

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
JÉSSICA MARIANA RIBEIRO**

**ANÁLISE DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICA, ATRAVÉS DO
MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, UTILIZANDO
CONTROLE POR LÓGICA *FUZZY*.**

Varginha

2016

JÉSSICA MARIANA RIBEIRO

**ANÁLISE DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICA, ATRAVÉS DO
MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, UTILIZANDO
CONTROLE POR LÓGICA *FUZZY*.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel, sob orientação do Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni e Coorientação do Prof. Dr. Vinicius M. Pacheco.

Varginha

2016

JÉSSICA MARIANA RIBEIRO

**ANÁLISE DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICA, ATRAVÉS DO
MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, UTILIZANDO
CONTROLE POR LÓGICA *FUZZY*.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel, pela aprovação da Banca Examinadora:

Aprovado em / /

OBS.:

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso à minha família, que sempre foi fundamental para que conseguisse chegar até aqui, me apoiando, me ensinando. Em especial à minha mãe Deise, que nunca desistiu, nem se cansou dos meus sonhos. Aos amigos, que sempre entenderam minha ausência nesta caminhada e que me perdoaram por isso. Ao meu amor, Everton, que me apoia em qualquer decisão e confiou também nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me deu total liberdade para seguir o caminho da sabedoria, juntamente com seus dons do Espírito Santo, não me deixou desistir, quando estava mais cansada, foi meu sustento para continuar.

Agradeço minha família, avós e avôs, tios e tias. Ao meu pai Gilberto que me motivou sempre à batalhar pelos meus interesses. Agradeço a minha mãe Deise que incansavelmente lutou para realizar meu sonho. Aos meus irmãos Jaciara e Gabriel, por me ensinarem a ter paciência e tranquilidade.

Agradeço ao meu noivo, Everton, por estar ao meu lado sempre, entendendo os momentos difíceis, compartilhando das minhas conquistas, sonhando o meu sonho.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

Henry Ford

RESUMO

Motores de indução tornaram-se extremamente eficientes em diversos processos industriais. Pensando nisso, observa-se a necessidade de maior atenção perante suas possíveis falhas, que podem ser estatóricas, rotóricas e mecânicas. Eles estão sujeitos a todo instante à um tipo de falha, sendo assim, as manutenções preditivas são extremamente essenciais para evitar tanto as perdas em processos produtivos, quanto em perdas financeiras. Esta pesquisa tem como objetivo comprovar a eficácia do controle dessas falhas por Lógica *Fuzzy*, que propõe a captação dessas falhas através de um ou mais métodos de detecção de falhas, contudo, para esta pesquisa será utilizado um método de detecção de falha específico, a Análise de Vibração. A Lógica *Fuzzy* proporciona isso através de implementação de regras em sua plataforma de trabalho, de modo a aproximar a análise da ferramenta como uma avaliação humana e real. Com esse novo método aplicado, será possível avaliar previamente os desgastes, ou possíveis falhas que o motor possa vir a ter. Isso será em tempo suficiente para que possa ser planejado reparos e substituições de peças, evitando perdas de tempo de produção, assim como de lucratividade empresarial. A aplicação será através de coletas de dados dos motores, assim como os dados de vibração para os mesmos, tanto em condições normais, quanto em condições de anomalias. Esses dados serão lançados no *Software* como entradas e saídas da Lógica *Fuzzy*, serão criadas regras e simuladas falhas para verificação da eficácia deste sistema de controle. Este trabalho levará a conclusão de que, tanto motores, quanto diversos outros equipamentos, devem explorar mais das manutenções preditivas, utilizando a Lógica *Fuzzy*, que é uma excelente ferramenta. Com isso terá uma redução de custos tanto em manutenção, peças de reposição, quanto em lucratividade do processo produtivo, isso tudo, com a aplicação da manutenção preditiva, controlada pela Lógica *Fuzzy*.

Palavras-chave: Motores. Falhas. Manutenções Preditivas. Lógica *Fuzzy*. Análise de Vibração. Regras.

ABSTRACT

Induction motors have become extremely effective in many industrial processes. Thinking about it, there is the need for greater attention before its possible shortcomings, which can be stator, rotóricas and mechanical. They are subject at all times to a kind of failure, thus, predictive maintenance are extremely essential to avoid both losses in production processes, as financial losses. This research aims to prove the effectiveness of the control of these failures by Fuzzy Logic, which proposes to capture these failures through one or more fault detection methods, however, for this research will be used a specific fault detection method, Analysis Vibration. Fuzzy logic provides this by implementing rules in a work platform, so as to approximate the analysis tool such as a human and actual evaluation. With this new method applied, you can pre-assess the wear or possible faults that the engine is likely to have. This is sufficient time for it to be planned repairs and replacements of parts without loss of production time, as well as business profitability. The application is by the data collection engine, and vibration data for the same, both in normal conditions, as for malfunction conditions. These data will be released in the Software as inputs and outputs of the fuzzy logic, fault rules will be created and simulated to verify the effectiveness of this control system. This work will lead to the conclusion that both engines, as various other equipment, should explore more of the predictive maintenance using the Fuzzy Logic, which is an excellent tool. It will have a cost reduction both in maintenance, spare parts, as in profitability of the production process, all this with the application of predictive maintenance, controlled by Fuzzy Logic

Keywords: *Motors. Failures. Predictive Maintenance. Fuzzy Logic. Vibration Analysis. Rules.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Partes Constituintes do Motor de Indução.....	20
Figura 02 – Vista Explodida de um MIT.....	20
Figura 03 – Estator do Motor de Indução.....	21
Figura 04 – Rotor de Gaiola de Esquilo.....	21
Figura 05 – Rotor Bobinado.....	21
Figura 06 – Ondas retirados das Análises de Vibração.....	24
Figura 07 – Demonstração da onda no tempo.....	25
Figura 08 – Representação de Amplitude.....	25
Figura 09 – Representação de Fase.....	26
Figura 10 – Comparativo Lógica Clássica e Lógica Fuzzy.....	29
Figura 11 – Exemplo de aplicação de Lógica <i>Fuzzy</i>	29
Figura 12 – Funções de pertinência para a variável temperatura.....	30
Figura 13 – Plataforma Matlab [®]	32
Figura 14 – Ferramenta Fuzzy.....	33
Figura 15 – Entradas Criadas para Simulação.....	34
Figura 16 – Saídas com níveis de Alerta.....	35
Figura 17 – Editor de Regras.....	36
Figura 18 – Simulação em Operação (Entradas)	38
Figura 19 – Simulação em Operação (Saídas)	38
Figura 20 – Simulação 1.....	39
Figura 21 – Simulação 2.....	40
Figura 22 – Simulação 3.....	40
Figura 23 – Simulação 4.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Norma ISO 2372, para Balanceamento.....	27
Tabela 02 – Níveis de vibração para motores Classe 1 e 2.....	27
Tabela 03 – Níveis de frequências e suas falhas.....	34
Tabela 04 – Regras criadas na plataforma <i>Fuzzy</i>	36
Tabela 05 – Dados das Simulações.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 TIPOS DE MANUTENÇÃO	15
2.1 Manutenção corretiva	15
2.2 Manutenção corretiva programada.....	15
2.3 Manutenção preventiva	15
2.4 Manutenção preditiva	16
2.5 Manutenção detectiva	16
2.6 Engenharia de manutenção	16
2.7 Conclusões obtidas	17
3 MOTORES ELÉTRICOS.....	18
3.1 Motores de indução trifásico	18
3.2 Princípios de funcionamento	19
3.3 Aspectos construtivos	19
3.4 Tipos de falhas dos motores.....	21
4 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS	23
4.1 Análise de vibração	23
4.1.1 Grandezas físicas da vibração	25
4.1.2 Critérios de avaliação e condição.....	26
5 LÓGICA FUZZY	28
5.1 Variável linguística.....	30
5.2 Função de pertinência	30
6 METODOLOGIA: APLICAÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA FUZZY	32
6.1 Levantamento de dados	32
6.2 Simulação da lógica fuzzy.....	32
7 DESENVOLVIMENTO: PASSO A PASSO PARA OS RESULTADOS	34
8 RESULTADOS OBTIDOS	39
9 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Os processos industriais, cada vez mais competitivos e exigentes, admitem cada vez menos erros em seus procedimentos e execução de produção, para garantirem qualidade e quantidade de produto, afinal, cada falha gera uma parada de processo e cada parada de processo traz desconforto para o cliente, perda de dinheiro, dentre diversos outros fatores empresariais.

Tendo em vista as dificuldades, observa-se a necessidade de uma análise peculiar para os processos, ou parte deles, para que sejam previstas e evitadas as falhas, onde as mesmas serão corrigidas preditivamente após análise, ou seja, antes mesmo que a falha ocorra (SPAMER, 2009).

O segmento escolhido para pesquisa serão os motores de indução trifásico, que são muito utilizados em processos industriais e que também podem gerar quebras de linhas de produção, como em extrusoras, puxadores, compressores, entre outros equipamentos.

Para que a análise seja feita com eficácia, será utilizado como ferramenta de trabalho a Lógica *Fuzzy* que, basicamente, consiste em aplicação de entradas (vibração, temperatura, corrente, tensão), para obtenção de saídas, ou falhas, que no caso da pesquisa podem ser falhas no isolamento dos motores, falhas em rolamentos, falhas no alinhamento do eixo, ou ainda, falha no dimensionamento para aplicação do motor.

Segundo Pinheiro (2011), os motores de indução trifásicos podem ter diversos tipos de problemas, tais como:

- a) Erros de Projetos, onde o mesmo não se aplica para determinado trabalho, sendo ele sub ou super dimensionado;
- b) Materiais com Defeitos: os motores podem possuir parte de seus componentes comprometidos, danificados ou desgastados;
- c) Processamento e Fabricação deficiente: motores fabricados de forma errada, se tornando impróprio para utilização;
- d) Instalações Equivocadas: instalações dos motores feita sem alinhamento, em locais impróprios;
- e) Condições de Serviço: as condições sendo ruins, por exemplo em local com alta umidade, excesso de poeiras limalhas, coisas que comprometem a vida útil do motor;
- f) Manutenção Deficiente: tópico essencial, onde não é dada a devida atenção as manutenções de motores, aumentando assim o índice de falhas;
- g) Operação imprópria: maneira de utilizar os motores errada.

Diante de tantas classes de problemas, verifica-se a necessidade de redução dos mesmos, garantindo assim um melhor funcionamento do motor. Propõe-se então, para este trabalho, desenvolver uma lógica, dentro da Ferramenta *Fuzzy*, que consiga perceber, previamente os erros/falhas dos motores, para que os mesmos possam ser corrigidos em tempo hábil, de maneira que não implique com o processo produtivo.

