

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELÉTRICA

NAHISA DOMINGUES SCHIAVON

**INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO NA CLASSIFICAÇÃO DE  
FALHAS DE ROLAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2020

NAHISA DOMINGUES SCHIAVON

**INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO NA CLASSIFICAÇÃO DE  
FALHAS DE ROLAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à disciplina TCC2, do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.  
Orientador: Prof.Dr. Wagner Fontes Godoy.

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2020



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Nahisa Domingues Schiavon**

**Influência da frequência de chaveamento na classificação de falhas de rolamento de motores de indução trifásico**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 09:00hs do dia 09/10/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Wagner Fontes Godoy - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Márcio Mendonça - (Membro)

---

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

## RESUMO

SCHIAVON, Nahisa D. **Influência da Frequência de Chaveamento na Classificação de Falhas de Rolamento de Motores de Indução Trifásicos**. 2020. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Este trabalho propõe o estudo da influência da frequência de chaveamento na correta classificação de defeitos de rolamentos em motores de indução trifásicos acionados por meio de diferentes inversores de frequência. Para classificação das condições de operação do motor são utilizadas Redes Neurais Artificiais do tipo Perceptron Multicamadas. Os resultados obtidos demonstram a precisão de classificação independente da frequência de chaveamento considerada, além da viabilidade de emprego dos métodos de processamento de sinais em ambos domínios do tempo e domínio da frequência.

**Palavras-chave:** Motor de Indução Trifásico, Inversor de Frequência, Frequência de chaveamento, Redes Neurais Artificiais.

## ABSTRACT

SCHIAVON, Nahisa D. **Influence of the switching frequency on the bearing failure classification of three-phase induction motors**. 2019. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

This work proposes the study of the influence of the switching frequency in the correct classification of bearing defects in three-phase induction motors driven by different frequency inverters. To classify the operating conditions of the engine, Multilayer Perceptron Artificial Neural Networks are used. The results obtained demonstrate the classification accuracy independent of the considered switching frequency, in addition to the feasibility of using signal processing methods in both time and frequency domains.

**Key words:** Faults. Three-phase Inductor Motors. Frequency inverter. *Perceptron*. Fast Fourier Transform.

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 Delimitação do tema .....	10
1.2 Problemas e premissas .....	11
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo geral .....	11
1.3.2 Objetivos específicos .....	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 Motor de Indução Trifásico .....	13
2.1.1 Acionamento por Inversor de Frequência .....	14
2.2 Frequência de Chaveamento.....	16
2.3 Falhas em Motores de Indução Trifásicos .....	18
2.4 Falha de Rolamento .....	21
2.5 Classificação inteligente de falhas .....	23
2.5.1 Redes Neurais Artificiais .....	23
2.6 Rede <i>Perceptron</i> Multicamadas .....	26
2.7 Transformada Rápida De Fourier .....	28
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1 Banco de Dados.....	29
3.1.1 Motores .....	29
3.1.2 Inversores de Frequência .....	29
3.2 Dados Experimentais e Classificação.....	30
3.2.1 Dados Experimentais .....	30
3.3 Estrutura e Classificação dos dados .....	32
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>35</b>
4.1 Falha de Desgastes no Rolamento .....	35
4.1.1 Corrente no domínio do tempo – Classificação Simples .....	35
4.1.2 Corrente no domínio do tempo – Multiclassificação .....	36
4.1.3 Corrente no domínio da frequência– FFT – Classificação Simples.....	37
4.1.4 Corrente no domínio da frequência – FFT - Multiclassificação .....	7

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
<b>Referências .....</b>	<b>44</b>

