26 - Picos do espectro de corrente da fase A do 12IEX202

Equipment: (PE6;) 12IEX202
 Meas. Point: 12IE202 -RB1 --> Current (Rotor Bar Ana.) Phase A
 Date/Time: 27-mai-16 16:34:28 RPM= 885. Units=Amps dB

PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE	PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE
1	16.77	54.4	1.136	13	35.64	54.6	2.416
2	18.73	61.1	1.270	14	37.46	64.3	2.539
3	33.91	54.7	2.299	15	41.27	111.1	2.797
4	34.14	54.4	2.314	16	47.19	54.8	3.198
5	34.61	55.3	2.346	17	47.51	56.4	3.220
6	34.71	56.4	2.353	18	47.62	54.5	3.227
7	34.81	57.7	2.359	19	47.73	56.5	3.235
8	34.91	55.4	2.366	20	47.83	56.1	3.242
9	35.01	57.2	2.373	21	58.04	57.7	3.934
10	35.16	54.8	2.383	22	59.99	60.0	4.066
11	35.34	55.6	2.395	23	63.80	55.3	4.325
12	35.44	55.3	2.402	24	78.72	67.0	5.335

TOTAL MAG	SUBSYNCHRONOUS	SYNCHRONOUS	NONSYNCHRONOUS
111.1	0.0 / 0%	0.0 / 0%	111.1 /100%
(ELECTRICAL=	60.0 / 0%	FLOOR=	76.9)

Fonte: software Motorview.

Figura 27 - Picos do espectro de corrente da fase B do 12IEX202

Equipment: (PE6;) 12IEX202
 Meas. Point: 12IE202 -RB2 --> Current (Rotor Bar Ana.) Phase B
 Date/Time: 27-mai-16 16:34:56 RPM= 801. Units=Amps dB

PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE	PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE
1	3.73	54.7	.279	12	30.05	50.8	2.250
2	5.24	51.6	.392	13	35.47	61.6	2.656
3	9.12	50.7	.683	14	41.27	103.2	3.090
4	11.47	52.2	.859	15	46.82	60.1	3.506
5	13.28	48.4	.994	16	51.67	45.2	3.869
6	16.52	49.2	1.237	17	55.54	42.4	4.159
7	18.69	51.1	1.399	18	60.01	60.0	4.493
8	20.53	51.9	1.537	19	63.59	45.7	4.761
9	22.81	48.8	1.708	20	66.84	40.1	5.005
10	24.47	44.5	1.832	21	76.97	54.3	5.763
11	27.92	48.6	2.090	22	78.79	56.4	5.900

TOTAL MAG	SUBSYNCHRONOUS	SYNCHRONOUS	NONSYNCHRONOUS
103.2	58.6 / 0%	49.0 / 0%	103.2 /100%
(ELECTRICAL=	60.0 / 0%	FLOOR=	67.1)

Fonte: software Motorview.

Figura 28 - Picos do espectro de corrente da fase C do 12IEX202

Equipment: (PE6;) 12IEX202
 Meas. Point: 12IE202 -RB3 --> Current (Rotor Bar Ana.) Phase C
 Date/Time: 27-mai-16 16:35:10 RPM= 831. Units=Amps dB

PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE	PEAK NO.	FREQUENCY (Hz)	PEAK VALUE	ORDER VALUE
1	3.68	45.3	.266	12	50.84	48.5	3.671
2	6.00	45.6	.433	13	53.17	49.7	3.839
3	9.98	43.9	.720	14	55.59	47.8	4.013
4	12.32	47.4	.890	15	60.09	60.0	4.339
5	16.41	46.6	1.185	16	62.00	47.0	4.477
6	20.46	49.4	1.477	17	66.83	47.0	4.826
7	25.22	48.7	1.821	18	70.75	46.5	5.109
8	29.23	49.8	2.110	19	73.97	45.7	5.341
9	34.91	62.2	2.521	20	75.65	45.6	5.462
10	41.26	102.8	2.979	21	78.78	50.0	5.688
11	47.58	58.7	3.435				

TOTAL MAG	SUBSYNCHRONOUS	SYNCHRONOUS	NONSYNCHRONOUS
102.8	51.8 / 0%	99.8 / 50%	99.8 / 50%
(ELECTRICAL=	60.0 / 0%	FLOOR=	65.5)

Fonte: *software* Motorview.