Segundo Santos (2003), a lógica clássica possui uma fragilidade muito grande ao lidar com situações rodeadas de imprecisão, pois utiliza um conceito binário, em que só são aceitáveis dois valores, verdadeiro ou falso. Para lidar com isso de forma matemática, foi desenvolvida por Lot Zadeh, um professor de Engenharia e Ciência da Computação, a Lógica *Fuzzy*, uma lógica em que o enfoque em relação aos valores foi modificado. Nessa teoria, e permitido tratar matematicamente os níveis de incerteza e ambiguidade. A lógica difusa, como também é conhecida, vem tornando possível cada vez mais aproximar a máquina ao raciocínio humano. E propondo soluções cada vez mais realistas a problemas que antes só o cérebro humano era capaz de interpretar e resolver.

Diversos problemas que possuímos, inclusive nas indústrias, podem ser resolvidos com a lógica *Fuzzy*, principalmente se o problema em questão lidar com incertezas.

Os MIT's (Motores de Indução Trifásico) são extremamente importantes em processos industriais. Paradas inoportunas demandam custos elevados e tempo, o que se faz necessário a aplicação de Manutenções *Online*. Observa-se a necessidade da aplicação da Análise de Falhas em Motores, utilizando Lógica *Fuzzy* (TEODORO, 2007)

O tema proposto, promete reduzir o número de manutenções corretivas e assim, tornando mais eficiente as manutenções Preditivas. Com a aplicação da Lógica *Fuzzy*, também poderá ser feito um controle aprimorado de peças de reposição, já que o motor será monitorado preditivamente, não existe a necessidade de manter um estoque de sobressalentes, tendo em vista que sua falha será controlada, quando um rolamento, por exemplo, apresentar sinais de falhas, pode ser dado início ao processo de compra, dentro do tempo até a falha entrar em um sinal no limite máximo.

A metodologia é tópico essencial para desenvolvimento e desfecho deste trabalho. Abrange desde os fundamentos teóricos da pesquisa até os testes e avaliações simuladas via *software*, necessárias para tal propósito. Estão descritos abaixo alguns materiais para o embasamento teórico:

- a) Livros relacionados à motores elétricos;
- b) Livro relacionados à Lógica *Fuzzy*;
- c) Artigos relacionados ao tema proposto;

- d) Simulações das aplicações de *Fuzzy* já realizadas;
- e) Materiais necessários para a coleta de dados da Análise de Vibração;
- f) Software que contenha a Lógica *Fuzzy*, para simulação.

2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Para que seja trabalhado melhor a Análise de Falhas, primeiramente será visto os tipos de manutenções existentes, concluindo assim, onde melhor se aplica a Lógica *Fuzzy* em MIT's. São basicamente classificados como:

- a) Manutenção Corretiva;
- b) Manutenção Corretiva Programada;
- c) Manutenção Preventiva;
- d) Manutenção Preditiva;
- e) Manutenção Detectiva.

No topo de todos esses tipos de manutenção, se encontra a Engenharia de Manutenção, que gerencia e controla todas as manutenções, assim como sua equipe (SALMAZO, 2012). Todos esses itens exemplificados, serão detalhados em seguida.

2.1 Manutenção corretiva

A Manutenção Corretiva ocorre no exato momento em que a falha ocorre. Esse tipo de manutenção acarreta custos altos e, de modo geral, é um item que a Engenharia de Manutenção sempre tenta reduzir. Além de parar o processo produtivo, a manutenção corretiva sempre gera custos inesperados para a indústria. Não é possível prever, ou planejar este tipo de manutenção (SENAI, 2000).

2.2 Manutenção corretiva programada

Similar à manutenção corretiva, porém feita de forma organizada e planejada. Uma vez que a falha já foi detectada, porém ainda sim o equipamento continua em seu processo produtivo para que se planeje ferramentas, peças para reparo, entre outras coisas que sejam necessárias para intervenção no equipamento (MONTEIRO; SOUZA; ROSSI; 2010)

2.3 Manutenção preventiva

Trata-se de atuação realizada de maneira a reduzir/evitar a falha, ou ainda para aumentar o desempenho do equipamento, obedecendo a um plano de manutenção preventiva previamente elaborada, baseado em intervalos definidos de tempo, isso é, manutenção baseada no tempo

(MTBF x MTTR – Tempe Médio Entre Falhas x Tempo Médio de Reparo). Com as manutenções preventivas também é possível reduzir custos com *spare parts*, já que manutenções, como por exemplo Lubrificações, reduzirão as substituições de rolamentos, redutores, entre outros (GURSKI, 2002).

2.4 Manutenções preditivas

Também é conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É baseada na tentativa de definir o estado futuro de um equipamento ou sistema, por meio dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento. Esses dados coletados, por meio de medições em campo como temperatura, vibração, análise físico-química de óleos, ensaios por ultrassom, termografia, não permitem um diagnóstico preciso; portanto, trabalha-se no contexto de uma avaliação probabilística (ROSSI; SOUZA; MONTEIRO; 2010).

2.5 Manutenções detectivas

Manutenção Detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, de forma a detectar falhas ocultas ou não-perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.

Desse modo, tarefas executadas para verificar se um sistema de proteção ainda está funcionando representam a Manutenção Detectiva. Um exemplo simples e objetivo é o botão de teste de lâmpadas de sinalização e alarme em painéis (GURSKI, 2002).

2.6 Engenharia de manutenção

Cabe à Engenharia de Manutenção reduzir os índices de Manutenções Corretivas, analisando dados coletados na própria manutenção. Avaliar ações que possam ser tomadas para evitar falhas crônicas. Avaliar causa raiz das falhas, introduzir novas técnicas para melhoria de toda sistemática da Manutenção. Melhoria com resultados obtidos em manutenções Preventivas, Preditivas e Detectivas, visando sempre melhor eficiência dos equipamentos (GURSKI, 2002).

2.7 Conclusões obtidas

Para o trabalho de que será demonstrado – Análise de Falhas em Motores, Utilizando Lógica *Fuzzy* – a manutenção que se aplica ao mesmo é a Manutenção Preditiva. Isso se explica, pelo fato de que, como visto no conceito acima, será analisado dados de seu estado, assim como será verificado suas condições. Com base nisso será avaliado se é necessário, ou não, planejar uma intervenção no motor de indução.

3 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico tornou-se um dos mais notórios inventos do homem ao longo de seu desenvolvimento tecnológico. Máquina de construção simples, custo reduzido, versátil e não poluente, seus princípios de funcionamento, construção e seleção necessitam ser conhecidos para que ele desempenhe seu papel relevante no mundo de hoje (WEG, 2005).

Possui-se uma diversidade imensa de motores e para cada tipo é necessária análise de sua aplicação, para que seja dimensionado o melhor tipo de motor para determinado funcionamento. Segue abaixo uma breve listagem com os motores existentes (KOSOW, 2005):

- a) Motores de Indução: Alimentados por tensão CA monofásica ou trifásica, operam por indução. Podem ser síncronos, com velocidade igual à do campo girante, ou assíncronos.
- b) Motores de Corrente Contínua (CC): caracterizados por serem alimentado em tensão CC, pelo alto torque desenvolvido, além da facilidade e precisão no controle de velocidade.
- c) Motores Síncronos: alimentados em tensão CA, requerem excitação em tensão CC independente (externa) ou por excitatriz (interna). Podem ter o fator de potência controlado e operam em larga faixa de velocidade, porém com baixo torque de partida.
- d) Motores de Passo: sua principal característica é pelo controle preciso da rotação. Isso é possível devido os polos do estator serem energizados gradativamente. Como o rotor é projetado de forma dentada, assim que os polos são alimentados, o dente adjacente é atraído.
- e) Servo motores: apresentam precisão de rotação ainda mais fina. Geralmente são motores CC com controle de rotação em malha fechada.
- f) Motor Universal: aplicável somente em baixas potências, podendo ser CA ou CC.
- g) Motores Lineares: ao invés de produzirem torque (rotação), produzem força linear.

Para a pesquisa, os motores de indução trifásico serão vistos com maiores detalhes, onde também será feita a aplicação da Análise de Falhas, utilizando a Lógica *Fuzzy*.

3.1 Motores de indução trifásico

Segundo Reis (2010), um motor de indução pode ser representado através de um conjunto de equações diferenciais não lineares, utilizado devido ao efeito de acoplamento entre as fases do rotor e o estator, uma vez que depende da posição angular do rotor em relação ao estator. Este efeito torna os coeficientes das equações diferenciais variáveis.

Os motores de indução trifásicos são provavelmente hoje as máquinas rotativas mais importantes no setor industrial já que são amplamente utilizados nas mais variadas aplicações e estão presentes em praticamente todos os tipos de acionamentos.

O comportamento dinâmico é obtido baseado no conhecimento da estrutura construtiva do motor onde é possível representa-lo através de um conjunto equivalente, e conhecer os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos envolvidos (REIS, 2010).

Grandes vantagens de sua aplicação nos sistemas industriais são:

- a) Custo reduzido;
- b) Manutenções simplificadas e periodicidade alta;
- c) Baixa relação entre Peso x Potência;
- d) Inexistência de comutador, entre outros.

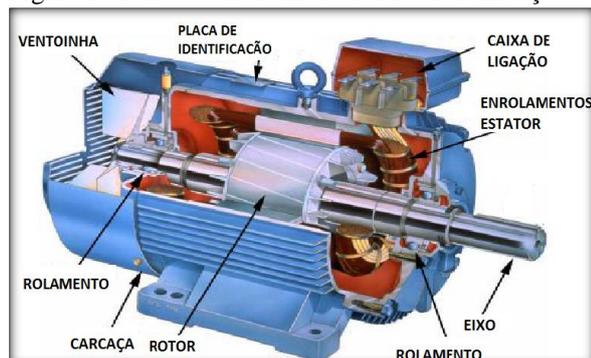
3.2 Princípio de funcionamento

Segundo Spamer (2009), o princípio de funcionamento acontece quando alimenta-se o estator e, imediatamente surge um campo magnético variável no tempo. Este, por sua vez, induz uma f.e.m. – força eletromotriz no rotor. Essa força induzida, gera uma corrente induzida que tende a opor-se à causa que lhe deu origem, que por sua vez gera um torque no rotor, que o coloca em movimento.