## Índice de Ilustrações

FIGURA 1 - MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO, MODELO W22, WEG. FONTE: (WEG, 2013B). .....	14
FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA. FONTE: (WEG AUTOMAÇÃO). .....	15
FIGURA 3 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	16
FIGURA 4 - ONDA SENOIDAL .....	16
FIGURA 5 - CIRCUITO SIMPLIFICADO DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA TRIFÁSICO.....	17
FIGURA 6 - DIAGRAMA DE FONTE DE FALHAS EM MIT, BASEADO EM KAZZAZ, 2003. ....	20
FIGURA 7 - ESTUDO EPRI .....	21
FIGURA 8 - PARTES CONSTITUINTES DE UM ROLAMENTO. FONTE: ADAPTADO DE BONES (2011) .....	22
FIGURA 9 - ESQUEMA DE UNIDADE McCULLOCK – PITTS .....	24
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DE UMA REDE PMC. FONTE: SIVAL, SPATTI & FLAUZINO, 2016. ....	25
FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DE REDE PERCEPTRON MULTICAMADAS .....	27
FIGURA 12 - DESGASTE DO ROLAMENTO .....	31
FIGURA 13 - CONTAMINAÇÃO DO ROLAMENTO COM PASTA ABRASIVA .....	32
FIGURA 14 - RESULTADO NO DOMÍNIO DO TEMPO .....	7
FIGURA 15- RESULTADO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	41
FIGURA 16 - RESULTADOS OBTIDOS .....	42

## Índice de Tabelas

TABELA 1 - PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DOS MIT UTILIZADOS .....	29
TABELA 2 - PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DOS INVERSORES UTILIZADOS .....	30
TABELA 3 - QUANTIDADE DE AQUISIÇÕES UTILIZADOS POR DEFEITO .....	30
TABELA 4 - ESPECIFICAÇÕES DOS ROLAMENTOS .....	32
TABELA 5 - PARÂMETROS PMC .....	33
TABELA 6 - TOPOLOGIA PMC - CLASSIFICAÇÃO SIMPLES .....	33
TABELA 7- CLASSIFICAÇÃO SIMPLES .....	34
TABELA 8- TOPOLOGIA PMC MULTICLASSIFICAÇÃO .....	34
TABELA 9 - MULTICLASSIFICAÇÃO .....	34
TABELA 10 - CLASSIFICAÇÃO SIMPLES.....	35
TABELA 11- MULTICLASSIFICADOR MM40 .....	36
TABELA 12 -MULTICLASSIFICADOR G110 .....	37
TABELA 13 - MULTICLASSIFICADOR ATV .....	37
TABELA 14 - CLASSIFICAÇÃO SIMPLES.....	7
TABELA 15- MULTICLASSIFICADOR MM40 .....	7
TABELA 16 -MULTICLASSIFICADOR G110 .....	7
TABELA 17 - MULTICLASSIFICADOR ATV .....	7

# 1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos (MIT) são responsáveis por aproximadamente 68% do consumo de energia elétrica do setor industrial, onde este setor consome em torno de 35% de toda a energia produzida no país. Deste percentual, cerca de 68% é consumida pelo sistema motriz (SAUER, 2015)

Sendo uma parcela significativa de energia, é imprescindível que está seja utilizada da forma mais racional possível. Neste contexto, destaca-se o motor elétrico de indução trifásico, pois dentre os diversos tipos de motores existentes, este é o que melhor atende as necessidades econômicas, apresentando simplicidade, baixo custo, robustez, alto rendimento, confiabilidade e a possibilidade do emprego de inversores de frequência em seu acionamento (BELLINI, FILIPPETTI, TASSONI, & CAPOLINO, 2008).

A operação de motores alimentados por inversores de frequência desempenha um papel cada vez mais essencial em uma ampla variedade de aplicações industriais. Como resultado, o monitoramento preditivo de condições operacionais associadas com o diagnóstico de falhas, prevenção contra problemas indesejados e previsões de possíveis danos futuros devem ser devidamente compreendidos (Karabadji, et al., oct, 2014).

Apesar de possuírem características construtivas robustas, os motores elétricos de indução são expostos a uma variedade de condições ambientais, operando sob diversos tipos de cargas, tais fatores juntamente com o envelhecimento natural contribuem para que os motores possam vir a desenvolver falhas (Suetake, 2012).

Dentre as falhas que podem vir a ocorrer nos motores elétricos, cerca de 69% correspondem a falhas nos rolamentos. Realizar o monitoramento desta falha, é essencial, visto que, falhas nos rolamentos influenciam diretamente no desempenho da máquina (Suetake, 2012).