Observou-se, no espectro de fluxo magnético (fig.23), que existem picos nas frequências de 41,27 e 82,53 Hz, sendo a de 41,27 mais visível. Esses picos são observados no espectro pela diferença em relação à frequência fundamental, no caso aproximadamente 60 Hz. Estes valores estão muito afastados lateralmente da frequência fundamental para serem de origem do escorregamento normal do motor, se configurando então como uma anomalia. Neste caso, o software de análise gerou a indicação de que haveriam cerca de 20% das barras do motor quebradas.

Nos espectros de corrente (fig. 24, 25 e 26) também foram detectados picos em aproximadamente 41,27 Hz, o que confere com os dados dos fluxo magnético. Porém o valor médio de corrente em cada fase é diferente, sendo que na fase A, a magnitude total medida foi de 111,1, enquanto nas fases B e C esta magnitude foi mais baixa, nos valores de 103,2 e 102,8, respectivamente.

Com essas informações, o analisador preferiu não concluir no primeiro que o problema seria de barras quebradas, uma vez que um possível desbalanceamento de corrente foi detectado. Foi então averiguada a fonte de

energia e acionamento do motor, e foi constatado que o inversor de frequência que aciona o motor estava danificado, causando o desbalanceamento. O inversor de frequência foi então substituído, novas coletas foram feitas, e os resultados foram os esperados para uma situação de operação do motor sem falha, não sendo necessária então a intervenção no motor para averiguar a presença de barras quebradas.

5.2. Técnicas utilizadas vs. Técnicas estudadas

Após estudar e conhecer os processos utilizados pela equipe de manutenção da empresa, fez-se um levantamento dos pontos nos quais tais processos seguem as recomendações e procedimentos dos autores estudados. Também foram destacados os pontos de divergência entre os dois universos, o teórico e o prático.

Os pontos de comparação foram os seguintes: forma de coleta dos espectros, equipamentos e ferramentas utilizadas na coleta e análise, metodologia e parâmetros para a análise dos dados coletados, ações tomadas quanto aos resultados obtidos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos, bem como a discussão e considerações acerca dos mesmos. Resumidamente os principais resultados obtidos neste trabalho, seguindo os objetivos estipulados, foram: a comparação das técnicas da empresa com o que foi estudado na revisão teórica; a sugestão de melhorias com base no que foi estudado e a forma de implementação das melhorias sugeridas.

6.1.1. Comparação

Nos tópicos abaixo seguem os resultados da comparação entre as técnicas preditivas utilizadas pela empresa em relação às técnicas estudadas e desenvolvidas pelos autores do referencial teórico. A tabela 4 resume os pontos mais importantes da comparação.

6.1.1.1. Similaridades

Em primeiro lugar, observou-se que os equipamentos utilizados para a coleta dos dados de corrente e fluxo magnético eram praticamente os mesmos nos dois universos, tanto que na maioria dos casos foi citado o coletor da CSI, o mesmo fabricante utilizado pela empresa. Os transdutores de corrente e fluxo também são os mesmo, como já era esperado.

Outro aspecto importante, foi o fato dos analisadores da empresa focarem suas análises basicamente nos espectros de fluxo magnético, utilizando a análise por corrente em segundo plano, seguindo o que foi concluído por Lamin Filho (2003), que a o espectro de corrente, na análise de barras quebradas, possui uma sensibilidade menor do que a bobina de fluxo, o que pode ocasionar na não percepção de falhas no motor.

Uma vez que os analisadores buscam, através dos espectros de fluxo, encontrar basicamente a presença de barras quebradas, eles analisam os espectros nas bandas de $fl \pm 1fs$, que também é indicado por Lamin Filho (2003) como um método eficaz de detecção de barras quebradas, mesmo que usem a bobina na posição axial ao invés da radial. Eventualmente também são analisadas as bandas de $fl \pm 2fs$, também utilizadas pelos autores.

Após a análise em busca de barras quebradas, é utilizada também a mesma tabela de probabilidade de falhas versus diferença de amplitude, com as mesmas recomendações de ações corretivas/preventivas.