3.3 Aspectos construtivos

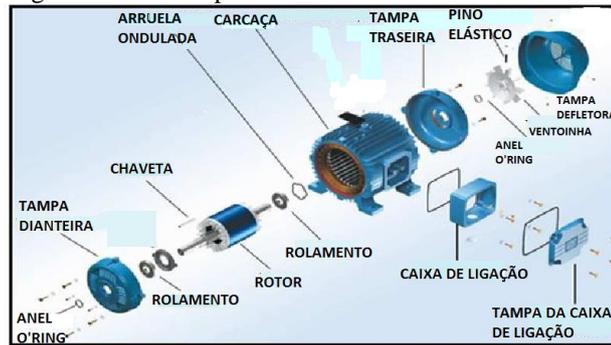
Os MIT's são basicamente constituídos por rotor e estator. A Figura 1, que mostra as partes constituintes em um MIT em corte. Já na Figura 2, a imagem está explodida, onde é possível observar os subitens dos MIT's (ÁGUAS, 2013).

Figura 1 - Partes Constituintes do Motor de Indução.



Fonte: ÁGUAS, 2013.

Figura 2 - Vista Explodida de um MIT.

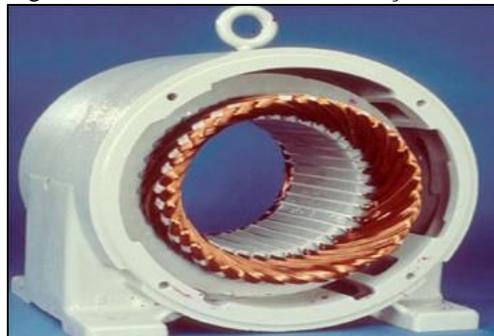


Fonte: ÁGUAS, 2013.

Segundo Águas (2013), define-se estator (ilustrado na Figura 3) como sendo a parte imóvel do motor, que possui os seguintes componentes:

- a) Carcaça;
- b) Caixa de ligação;
- c) Núcleo;
- d) Enrolamentos e
- e) Base.

Figura 3 - Estator do Motor de Indução

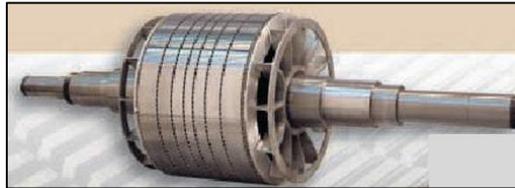


Fonte: AUGUSTO JUNIOR; AMORIM FILHO, 2011.

O rotor é a parte que se movimenta de forma rotativa, constituído basicamente por um núcleo magnético e enrolamentos curto-circuitados que permitem a circulação de correntes e pelo eixo (ÁGUAS, 2013).

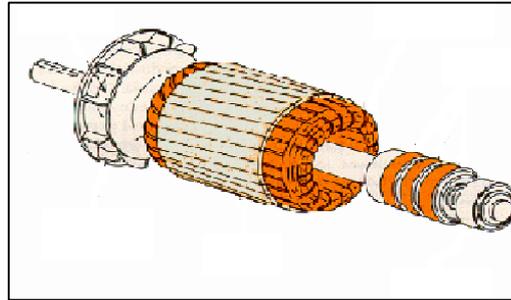
Os rotores podem ser tanto do tipo gaiola de esquilo, onde seus condutores são curto-circuitados em cada terminal, como na Figura 4. Ou ainda, podem ser do tipo rotor bobinado, onde os condutores de cobre são colocados nas diversas ranhuras, apresentado na Figura 5.

Figura 4 - Rotor de Gaiola de Esquilo



Fonte: AUGUSTO JUNIOR; AMORIM FILHO, 2011.

Figura 5 - Rotor Bobinado



Fonte: AUGUSTO JUNIOR; AMORIM FILHO, 2011.

3.4 Tipos de falhas dos motores

Segundo Bloch (1999), falha pode ser definida como qualquer mudança em uma parte ou em um componente da máquina a qual a deixa incapacitada para desempenhar sua função de modo satisfatório, levando a parte ou o componente à condição de inconfiável ou insegura, para continuar em uso.

Os MIT's são visivelmente robustos, porém ainda sim é susceptível a falhas, assim como todo e qualquer equipamento industrial. Suas falhas podem ser de origem mecânica ou elétrica.

É citado abaixo alguns tipos de falhas que podem ocorrer de origem elétrica nos motores de indução trifásico (PINHEIRO, 2011):

- a) Fechamento de curto-circuito entre espiras;
- b) Falha no isolamento dos enrolamentos;
- c) Barras rotóricas quebradas;
- d) Sobrecarga;
- e) Falha na fixação das conexões na caixa de ligação;
- f) Fuga de corrente para os mancais.

As falhas de origem mecânica em MIT, podem ser vistas abaixo:

- a) Rolamentos travados ou gastos;
- b) Folgas nas tampas;
- c) Desalinhamento;
- d) Falhas nos eixos, podendo estar empenados ou trincados;

- e) Desbalanceamentos mecânicos;
- f) Falha na fixação da base ou quebra da mesma;
- g) Folga da chaveta.

Em sumo, as falhas dos motores abrangem desde a operação até sobrecargas, desgastes naturais, vibração. Em sua maioria, se localizam nos estatores, rotores e rolamentos.

4 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS

Para garantir um bom funcionamento do motor, primeiramente é necessário que o mesmo proceda de uma excelente fabricação.

Detecção, diagnóstico e prognósticos rápidos permitem uma prevenção e uma manutenção programada, traduzindo-se num aumento de desempenho e confiabilidade e na redução de custo com manutenção corretiva. A detecção limita-se a encontrar ou não a falha via medições online, o diagnóstico, além disso, visa descobrir o tipo de falha e sua respectiva causa, e o prognóstico, vai mais além, estimando o tempo de vida útil da máquina que ainda resta (CHOW, 2000).

Diversas técnicas são utilizadas para detecção de falhas, tais como:

- a) Análise de Vibração;
- b) Monitoramento por emissão acústica;
- c) Monitoramento por campo magnético;
- d) Análise termográfica;
- e) Monitoramento por pulso de choque;
- f) Monitoramento de flutuação de velocidade;
- g) Monitoramento da assinatura elétrica;
- h) Monitoramento de emissão de rádio frequência;
- i) Análise Química.

A seguir será feito o detalhamento da técnica de detecção de falha Análise de Vibração, que vão auxiliar na aplicação da Lógica *Fuzzy* deste Trabalho.

4.1 Análise de vibração

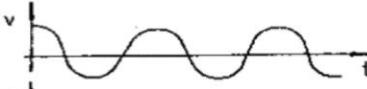
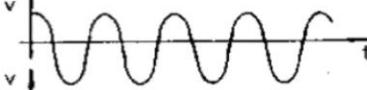
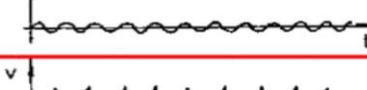
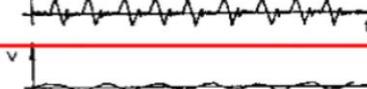
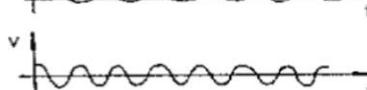
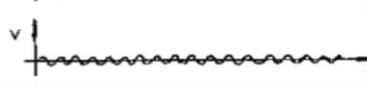
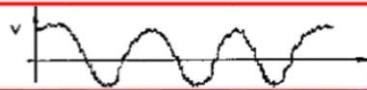
A ferramenta utilizada para as simulações é a Análise de Vibração, tendo em vista este fator, veremos em maiores detalhes sua aplicabilidade e funcionamento. Essas análises auxiliam no prolongamento da vida útil dos equipamentos.

A Análise de Vibração é o processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento, são descobertas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas. Tais forças afetam o nível de vibração, que pode ser avaliado em pontos acessíveis das máquinas, sem interromper o funcionamento dos equipamentos (GATEC).

Para entendermos como é realizada a análise, necessitamos conhecer o que procede a Vibração. Segundo a definição de Andrade et al. (2009), vibração pode ser definida como um movimento de oscilação de um corpo em torno de um ponto de referência que se repete regular ou irregularmente, após um intervalo de tempo. Sua presença pode indicar algum tipo de problema no sistema, como falta de balanceamento das partes rotativas, rolamentos e polias, desalinhamento, interferências, erosão localizada, ressonância, entre outros (OLIVEIRA, 2013).

Para cada tipo/maneira em que se obtém a curva de vibração, obtém-se diagnóstico das falhas para que possam ser atacadas, conforme mostrado na Figura 6. É possível observar na figura, a variação na curva que representa falha no rolamento, sendo assim, subentende-se a necessidade de substituição do rolamento. Também são avaliados os coeficientes Nível de Velocidade (rms) e frequência. A partir desses dados em comparação com um motor saudável é que se conclui a falha ou não do equipamento.

Figura 6 - Ondas retirados das Análises de Vibração.

CAUSA	PARÂMETRO X TEMPO	NÍVEL DE VELOCIDADE (RMS)	FREQUÊNCIA
Desbalanc. do conj. motor		3,00 mm/s	1750 rpm (29,17 Hz)
Desbalanc. do conj. rotor		12,00 mm/s	3500 rpm (58,33 Hz)
Aerodinâmico		1,20 mm/s	21000 rpm (350,00 Hz)
Rolamento		0,60 mm/s	96000 rpm (1600,00 Hz)
Correias		0,80 mm/s	900 rpm (15,00 Hz)
Chaveta folgada do rotor		2,70 mm/s	7000 rpm (116,67 Hz)
Elétrica do motor		0,35 mm/s	7200 rpm (120,00 Hz)
Poli-harmônica		15,20 mm/s	Nível Global

Fonte: GATEC, 2014.

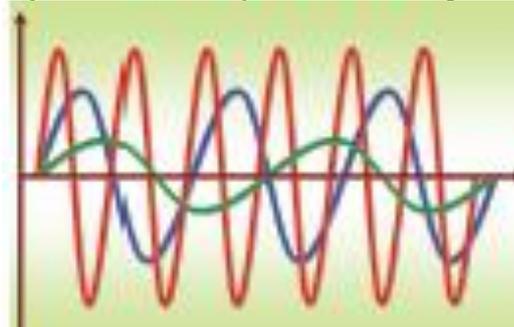
Os problemas detectados com a análise de vibração podem ser: folgas, defeitos ou desalinhamento de rolamentos ou mancais, desbalanceamento do rotor, entre outros.

4.1.1 Grandezas físicas da vibração

Segundo Spamer (2009), a vibração possui três grandezas físicas, que são:

- a) Frequência: é o número de ciclos que um evento acontece em um determinado período, medidos na unidade de Hz – Hertz (Figura 7).