Assim, a contribuição principal deste trabalho consiste no estudo da influência da frequência de chaveamento nos resultados de classificação de defeitos de rolamentos em MIT acionados por meio de diferentes inversores de frequência. Para classificação das condições de operação do motor serão utilizadas Redes Neurais Artificiais (RNA) do tipo *Perceptron* Multicamadas.

## 1.1 Delimitação do tema

As falhas em rolamento são as principais causas para os baixos índices de produtividade e disponibilidade em algumas indústrias, e dessa forma esta classe de falhas é tida como principal responsável por paradas inesperadas desta classe de motores (GODOY, 2016). Desta forma, será estudado o impacto do uso de diferentes frequências de chaveamento na precisão de

classificação de defeitos de rolamentos em motores de indução trifásicos acionados por diferentes modelos de inversores de frequência, utilizando como base a Rede *Perceptron* Multicamadas.

## 1.2 Problemas e premissas

Os MIT monofásicos são as máquinas rotativas mais utilizadas atualmente na indústria, sendo responsáveis por aproximadamente 95% do total da carga de motores instalada (Massirer, 2007). A importância dos motores de indução nas plantas industriais torna a confiabilidade da operação destas máquinas um ponto crítico, devido ao alto custo de uma parada no processo produtivo, os quais podem representar 15% a 40% do custo total de muitos produtos (Avelar, Baccarini, & Amaral, 2011).

Uma vez que é economicamente inviável manter máquinas sobressalentes, o monitoramento online das máquinas de indução é importante para uma operação segura e qualidade da produção (Baccarini, 2005).

Os objetivos de tais estudos é interpretar precocemente a falha incipiente e definir um correto diagnóstico, para que não ocorra uma manutenção não programada e uma parada no processo produtivo (Santos, Silva, & Suetake, 2012).

Baseado nas informações citadas acima, esse trabalho propõe realizar o estudo do impacto da frequência de chaveamento na classificação de falhas de rolamento por meio da Rede *Perceptron*, possibilitando assim, manutenções preditivas para que o estado do defeito não se agrave, causando assim perdas de processo e conseqüente competitividade da indústria.

## 1.3 Objetivos

Nesta seção são descritos os objetivos gerais e específicos desta proposta de trabalho de conclusão de curso, deixando claro o que espera conseguir ao fim do estudo.

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar o estudo da influência da frequência de chaveamento na classificação de defeitos de rolamentos em MIT, acionados por inversores de frequência.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, elencam-se os seguintes:

- Analisar os causadores de falhas no MIT;
- Direcionar o estudo para falhas nos rolamentos;
- Classificar as falhas, com base na influência da frequência de chaveamento aplicada.
- Avaliar o desempenho de classificação das falhas a partir da Rede Neural *Perceptron* Multicamadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção descreve-se os conceitos abordados no desenvolvimento deste trabalho.

Para a realização da classificação inteligente de falhas dos MIT, primeiramente, faz-se necessário realizar de forma adequada o correto tratamento e pré-processamento dos sinais de corrente, e isso será desenvolvido por meio da análise de componentes principais. Em seguida, será estudada a influência causada pela frequência de chaveamento, e então, como etapa final o emprego da rede *Perceptron* Multicamadas para classificação destas falhas.

### 2.1 Motor de Indução Trifásico

Os MIT apresentam uma boa opção para acionamentos controlados, devido suas vantagens tais como:

- O custo do MIT é muito menor (entre 30 e 40%) que o motor de CC de mesma potência;
- A manutenção do MIT é a mais simples e menos onerosa;
- O consumo de energia do MIT nos processos de aceleração e frenagem também é proporcionalmente menor;
- Com o MIT pode-se obter velocidades maiores, o que implica em potências maiores.

Em uma máquina com dois polos, o motor é composto por duas partes: estator e rotor. No estator (parte fixa), onde é produzido o fluxo magnético, estão montados três enrolamentos, que são ligados à rede de alimentação, podendo estar conectados em estrela ou triângulo. Já no rotor, é produzida a corrente que interage com o fluxo.

O movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético do estator que produz uma tensão induzida em uma barra do rotor, se chama tensão induzida.