6.1.1.2. Divergências

Muito do que foi estudado, entretanto, não é seguido pela equipe da empresa. Primeiramente, a empresa não utiliza simultaneamente a coleta de fluxo e corrente elétrica, focando basicamente apenas a análise de fluxo, utilizando o espectro de corrente apenas como parâmetro de calibração do software de análise.

Thakur (2015) sugere a detecção de falhas mecânicas e excentricidades do entreferro, além das barras quebradas, porém os analisadores da empresa se focam apenas na detecção de barras quebradas e danos similares no rotor e parte interna do estator. Também é feita a análise do espectro de corrente quando há suspeita de desbalanceamento nas fases de alimentação do motor, o que mais comum de ocorre em motores acionados por inversor de frequência.

Outro ponto de extrema importância, que não é comentado pelos autores, mas que é feito pela empresa, é o fato de que as análises preditivas nos motores não são feitas seguindo apenas um método de análise, no caso somente o espectro de fluxo magnético. A detecção de possíveis falhas é feita utilizando também a análise por vibração mecânica e termografia, que na verdade são os dois métodos mais utilizados para a detecção de falhas, uma vez que a maioria das falhas e defeitos em motores elétricos são de origem, sendo mais facilmente detectados através destas grandezas.

Tabela 4 - Comparação das técnicas utilizadas vs. estudadas

SIMILARIDADES	DIVERGÊNCIAS
Mesmo equipamentos utilizados	Empresa foca em fluxo magnético
Mesmas formas de coleta	Ponto único de coleta de fluxo
Foco em barras quebradas	Paralelo à análise de vibração mecânica e termografia
Mesmas faixas de frequência analisadas	Não avaliam falhas mecânicas e excentricidade de entreferro
Tabela de recomendações	Pouco determinístico

Fonte: tabela elaborada pelo autor.

6.2. Sugestões de melhoria

Após o estudo e comparação das técnicas e procedimentos, fez-se sugestões de melhoria para os processos utilizados pela empresa. Referentes à técnica de coleta e análise de espectro, não houveram muitas divergências em relação às técnicas estudadas pelos principais autores e pesquisadores do assunto, sendo que a maioria das propostas de melhoria se deram em relação ao procedimentos e planos de manutenção dos motores da empresa. Também foi propôs-se a expansão dos processos para as outras unidades da empresa, o que levou a apresentação das técnicas para as equipes de manutenção de cada unidade.

6.2.1. Coleta e análise

Quanto a sugestões de melhoria nos métodos de coleta e análise utilizados, não foram identificadas grandes oportunidades de melhoria, uma vez que os procedimentos utilizados na empresa são muito similares aos procedimentos e formas de análises estudadas. As possíveis melhorias a serem efetuadas seriam complementares ao que é feito.

Para a coleta de corrente, é recomendado que seja feita apenas na primeira análise, para ser ter um parâmetro de calibração do software de análise, ou em casos específicos onde a técnica é considerada necessária, como no caso do motor 12IEX202. No entanto, em relação à coleta de fluxo magnético,

recomenda-se que seja feita tanto a coleta axial, quanto a radial, para então se ter mais de um “ponto de vista” do fluxo do motor. É recomendado também que sejam feitas coletas antes e após intervenções em motores que possuam este tipo de análise em seu plano de manutenção, pois muitas vezes erros são inseridos nos motores durante intervenções, inspeções e até mesmo reparos. Esta também é uma forma de garantir de que o serviço de intervenção foi feito corretamente.

Em relação a análise dos dados coletados, não foi feita nenhuma recomendação, pois além da equipe dispor de um software completo para a atividade, boa parte da eficácia da análise depende da experiência e *know how* do analisador. Não sugeriu-se a análise direta de excentricidade de entreferro e falhas mecânicas, sugeridas por Thakur (2015) pois, é necessário o conhecimento do número de barras do rotor do motor, para excentricidade do entreferro, e porque falhas mecânicas são analisadas com as coletas de vibração mecânica, não sendo necessários os espectros de corrente e fluxo magnético para detectar tais falhas.