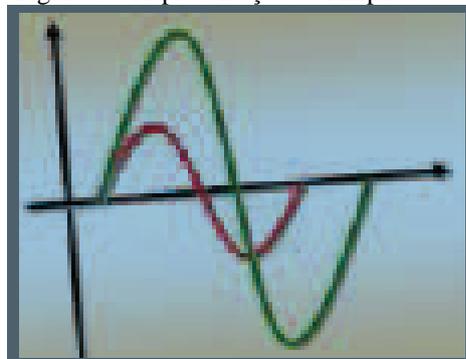
Figura 7 – Demonstração da onda no tempo



Fonte: SPAMER, 2009.

- b) Amplitude: é a intensidade que acontece um determinado evento mostrando a criticidade e a destrutividade dos eventos presentes (Figura 8).

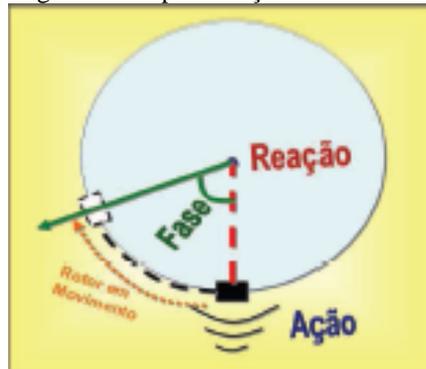
Figura 8 – Representação de Amplitude



Fonte: SPAMER, 2009.

- c) Fase: informa o ângulo em que o sinal se apresenta através da reação física da máquina ou componente (Figura 9).

Figura 9 – Representação de Fase



Fonte: SPAMER, 2009.

4.1.2 Critérios de avaliação de condição

Segundo Spamer (2009), para todos os pontos de medição, é registrado o nível global, que representa a composição de várias fontes de vibração. Estes níveis avaliados devem permanecer dentro de faixas admissíveis. A partir de uma tendência de evolução desses níveis de vibração, é feita uma análise de frequência para identificação da origem do problema.

Oliveira (2013), diz que a frequência é a razão de repetições de um evento periódico, podendo ser expressa em rotações por segundo (Hz), rotações por minuto (rpm), ciclos por segundo, ou ainda, múltiplos da velocidade de rotação (harmônicas), que comumente são referidas como sendo $1x$, $2x$, $3x$, ..., Nx , a frequência de rotação.

Qualquer tipo de anomalia em uma máquina rotativa, como fadiga, desalinhamento, desbalanceamento, instabilidade, desgaste, gera um tipo de vibração específica e característica, sendo que a vibração mais comum ocorre na frequência de rotação da máquina, onde geralmente encontra-se os maiores valores de amplitude para medidas de velocidade e deslocamento (OLIVEIRA, 2013).

Para que a análise seja realizada de forma assertiva, a Norma ISO 2372, limitou os valores de velocidade de vibração em rms , para as diferentes classes de motores. Para cada limite, existe um nível de estado do motor, sendo eles de Nível A, para quando o motor estiver em condições normais de trabalho, Nível B, para os motores com um nível singular fora dos parâmetros normais de trabalho, Nível C, aos motores que já apresentam resultados da análise insatisfatório, com algum tipo de falha, e por último, Nível D, onde o motor não se encontra em condições de trabalho, sendo necessária intervenção imediata de manutenção. Isso poderá ser observado de forma mais detalhada nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Norma ISO 2372 para Balanceamento

NÍVEL	Classificação dos Equipamentos			
	CLASSE I Até 15 KW (20 CV).	CLASSE II 15 A 75 KW (20 - 100 CV)	CLASSE III Acima de 75 KW base rígida	CLASSE IV Acima de 75 KW base flexível
	VALOR RMS DA VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO (mm/s).			
A - Bom	Até 0,71	Até 1,12	Até 1,8	Até 2,8
B - Satisfatório	0,71 a 1,8	1,12 a 2,8	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1
C - Insatisfatório	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1	4,5 a 11,2	7,1 a 18,0
D - Inaceitável	Acima de 4,5	Acima de 7,1	Acima de 11,2	Acima de 18,0

Fonte: ISO 2372

Tabela 2 – Níveis de vibração para motores Classe 1 e 2

Velocidade da Vibração - mm/s	Classe I (Até 15kW)	Classe II (de 15 à 75kW)
0.28	A	A
0.45		
0.71	B	A
1.12		
1.8	C	B
2.8		
4.5	D	C
7.1		
11.2	D	D
18		
28		
45		

Fonte: 2372.

5 LÓGICA FUZZY

Os princípios de lógica *fuzzy* foram desenvolvidos primeiramente por Jan Lukasiewicz (1878-1956), que em 1920 desenvolveu e introduziu conjuntos com grau de pertinência que combinados aos conceitos da lógica clássica, desenvolvida por Aristóteles, deu embasamento suficiente para que na década de 60, Lofti Asker Zadeh, professor de Ciências da Computação da Universidade da Califórnia, chegasse a ser o primeiro autor de uma publicação sobre lógica *fuzzy*.

Zadeh observou que muitas regras presentes no cotidiano da população não podiam ser explicadas pelas pessoas que as usavam.

Inicialmente Zadeh foi criticado por vários cientistas e estudiosos da área da computação, porém logo sua ideia foi aceita nesse meio, sendo alvo de várias publicações que abordavam aplicações dos sistemas *fuzzy* (LUCAS; CHENCI; RIGNEL, 2011).

Segundo Masselli (2014), existem quatro diferentes formas para definirmos Lógica *Fuzzy*:

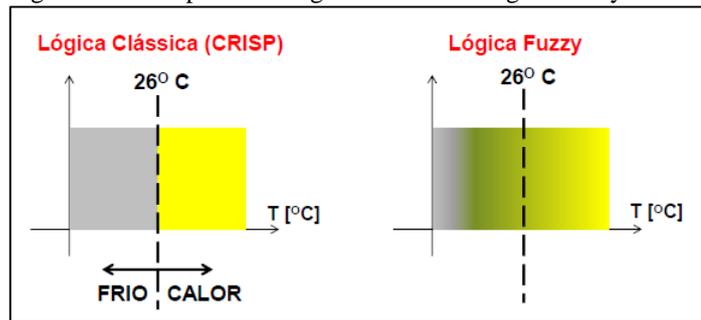
- a) São sistemas que tentam explorar as formas que o cérebro usa para o tratamento de informações qualitativas e incertas.
- b) São sistemas que suportam os modos de raciocínio que são aproximados, ao invés de exatos, como estamos naturalmente acostumados a trabalhar.
- c) São sistemas capazes de tratar informações vagas, aproximadas, as quais são expressas por regras linguísticas.
- d) São sistemas que consistem em aproximar a decisão computacional da decisão humana.

Na lógica clássica tradicional (teoria de conjuntos), as fronteiras dos conjuntos são bem definidas.

Segundo Cavalcanti *et al.* (2012), a teoria dos Conjuntos Tradicionais foi criada a partir da Lógica Clássica. Constatou-se que a classificação “verdadeira” ou “falsa” da Lógica Clássica não é adequada em muitas situações. Por exemplo, um copo tem ou não tem água. Esse tipo de problema é muito difícil de ser solucionado usando a Lógica Clássica, pois meio copo d’água não pode ser ao mesmo tempo parcialmente “verdadeiro” e parcialmente “falso”.

Na lógica *fuzzy* (nebulosa), essas fronteiras não são bem definidas, sendo então flexíveis (Figura 10).

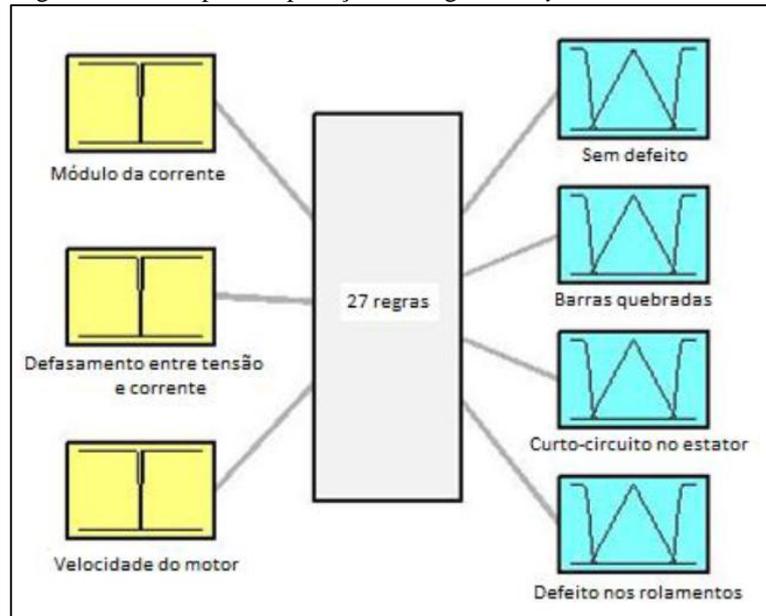
Figura 10 - Comparativo Lógica Clássica e Lógica Fuzzy.



Fonte: MASSELLI, 2014.

O sistema *fuzzy*, para a aplicação na detecção de falhas dos motores, condiz na seleção de dados de entrada, que possivelmente acarretarão algum tipo de falha. Posteriormente, é feito, através de *software*, a inserção de regras no sistema que, por análise, são conjunto das variáveis de entrada que podem estar em níveis baixos, médios ou altos. A união de duas ou mais entrada, dependendo do seu nível podem acarretar um tipo de falha específico, que são as saídas da Lógica *Fuzzy*, que estão exemplificadas na Figura 11 abaixo.

Figura 11 - Exemplo de aplicação de Lógica *Fuzzy*.



Fonte: PINHEIRO, 2011.

Para a coleta das entradas, obtém se, à primórdio, as condições de trabalho do motor, com o mesmo sem qualquer tipo de falha. E posteriormente, aplica-se os mesmos testes realizados no motor saudável, aos motores com um desgaste superior, ou com uma vida útil mais elevada. Esses dados são recolhidos por diversos tipos de análises, que estão listados abaixo (PITOLI, 2013):

a) Monitoramento por vibração;

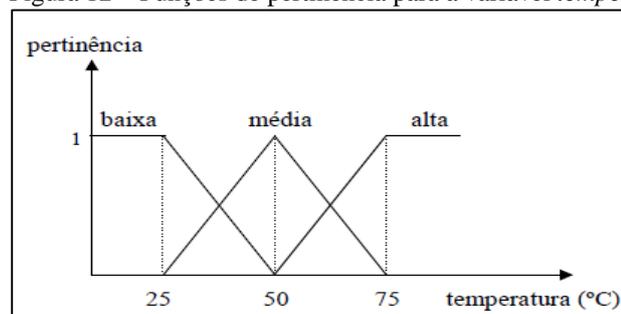
- b) Monitoramento por emissão acústica;
- c) Monitoramento do campo magnético;
- d) Monitoramento por temperatura;
- e) Monitoramento por pulso de choque;
- f) Monitoramento de flutuação de velocidade;
- g) Monitoramento da assinatura elétrica;
- h) Monitoramento de emissão de rádio frequência;
- i) Análise Química.