A tensão induzida nas barras do rotor de indução depende da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Como o comportamento de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, muitas vezes é mais lógico falar de velocidade relativa (Chapman, 2013). O termo utilizado para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos é a velocidade de escorregamento.

A Figura 1, ilustra um motor de indução trifásico.

Figura 1 - Motor de Indução Trifásico, modelo w22, WEG. Fonte: (WEG, 2013b).

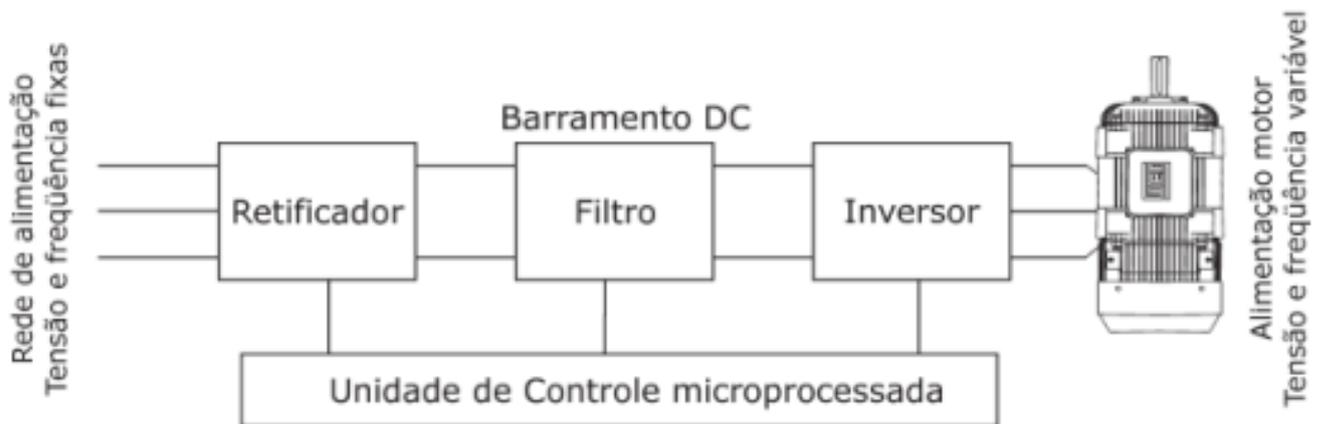


### 2.1.1 Acionamento por Inversor de Frequência

De acordo com (Chapman, 2013), o método preferido para controlar a velocidade dos motores de indução é o acionamento de frequência variável de estado sólido para motor de indução.

Segundo (Rashid M. , 1993; Rashid, 1993), o termo “inversor de frequência” é comumente utilizado para designar um equipamento que é composto por quatro blocos funcionais básicos, a saber: um retificador, um link DC, um inversor e um módulo controlador. Na figura a seguir, é apresentado o diagrama de blocos funcional do equipamento.

Figura 2 - Diagrama de blocos de um inversor de frequência. Fonte: (WEG Automação).



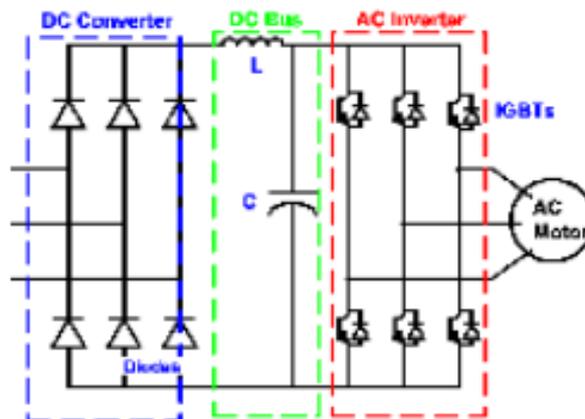
O princípio de funcionamento do equipamento como um todo pode ser resumido pelos quatro blocos funcionais. O primeiro deles é o retificador trifásico de onda completa que retifica a tensão AC de magnitude e frequência fixas da rede. O link DC usualmente tem duas funções: a primeira, de atuar como um filtro para as oscilações de *ripple* da tensão DC gerada pelo bloco anterior; e a segunda, de operar como um circuito *Chopper*, isto é, um regulador que permite controlar a amplitude da tensão DC disponibilizada ao bloco inversor.