6.2.2. Apresentação para as equipes

Após constatado que seria interessante a tentativa de expansão das técnicas preditivas, elaborou-se uma apresentação em multimídia para ser exibida às equipes de manutenção elétrica e mecânica da empresa. Como a empresa possui três unidades, e que cada unidade possui sua própria equipe de manutenção, foram programadas mais de uma apresentação, para haver um nivelamento de conhecimento entre todas as equipes.

Esta apresentação é breve, e nela foram abordados os principais tópicos que seriam de interesse da equipe: o que é e qual é a finalidade da técnica de coleta e análise, quais suas vantagens e desvantagens, de que forma ela é utilizada dentro da empresa, e o que seria necessário para que todas as unidades e equipes abraçassem essa técnica. Desta forma, se torna mais provável a aceitação das técnicas pela equipe técnica e administrativa da empresa.

6.2.3. Novos motores analisados

Foi levantado o número de motores elétricos que a empresa e as suas unidades possuem, bem como a quantidade de motores em cada nível de criticidade, conforme a tabela 4 e figura 29 abaixo. Não foi possível fazer o levantamento de todos os motores de alta tensão da empresa, pela falta das informações técnicas específicas de cada equipamento no sistema SAP utilizado pela empresa. Porém, estima-se que a unidade 2 possua cerca de 200 motores de alta tensão, enquanto para a unidade 3 são previstos cerca de 100 motores.

Tabela 5 - Relação criticidade/quantidade dos motores da empresa

CRITICIDADE	UNIDADES				
	1	2	3	TOTAL	%
A	6	51	13	70	2,02
B	2	144	74	220	6,36
C	35	460	181	676	19,55
D	128	248	90	466	13,48
E	93	792	1092	1977	57,18
N/C	0	40	8	48	1,38

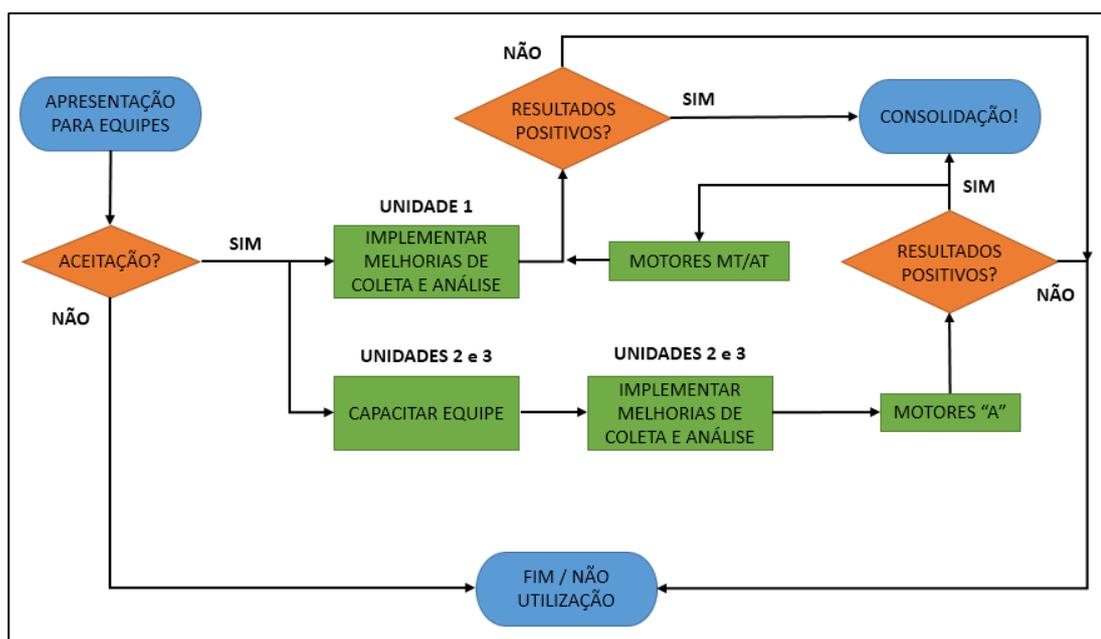
Fonte: tabela elaborada pelo autor.