Feito isto, é lançado os dados coletados no *software*, onde o mesmo avalia – por Lógica *Fuzzy* -, juntamente com as regras já lançadas, o que poderá ocorrer com o motor. Assim é feita a intervenção, preditivamente, no motor com avaria especificada.

5.1 Variável linguística

Segundo Tanscheit (2004), uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. A temperatura pode ser uma variável linguística com valores baixa, média, e alta. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Funções de pertinência para a variável *temperatura*.



Fonte: TANSCHIEIT, 2004.

5.2 Função de pertinência

Segundo Santos (2003), a função de pertinência mostra o grau de pertinência de um elemento em relação a um determinado conjunto. A mesma associa cada elemento x pertencente a U um número real $\mu_A(x)$ no intervalo $[0,1]$. Estas serão as possibilidades que o elemento x venha a pertencer ao conjunto A .

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se e somente se } x \in A \\ 0, & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

U = conjunto universo

A = subconjunto de U

x = elemento de U

Essa função característica, discrimina entre todos os elementos de U aqueles que, segundo algum critério, pertencem ao subconjunto A , dividindo o conjunto universo em duas partes com fronteiras bem definidas (SANTOS, 2003).

Ainda sobre Santos (2003), para obtermos os conjuntos *fuzzy* e suas operações basta generalizarmos a função característica da lógica clássica para o intervalo $[0; 1]$, ou seja, $\mu_A(x)$: $U - [0; 1]$, o que implica em considerarmos um contínuo de valores de pertinência e não apenas pertence e não pertence. O elemento x pertencerá ao subconjunto A com um grau de pertinência que é um valor no intervalo $[0, 1]$.

Um conjunto *fuzzy* A em um conjunto universo U é um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico x e seu grau de pertinência $\mu_A(x)$ da forma:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (2)$$

Onde:

U = conjunto universo

A = subconjunto de U

x = elemento de U

6 METODOLOGIA: APLICAÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA *FUZZY*

A aplicação prática do sistema *Fuzzy* consistirá em três etapas distintas, listadas abaixo:

- a) Levantamento de dados de entrada de um motor saudável;
- b) Simulação da Aplicação *Fuzzy* via *Software*.

6.1 Levantamento de dados

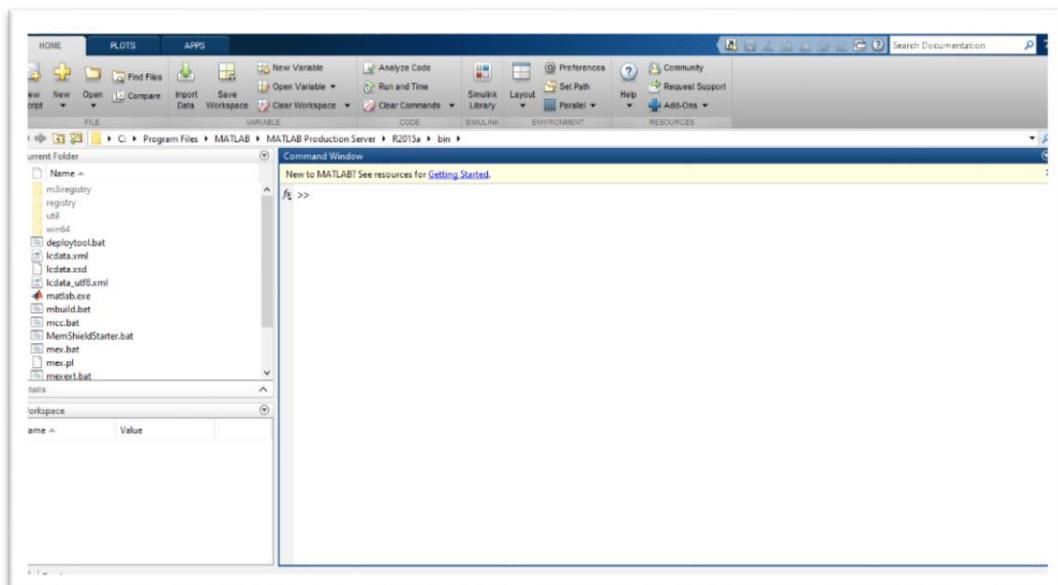
Este item será feito com auxílio de fornecedores de MIT's para que obtenhamos um valor ideal de condições de trabalho do motor. Escolheu-se a Análise de Vibração para coleta de dado de entrada para o sistema *Fuzzy*. Todos esses para um determinado torque específico, para que não haja diferenças na aplicação de testes com falhas.

De posse desses dados, será possível diagnosticar em esquema comparativo, através das regras de *Fuzzy*, os prováveis problemas, tanto mecânicos, quanto elétricos.

6.2 Simulação da lógica *fuzzy*

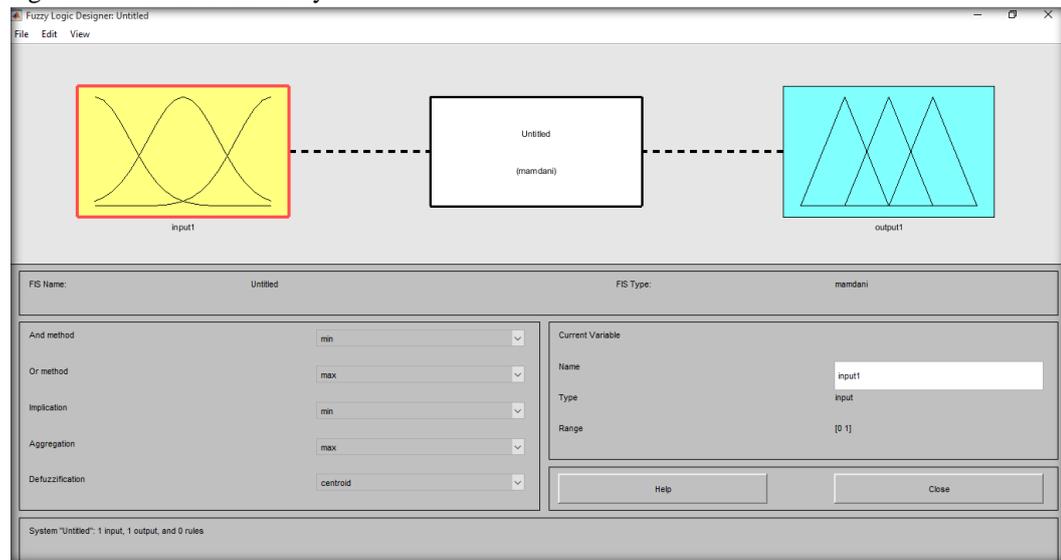
Utilizando o *Software Matlab*[®] (versão 2015) mostrado na Figura 13, é possível simular entradas, saídas e regras para evidenciar falhas em motores. Isso é possível pois temos uma ferramenta (Figura 14) que nos permite tal feito.

Figura 13 - Plataforma Matlab[®]



Fonte: Matlab[®] (versão 2015)

Figura 14 - Ferramenta Fuzzy



Fonte: Matlab® 2015.

É possível inserir N entradas para obter diferentes tipos de saídas. Quanto maior o número de variáveis observar, melhor será minha definição da falha. Contudo é necessário que as regras sejam bem definidas para um melhor resultado (OLIVEIRA, 2013).

7 DESENVOLVIMENTO: PASSO A PASSO PARA OS RESULTADOS

Para realização dos testes, foi retirado dados das frequências de vibração de um motor de 2 polos, com 160 de carcaça. Segundo Teknikao (2011), abaixo estão descritos na tabela 3 os dados fixos, para o motor em questão, para os diversos problemas que podem ser detectados na Análise de Vibração.

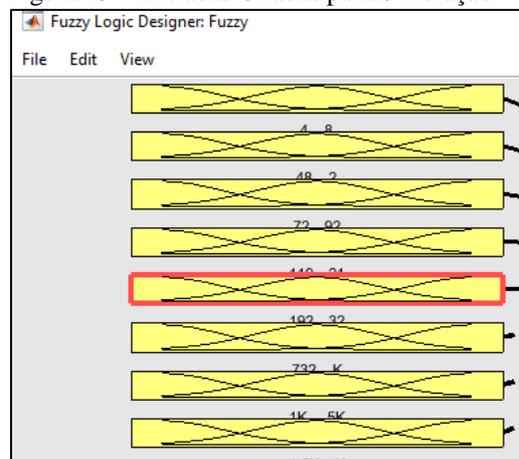
Tabela 3 – Níveis de frequências e suas falhas

Nº	Descrição	Faixa de Frequência (Hz)	Alarmes (mm/s)		
			Normal	Alerta	Perigo
0	Nível Global	0 a 2000	0 - 5	5 - 7,1	Acima de 7,1
1	Correias	4 a 48	0 - 1,3	1,3 - 1,8	Acima de 1,8
2	Desbalanceamento	48 a 72	0 - 4,5	4,5 - 6,4	Acima de 6,4
3	Desalinhamento	72 a 192	0 - 2,0	2,0 - 2,8	Acima de 2,8
4	Falha Estator / Rotor	119 a 121	0 - 1,5	1,5 - 2,2	Acima de 2,2
5	Folgas / Rolamento Avançado	192 a 732	0 - 1,3	1,3 - 1,8	Acima de 1,8
6	Rolamento Intermediário	732 a 1000	0 - 1,0	1,0 - 1,4	Acima de 1,4
7	Rolamento Incipiente	1000 a 1500	0 - 0,9	0,9 - 1,2	Acima de 1,2
8	Passagem de Barras e Ranhuras	1500 a 2000	0 - 0,9	0,9 - 1,2	Acima de 1,2

Fonte: Teknikao (2011).

De posse desses dados, foram introduzidas entradas (Figura 15) no *Software Matlab*[®] (plataforma *Fuzzy*). Cada entrada representava uma faixa de frequência, partindo do número 1 da tabela 3. Isso se procede devido à cada tipo de falha pertencer à uma faixa de frequência, assim como, pensando em aplicações práticas, o sistema de controle mandaria os valores detectados de *mm/s* para sua respectiva entrada (faixa de frequência).