Com o progresso das tecnologias na área de eletrônica de potência, a presença dos inversores de frequência nos acionamentos industriais tem crescido de forma bastante considerável, pelo fato que eles podem oferecer uma proteção contra sobrecarga no motor, sobrecorrente, sobretensão/subtensão, além de proteção contra altas temperaturas (FAIZ, GHORBANIAN, & EBRAHIMI, 2012).

A função principal de um inversor de frequência é, a partir de uma alimentação com frequência fixa, prover à carga uma alimentação ajustável. Os inversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variável. Assim, é possível obter-se a velocidade desejada de rotação.

A figura abaixo mostra resumidamente o diagrama de blocos de um inversor de frequência escalar (Inversores de Frequência, s.d.):

Figura 3 - Inversor de frequência

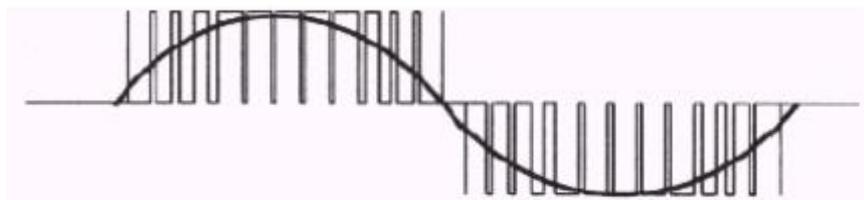


Os seis diodos retificadores no circuito de entrada do inversor, retificam a tensão trifásica da rede de entrada (L1, L2 e L3). A tensão DC resultante é filtrada pelo capacitor C e utilizada como entrada para Seção Inversora (Inversores de Frequência, s.d.).

Na seção inversora, a tensão retificada DC é novamente convertida em Trifásica AC. Os transistores chaveiam várias vezes por ciclo, gerando um trem de pulsos com largura variável senoidalmente (PWM). Esta saída de tensão pulsada, sendo aplicada em um motor (carga indutiva), irá gerar uma forma de onda bem próxima da senoidal através do enrolamento do motor.

Abaixo, a forma de onda na saída do inversor (Inversores de Frequência, s.d.):

Figura 4 - Onda senoidal



## 2.2 Frequência de Chaveamento

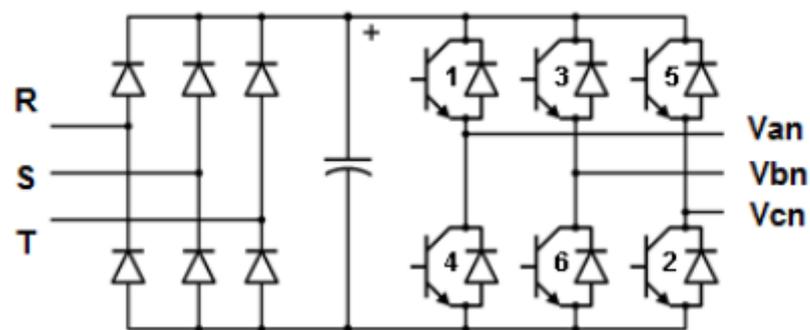
Modernas técnicas de chaveamento da forma de onda de tensão e da frequência aplicada sobre o estator do motor elétrico, permitem o controle com excelente precisão, sobre o eixo do motor.

O inversor assegura o fornecimento ao motor de uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Se a corrente ou a tensão forem variáveis,

o inversor apenas gera sua frequência, porém, se a tensão for constante, o inversor gera tanto a frequência como a tensão variáveis necessárias para o motor. (Silva P. L., 2011)

A maioria dos inversores utilizados atualmente é do tipo *VFI* (do inglês, *Voltage Fed Inverter*), que se caracteriza pela manutenção de um valor de tensão DC constante na saída do circuito *Chopper*, isto é, na entrada do bloco inversor. A figura abaixo apresenta um circuito simplificado com um retificador conectado a um inversor por um link DC.

Figura 5 - Circuito simplificado de um inversor de frequência trifásico.