Através deste levantamento, verificou-se que pela grande quantidade de motores da empresa, seria bastante complexo incluir um grande grupo de motores nos eventuais novos planos de manutenção que abrangessem as técnicas preditivas propostas, dada a grande demanda de mão de obra especializada, bem como tempo disponível para implementar as melhorias e realizar as coletas. Desta forma sugeriu-se que a implementação das técnicas e melhorias se dessem em etapas, sendo que inicialmente as sugestões seriam aplicadas apenas aos motores criticidade mais alta (A), que compõem cerca de 2% do parque de motores da empresa, tornando administrativamente viável a implementação. Caso haja sucesso na implementação, será feita a mesma tentativa de implementação, desta vez para os motores de alta tensão da empresa.

6.2.4. Plano de implementação

Após o levantamento das melhorias a serem sugeridas, elaborou-se um plano de implementação das mesmas, que está explicado em forma de fluxograma na figura 29 abaixo.

Figura 29 - Fluxograma de implementação das sugestões de melhoria



Não foram estipulados prazos e datas neste plano, pois a implementação depende de decisões das equipes de engenharia e planejamento de manutenção da empresa, de acordo com a disponibilidade de recursos, equipamentos e mão de obra. Desta forma, a implementação e coleta de resultados das melhorias sugeridas seriam atividades para trabalhos futuros, que podem vir a se originar deste trabalho.

A implementação das melhorias sugeridas durante o desenvolvimento do trabalho acabou não se tornando possível pela dificuldade que se teve de se obter apoio da equipe técnica. Como os técnicos de manutenção possuem demandas em diversas tarefas, não havia mão de obra destinada exclusivamente para as rotinas preditivas. Desta forma, a gerência dos recursos

de manutenção priorizou a alocação dos técnicos em demandas fixas do escopo atual de manutenção da empresa, em paradas, manutenção preventiva, reparos, etc.

É importante salientar que caso forem implementadas as melhorias sugeridas, o levantamento de resultados se dará de forma lenta, pois a frequência com a qual ocorrem falhas em motores elétricos, especialmente falhas de origem elétrica e eletromagnética, é baixa, dado ao alto MTBF de motores elétricos, que em alguns casos é dado em anos.

Porém como a técnica é de fácil aplicação, e a empresa possui os equipamentos necessários e equipe capacitada, não sendo então obrigada a fazer grandes investimentos, se torna válida a tentativa de implementar as melhorias e técnicas propostas, pois podem vir a trazer resultados significativos para as equipes de manutenção da empresa.

7. CONCLUSÃO

Em primeiro lugar, a realização deste trabalho envolveu a aplicação de diversos assuntos estudados durante o curso de Engenharia Elétrica, bem como o intenso estudo de muitos outros assuntos os quais não foram abordados em sala de aula. Desta forma este trabalho, antes de mais nada, proporcionou um grande aprendizado técnico e científico.

No decorrer da análise e estudo das técnicas propostas pelo trabalho, notou-se que existe uma pequena divergência entre a realidade teórica e a prática do assunto abordado. As bibliografias principais sugerem métodos de cunho mais quantitativo e algumas vezes até determinístico, enquanto as aplicações práticas nem sempre se dão ao luxo de confiar em tal assertividade. Uma das causas dessas diferenças pode ser as condições nas quais os modelos teóricos são desenvolvidos, nos quais normalmente se dispõe de ambientes mais controlados e há um conhecimento maior das variáveis envolvidas. No entanto em aplicações mais práticas, especialmente na indústria, estão presentes diversos fatores, muitas vezes desconhecidos, que podem alterar as condições dos motores analisados, conseqüentemente gerando uma amostragem de dados complexa e com ruídos. Assim, muitas vezes os analisadores que utilizam esta técnica tendem a tirar suas conclusões com base em sua experiência prática e conhecimento dos motores analisados, claro que sempre consultando as principais referências, como manuais e indicações de fabricantes, a bibliografia acerca da técnica, etc.

Através deste trabalho também foi possível notar um aspecto que em alguns momentos dificulta a implementação e absorção de novas técnicas preditivas por parte das empresas. A inércia técnica e administrativa pode ser uma das principais barreiras para a decisão de utilizar novas técnicas e tecnologias, uma vez que se deva haver uma comprovação de viabilidade econômica e operacional do que se é proposto. E como existe uma relutância por parte dos gestores de investirem em novas aplicações, os quais lutam por reduções de custo, o processo de adoção e implementação de novas tecnologias industriais para manutenção pode vir a se tornar lento.