Figura 15 – Entradas Criadas para Simulação.

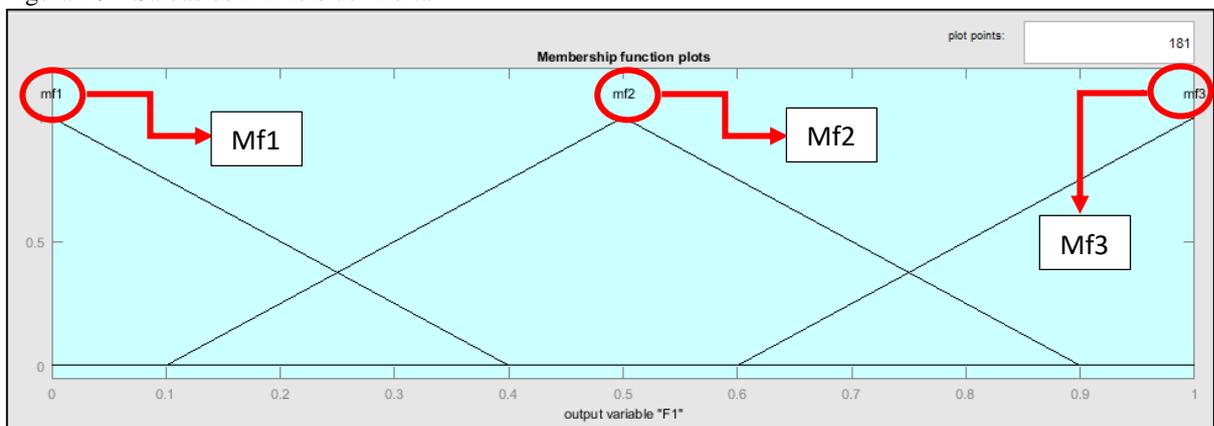


Fonte: o autor.

Essas entradas foram programadas de acordo com as faixas normais, de alerta e perigo, da tabela 3 de referência. Já para os valores que interceptam (em união), foi estipulado início em 80% do valor final estabelecido para o *mf* anterior. Por exemplo, se a faixa de *mf1* abrange o conjunto de 0 à 1, utiliza-se 80% do valor final para iniciar o conjunto de *mf2*, que para este exemplo, seria 0,8.

Para as saídas, foi utilizado a mesma sistemática, contudo seus valores programados foram de 0 à 1, que são apenas valores adotados para que, dependendo da faixa diagnosticada, envie um sinal de ‘falha ok’, ‘falha em alerta’ e ‘falha em perigo’. Isso se vê na Figura 16, em *mf1*, *mf2* e *mf3*, respectivamente.

Figura 16 – Saídas com níveis de Alerta



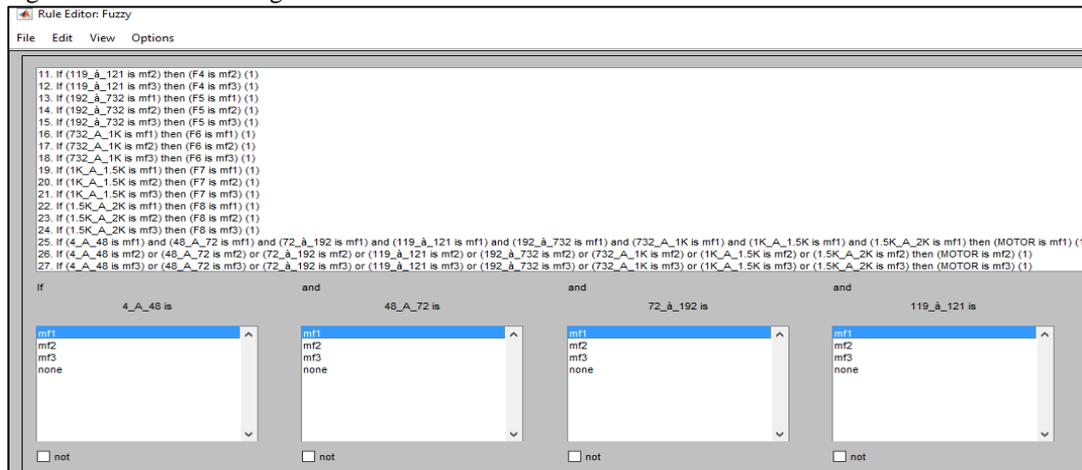
Fonte: o autor.

Além das saídas criadas mostrando o *status* de cada falha, temos uma última saída que liga todos os sinais de entrada e nos notifica o *status* geral do motor. Se o mesmo se encontra em perfeita condições de trabalho, o sinal de saída nos mostrará ‘motor ok’. Se está com qualquer tipo de falha de nível intermediário, o sinal de saída nos mostra ‘motor em alerta’. Ou ainda, se existe o risco de quebra, será transmitido um sinal de ‘motor em perigo’.

Feito isto, é necessário que se crie regras, onde os sinais de entrada irão se *fuzzificar*, para que a regra criada, manipule os dados e posteriormente *desfuzzificar*, gerando um sinal de saída e apresentem o status do motor, de forma online.

A tabela 4 e o quadro 1, vem mostrando como foram escritas as regras na plataforma *fuzzy* do Matlab® e qual o diagnóstico previsto para cada regra criada. Na Figura 17, é possível observar também a plataforma de manipulação dessas regras.

Figura 17 – Editor de Regras



Fonte: o autor.

Tabela 4 – Regras criadas na plataforma *Fuzzy*

REGRA	Faixas de Frequências (entradas)									FALHA
	4 a 48	48 a 72	72 a 192	119 a 121	192 a 732	732 a 1K	1K a 1.5K	1.5K a 2K		
1	MF1	X	X	X	X	X	X	X	F1.1	
2	MF2	X	X	X	X	X	X	X	F1.2	
3	MF3	X	X	X	X	X	X	X	F1.3	
4	X	MF1	X	X	X	X	X	X	F2.1	
5	X	MF2	X	X	X	X	X	X	F2.2	
6	X	MF3	X	X	X	X	X	X	F2.3	
7	X	X	MF1	X	X	X	X	X	F3.1	
8	X	X	MF2	X	X	X	X	X	F3.2	
9	X	X	MF3	X	X	X	X	X	F3.3	
10	X	X	X	MF1	X	X	X	X	F4.1	
11	X	X	X	MF2	X	X	X	X	F4.2	
12	X	X	X	MF3	X	X	X	X	F4.3	
13	X	X	X	X	MF1	X	X	X	F5.1	
14	X	X	X	X	MF2	X	X	X	F5.2	
15	X	X	X	X	MF3	X	X	X	F5.3	
16	X	X	X	X	X	MF1	X	X	F6.1	
17	X	X	X	X	X	MF2	X	X	F6.2	
18	X	X	X	X	X	MF3	X	X	F6.3	
19	X	X	X	X	X	X	MF1	X	F7.1	
20	X	X	X	X	X	X	MF2	X	F7.2	
21	X	X	X	X	X	X	MF3	X	F7.3	
22	X	X	X	X	X	X	X	MF1	F8.1	
23	X	X	X	X	X	X	X	MF2	F8.2	
24	X	X	X	X	X	X	X	MF3	F8.3	
25	MF1	MF1	MF1	MF1	MF1	MF1	MF1	MF1	F9.1	
26	MF2	MF2	MF2	MF2	MF2	MF2	MF2	MF2	F9.2	
27	MF3	MF3	MF3	MF3	MF3	MF3	MF3	MF3	F9.3	

Fonte: o autor.

Quadro 1 – Regras, falhas e seus diagnósticos

REGRA	FALHA	CONEXÃO	DIAGNÓSTICO
1	F1	-	CORREIA OK
2	F1	-	CORREIA ALERTA
3	F1	-	CORREIA PERIGO
4	F2	-	BALANCEAMENTO OK
5	F2	-	BALANCEAMENTO ALERTA
6	F2	-	DESBALANCEADO PERIGO
7	F3	-	ALINHAMENTO OK
8	F3	-	ALINHAMENTO ALERTA
9	F3	-	DESALINHAMENTO PERIGO
10	F4	-	FALHA ELÉTRICA OK
11	F4	-	FALHA ELÉTRICA ALERTA
12	F4	-	FALHA ELÉTRICA PERIGO
13	F5	-	ROLAMENTO AVANÇADO OK
14	F5	-	ROLAMENTO AVANÇADO ALERTA
15	F5	-	ROLAMENTO AVANÇADO PERIGO
16	F6	-	ROLAMENTO INTERMEDIÁRIO OK
17	F6	-	ROLAMENTO INTERMEDIÁRIO ALERTA
18	F6	-	ROLAMENTO INTERMEDIÁRIO PERIGO
19	F7	-	ROLAMENTO INCIPIENTE OK
20	F7	-	ROLAMENTO INCIPIENTE ALERTA
21	F7	-	ROLAMENTO INCIPIENTE PERIGO
22	F8	-	BARRAS E RANHURAS OK
23	F8	-	BARRAS E RANHURAS ALERTA
24	F8	-	BARRAS E RANHURAS PERIGO
25	F9	AND	MOTOR NORMAL
26	F9	OR	MOTOR EM ALERTA
27	F9	OR	MOTOR EM PERIGO

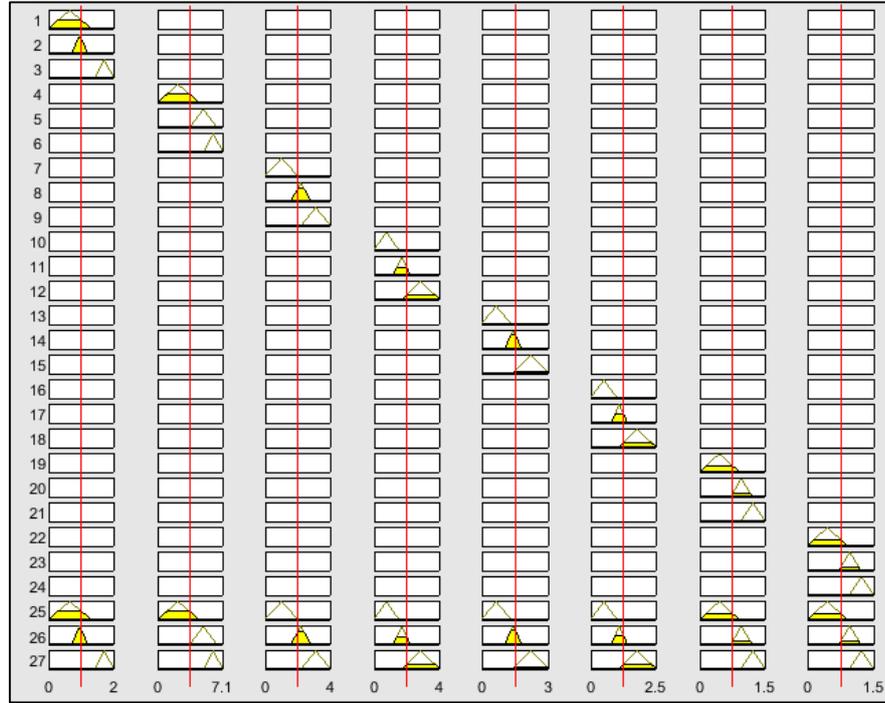
Fonte: o autor.

Nas regras de 1 à 24, onde para cada tipo de falha existem três linhas de regras, foi inserido a lógica que *SE* os valores de entrada de *Rms* fosse de nível 1, a saída mostrada seria ‘falha ok’, por exemplo, ‘correias ok’. *SE* os valores de entrada de *Rms* fossem do nível 2, a saída mostrada seria ‘falha em alerta’, por exemplo, ‘falha elétrica em alerta’. O mesmo se dá para as regras de nível 3. Contudo, para as regras de 25 à 27, onde a saída se refere ao status geral do motor, onde para nível ‘normal’, foi feita a conexão *AND* entre todas as falhas. Já para os níveis em alerta e perigo, foi utilizada a conexão *OR* entre todas as falhas, tendo em vista que se apenas uma falha se alterar no nível, a saída do motor acusará ‘motor em alerta’ ou ‘motor em perigo’.

Após a criação de regras, é feita a simulação dos valores de entrada e saída, conforme nas figuras 18 e 19, respectivamente. Neste ponto é possível verificar a reação do motor, de acordo com os dados simbólicos de entrada, captados da Análise de Vibração. Na figura 18 os valores de entrada estão todos em nível intermediário diante do mínimo e máximo especificado.

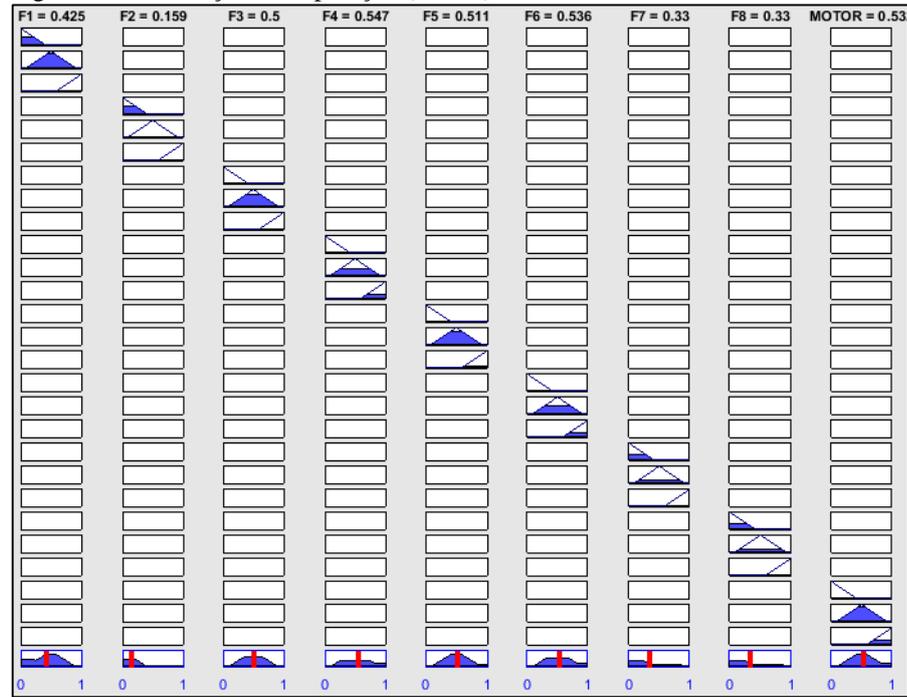
Contudo, os valores de saída na Figura 19 não serão intermediário devido aos valores de *mm/s* admissíveis segundo a ISO 2372.

Figura 18 – Simulação em Operação (Entradas)



Fonte: o autor.

Figura 19 - Simulação em Operação (Saídas)

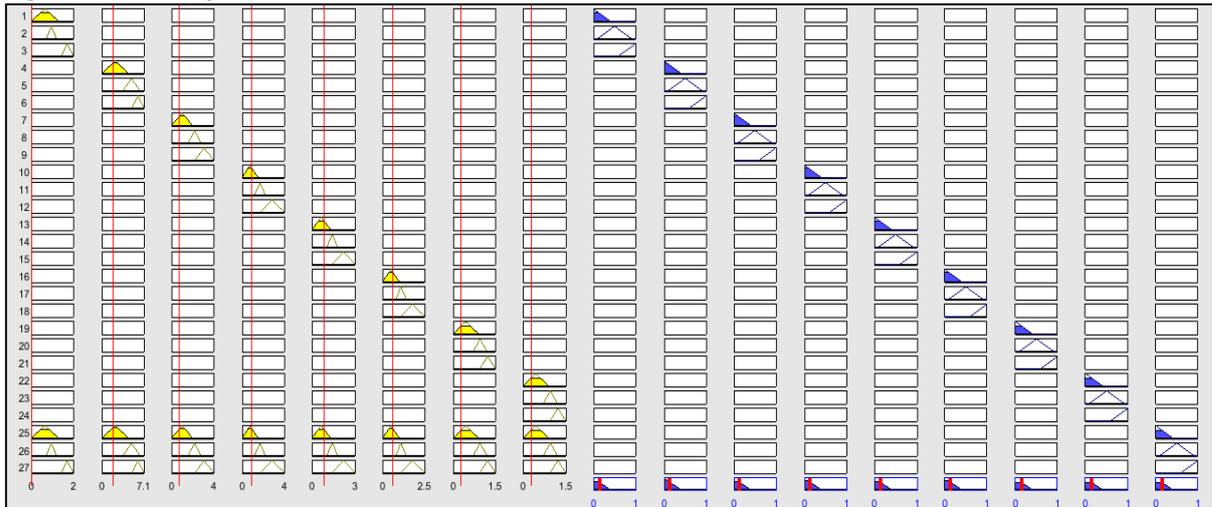


Fonte: o autor.

8 RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizadas quatro simulações distintas, onde os valores de entrada (mm/s) foram alterados em algumas falhas. Na figura 20, a simulação foi feita com todos os valores da Análise de Vibração estáveis, obtendo como resultado *'Motor sem Falha'* para todas as saídas.

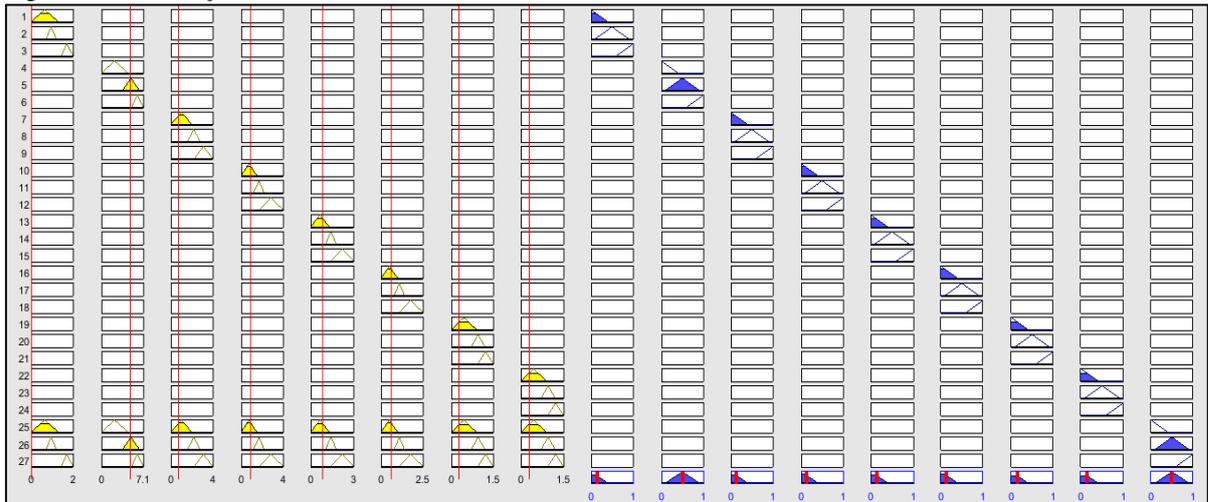
Figura 20 - Simulação 1



Fonte: o autor.

Para simulação dois (Figura 21), foi inserido apenas um valor fora dos parâmetros normais, que corresponde à falha de desbalanceamento, onde foi dado um valor intermediário de vibração permitida (4,6 mm/s). Sua saída correspondente, apresenta um sinal de alerta, o que seria mostrado em uma interface homem x máquina *'Desbalanceamento em Alerta'*. Nota-se também, que a saída *Status* do Motor também teve alteração em nível intermediário, já que a regra criada para ela, relata que para toda e qualquer falha ocorrente em nível intermediário, teremos uma resposta também em nível intermediário. Ou seja, se apenas uma falha estiver em nível intermediário, a saída que mostra a situação do motor mostrará na interface *'Motor em Alerta'*. Nessas condições, acarretaria uma parada programada do motor, onde a manutenção interviria ajustando o balanceamento do motor.