Por fim este trabalho mostrou a evolução das técnicas de análise preditiva de motores elétricos, que se mostram promissoras para a otimização de atividades de manutenção, que sempre tendem a migrar para técnicas totalmente preditivas, deixando para trás técnicas preventivas e se possível, as corretivas. Encontra-se aqui também uma grande oportunidade para novos trabalhos, que envolvam o estudo do comportamento dos sinais eletromagnéticos das máquinas elétricas quando sofrem danos e falhas, bem como técnicas de coleta e análise cada vez mais assertivas, contribuindo para a maior confiabilidade de processos de manutenção.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, Luis Antônio. *Fundamentos de instrumentação*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- BIM, Edson. *Máquinas elétricas e acionamentos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- BOLTON, W. *Instrumentação e controle*. Curitiba: Hemus, 2002.
- BRITO, J. N.; et al. *Detecção de barras quebradas em motores elétricos utilizando análise de corrente e fluxo magnético*. X Seminário de Brasileiro de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamento, 2004.
- DIAS, C. G. *Proposta de um novo método para detecção de barras rompidas em motores de indução com rotor em gaiola*. 2006. 204f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- EMERSON PROCESS MANAGEMENT. *Model 343 flux coil*. Product data sheet. 2004.
- EMERSON PROCESS MANAGEMENT. *CSI 2130 machinery health analyzer*. Product data sheet. 2012.
- FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. *Física: parte II*. Rio de Janeiro: LT, 1966.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. *Manutenção: função estratégica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- LAMIM FILHO, P. C. M., BRITO, J. N. PEDERIVA, R. *Acompanhamento preditivo de motores de indução trifásicos através da análise de fluxo magnético*. 2003. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- LAMIM FILHO, P. C. M. *Monitoramento permanente de motores de indução trifásicos*. 2007. 148p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- LATHI, B. P. *Signal processing and linear systems*. Carmichael: Berkeley-Cambridge, 1998.
- MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- NASCIMENTO, F. E. C.; DIAS, A. W.; VIEIRA, D. V. *Instrumento virtual de detecção e diagnóstico de barras quebradas em motores elétricos de indução baseado em análise espectral da corrente do estator*. 2013. 77p. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Eletrotécnica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2013.

NASCIMENTO JUNIOR, Geraldo Carvalho. *Máquinas elétricas: teoria e ensaios*. 4. ed. São Paulo: Érica Ltda., 2011.

NEPOMUCENO, L. X. (Org.). *Técnicas de manutenção preditiva*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1989.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. *Processamento em tempo discreto de sinais*. 3. ed. São Paulo, Pearson Education do Brasil, 2012.

OPPENHEIM, Alan V.; WILLISKY, Alan S. *Sinais e sistemas*. 2. ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2010.

PEREIRA, Mário Jorge. *Engenharia de manutenção: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2011.

PITOLI, Marcos Henrique. *Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas em motores de indução trifásicos através da técnica da análise da assinatura elétrica*. 2013. 144 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

RAO, Singiersu S. *Vibrações mecânicas*. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

ROSA, Wener Eugenio; SILVA, Antonio Manoel Batista. *Detecção de falhas em motores elétricos via análise de corrente e fluxo magnético*. Universidade de Uberaba.

SPAMER, Fernanda Rosa. *Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas*. 2009. 254 f. Projeto (Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

TAKAHASHI, Yoshikazu; OSADA, Takashi. *TPM/MPT: manutenção produtiva total*. 2. ed. São Paulo: Instituto IMAM, 2000.

THAKUR, Aika; WADHWANI, Dr. S.; WADHWANI, Dr. A. K. *Motor current signature analysis as a tool for induction machine fault diagnosis*. International Journal of Computer Science and Information Technology Research: 2015. Disponível em: <www.researchpublish.com>. Acesso em: 11 abr. 2016.

UMANS, Stephen D. *Máquinas elétricas: de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WEG Equipamentos Elétricos S.A.: *Especificação de motores elétricos*. Jaraguá do Sul: 2015.