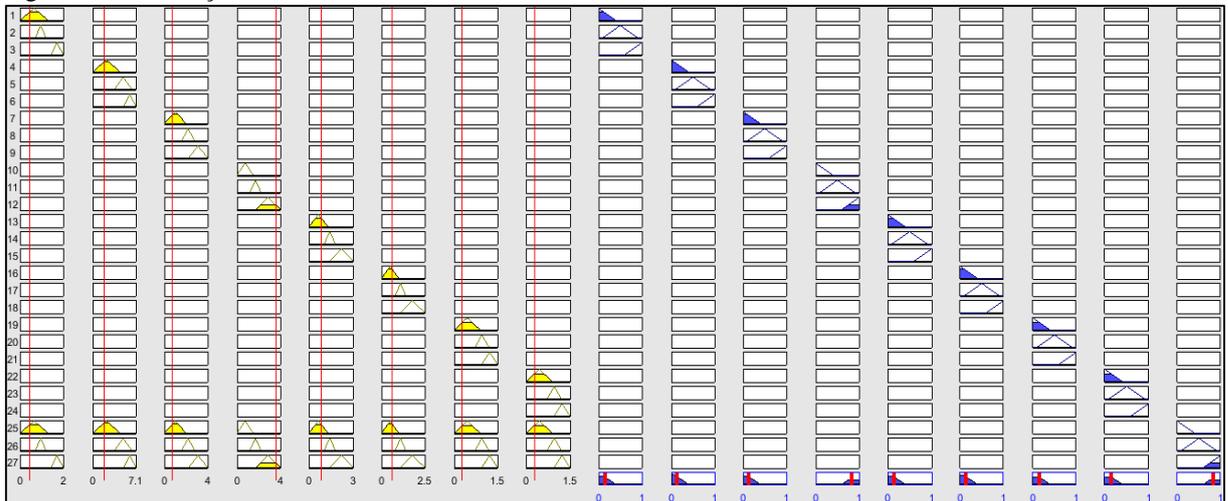
Figura 21 - Simulação 2



Fonte: o autor.

Para simulação três (Figura 22), foi escolhida a falha estator e rotor, em nível já avançado da Análise de Vibração. Nota-se sua saída em sinal de perigo, assim como o *Status* do Motor. Ambos apresentarão na interface homem x máquina, respectivamente, '*Estator e Rotor em Perigo*' e '*Motor em Perigo*'. O que justifica a manutenção imediata para este motor, onde seriam verificados os problemas no estator ou rotor.

Figura 22 - Simulação 3

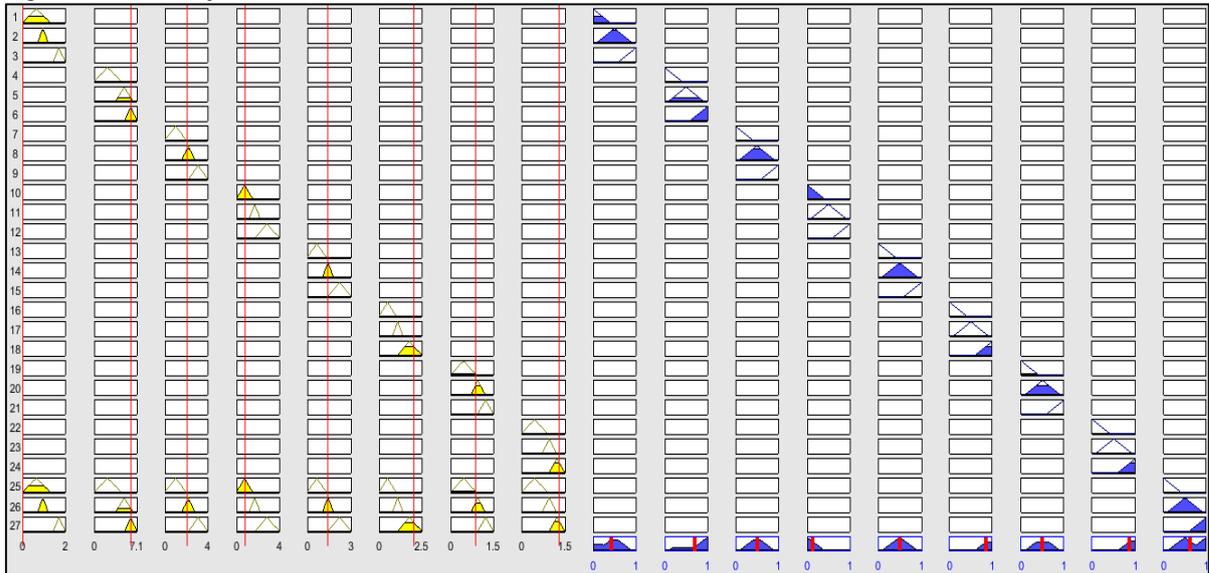


Fonte: o autor.

Já na simulação quatro (Figura 23), foram escolhidos valores aleatórios para cada falha, para que seja observado a reação da lógica *fuzzy* em diversas situações. Certamente um motor não terá essa reação em uma operação real, contudo para esta simulação didática, nos mostra que a Lógica aplicada, realmente atende as expectativas para uma manutenção preditiva *online*.

Posteriormente, é possível observar na tabela 5, todos os dados que foram implementados nas entradas, assim como suas respectivas reações.

Figura 23 - Simulação 4



Fonte: o autor.

Tabela 5 – Dados das Simulações

FALHAS	ENTRADAS E SAÍDAS			
	SIMULAÇÃO 1 (mm/s)	SIMULAÇÃO 2 (mm/s)	SIMULAÇÃO 3 (mm/s)	SIMULAÇÃO 4 (mm/s)
Correias	0,5	0,5	0,5	1
Desbalanceamento	2,8	4,6	2,8	6,2
Desalinhamento	0,75	0,75	0,75	2
Falha Estator / Rotor	0,92	0,92	3,6	0,8
Folgas / Rolamento Avançado	0,85	0,85	0,85	1,4
Rolamento Intermediário	0,5	0,5	0,5	2
Rolamento Incipiente	0,3	0,3	0,3	0,87
Passagem de Barras e Ranhuras	0,3	0,3	0,3	1,29
Status do Motor	-	-	-	-

Legenda

	Sem Falha
	Falha em Alerta
	Falha em Perigo

Fonte: o autor.

9 CONCLUSÃO

Conclui-se com este trabalho, a total eficácia da ferramenta Lógica *Fuzzy*, para controles de falhas em motores. Este feito pode também ser expandido para demais equipamentos, assim como outras aplicações.

Os tipos de manutenção citadas permite a observação de que com o investimento em manutenções preditivas *online* o custo com perdas de produção e peças de reposição em estoque são reduzidas de forma considerável.

Também foi levantado a utilização de lógica *fuzzy* no processo de tomada de decisões, onde definiu-se que para a aplicação em estudo, esse tipo de lógica teria um melhor desempenho. Tal afirmação se deve ao fato da lógica trabalhar com a incerteza e a imprecisão e ser muito difícil de estabelecer um modelo matemático para processos industriais.

Através do *Toolbox* do Matlab[®], foi possível elaborar uma estrutura que utiliza como variáveis de entrada os níveis de vibração, fornecendo uma saída de diagnóstico. Isso foi possível através das criação de regras na ferramenta.

Os resultados obtidos nesta aplicação foram satisfatórios, pois as regras da estrutura *fuzzy* conseguiram expressar os conhecimentos em manutenção, quanto as condições do motor com relação ao nível de vibração, se estão em boas condições de uso, com algum tipo de alerta, ou ainda, em risco de quebra.

REFERÊNCIAS

- ÁGUAS, André G. **Otimização de um sistema online de detecção de falhas em motores de indução**. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2013.
- BANDEIRA, Guilherme. ABREU, Guilherme de. GIANELLI, Rafael. **Vibração e ruído em manutenção preditiva**. Faculdade de Engenharia Campus Bauru, Bauru, 2010.
- BECHARA, Ricardo. **Análise de Falhas em Transformadores de Potência**. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BLOCH, Heiz P. GEITNER, Fred K. **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting**. 3^a Ed., Houston, Gulf Professional Publishing, 1999.v. 2.
- CAVALCANTI, José H. F. *et al.* **Lógica Fuzzy aplicada às Engenharias**. João Pessoa, PB. 2012.
- CHOW, Mo-Yuen, **Guest Editorial Special Section on Motor Fault Detection and Diagnosis**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. North Carolina, 2000.
- ELETROBRÁS, et al. **Motor Elétrico: guia básico**. ELETROBRÁS, et al. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2009.
- GATEC. **Projeto Manutenção Preditiva: análise de vibrações**. Gestão Agroindustrial, Piracicaba, 2014. Disponível em: <www.gatec.com.br>. Acesso em: 20 out. 2016.
- GURSKI, Carlos Alberto. **Curso de formação de operadores de refinaria: noções de confiabilidade e manutenção industrial**. Curitiba: PETROBRAS: UnicenP, 2002. 24 p. : il.
- KOSOW, Invirng L. **Máquinas elétricas e Transformadores**. 15 ed. São Paulo: Globo, 2005.
- LUCAS, C. A.; CHENCI, G. P.; RIGNEL, D. G. S. **Uma Introdução a Lógica Fuzzy**. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica. 2011. Disponível em: <http://www.logicafuzzy.com.br/wp-content/uploads/2013/04/uma_introducao_a_logica_fuzzy.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2016.
- MASSELLI, Yvo M. C. **Sistemas Inteligentes em Automação Industrial**. Inatel, Santa Rita do Sapucaí, 2014.
- MONTEIRO, C. I.; SOUZA, L. R. de. ROSSI, P. H. L. **Manutenção Corretiva: manutenção e lubrificação de equipamentos**. Bauru, 2010.
- OLIVEIRA, Amadeus Lincon de. **Estudo de apoio a tomada de decisão em processo de manutenção baseada em Lógica Fuzzy**. Universidade Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2013.
- PINHEIRO, Hélio H. C. **Sistema para Detecção e Diagnóstica de Falhas em Motores Elétricos de Indução Utilizando Lógica Fuzzy**. 2011. 103 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PITOLI, Marcos H. **Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas em motores de indução trifásicos através da técnica da Análise da Assinatura Elétrica.** Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2013

REIS, Anderson J. S. **Reconhecimento de padrões de falhas em motores trifásicos utilizando redes neurais.** 2010. 88 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SALMAZO, Fabrício. **Proposta de Manutenção Centrada na Confiabilidade:** estudo de caso no SEP de Redes Subterrâneas em Curitiba. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

SANTOS, Germano J. C. **Lógica Fuzzy.** Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, Bahia, 2003.

SÃO PAULO. **Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5.** Unicamp, 2005.

SENAI. **Manutenção.** Divisão de Recursos Didáticos. São Paulo, 2000.

SILVA, V. A. D. S.; BRITO, J. N.; BACCARINI, L. M. R. Diagnóstico de falhas mecânicas através da análise de vibração em motores alimentados por inversores de frequência. In: V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. **Engenharia Elétrica.** Bahia: ABCM, 2008.

SPAMER, Fernanda R. **Técnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

TANSCHKEIT, Ricardo. **Sistemas Fuzzy.** DEE-PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2004.

TEODORO, F. H. Grupo de estudo de subestações e equipamentos elétricos. In: XIX SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Engenharia Elétrica.** Rio de Janeiro: SNPTEE, 2007.

WEG (Jaraguá do Sul, SC). **Motores Elétricos:** catálogo. Santa Catarina, 2005. 145 p.