No circuito mostrado na Figura 3 é comum o uso de uma estratégia de disparo das chaves conhecida como modo de condução por  $120^\circ$ . Nesse modo, considerando-se que um período desejado  $T_0$  para a tensão trifásica de saída seja correspondente a  $2\pi$  radianos, cada chave conduz por uma fase de  $2\pi/3$  radianos (ou  $120^\circ$ ) do ciclo. Neste caso, somente duas chaves permanecem ligadas em qualquer instante de tempo e a sequência de condução das chaves é 61, 12, 23, 34, 45, 56, 61. (Rashid, 1993)

O inversor de frequência atinge a plenitude do seu funcionamento quando, no circuito da Figura 3, considera-se a atuação do módulo de controle para gerar uma tensão AC de saída com magnitude  $V_0$  e frequência  $f_0 = 1/T_0$  desejadas. O circuito de controle determina a sequência temporal exata de disparos das chaves através de técnicas de modulação por largura de pulso (ou *PWM*, do inglês *Pulse-Width Modulation*). (Rashid, 1993)

O motor de indução submetido a uma tensão PWM (*Pulse Width Modulation*), proveniente de um inversor de frequência, estará sujeito a tensões harmônicas (componentes de frequência acima da frequência fundamental). Dependendo da modulação PWM empregada, da frequência de chaveamento e de outras particularidades do controle, o motor poderá apresentar aumento de perdas e temperatura, aumento dos níveis de vibração e ruído e perda de rendimento.

Além disso, podem aparecer outros efeitos quando da alimentação do motor por inversores, como “stress” do sistema de isolamento e correntes pelos mancais, que, embora relevantes, não se devem especificamente às harmônicas. (WEG, s.d.)

Associada aos efeitos originados do *rise time* e do mínimo tempo entre pulsos consecutivos, está a frequência com que os mesmos são produzidos (WEG, s.d.). Ao contrário dos eventuais impulsos proveniente de manobras de rede, neste caso trata-se de um trem de pulsos mantido numa determinada frequência.

Segundo estudo publicado pela WEG, em função da rápida evolução da eletrônica de potência, essa frequência atualmente atinge valores da ordem de 20 kHz e, quanto maior for a frequência de chaveamento (pulsção) do inversor, mais rápida será a degradação do sistema isolante. Estudos indicam que a dependência do tempo de vida útil do isolamento em função da frequência de chaveamento não é uma relação simples, porém, experiências realizadas nesse sentido mostram dados interessantes: para **frequência de chaveamento  $\leq 5\text{kHz}$**  a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional à frequência de chaveamento, ao passo que para **frequência de chaveamento  $\geq 5\text{ kHz}$**  a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional ao quadrado da frequência de chaveamento. O aumento da frequência de chaveamento pode também ocasionar danos aos rolamentos. Por outro lado, o aumento da frequência de chaveamento melhora a série de Fourier da tensão injetada no motor, tendendo, dessa forma, a melhorar o desempenho do motor em termos de temperatura e ruído (WEG, s.d.).

A frequência de chaveamento resulta num compromisso entre o ruído acústico no motor e as perdas nos conversores do inversor. Frequências de chaveamento altas implicam em menor ruído acústico no motor, porém aumentam as perdas nos conversores, elevando a temperatura nos componentes e reduzindo sua vida útil. A redução da frequência de chaveamento também colabora na redução dos problemas de instabilidade e ressonâncias que ocorrem em determinadas condições de aplicação, bem como da emissão de energia eletromagnética pelo inversor. Também, a redução de frequência de chaveamento reduz as correntes de fuga para a terra, podendo evitar a atuação indevida da proteção de falta à terra (Eletric, 2017).

### 2.3 Falhas em Motores de Indução Trifásicos

Os MITs e monofásicos são as máquinas rotativas mais utilizadas atualmente, sendo responsáveis por aproximadamente 95% do total de motores instalados (Massirer, 2007). São consideradas robustas e muito

tolerantes, garantem confiabilidade, robustez, simplicidade de construção e baixo custo, sendo assim, muito populares nas indústrias. É de extrema importância a manutenção preventiva para o diagnóstico de possíveis falhas, evitando assim, tais problemas.

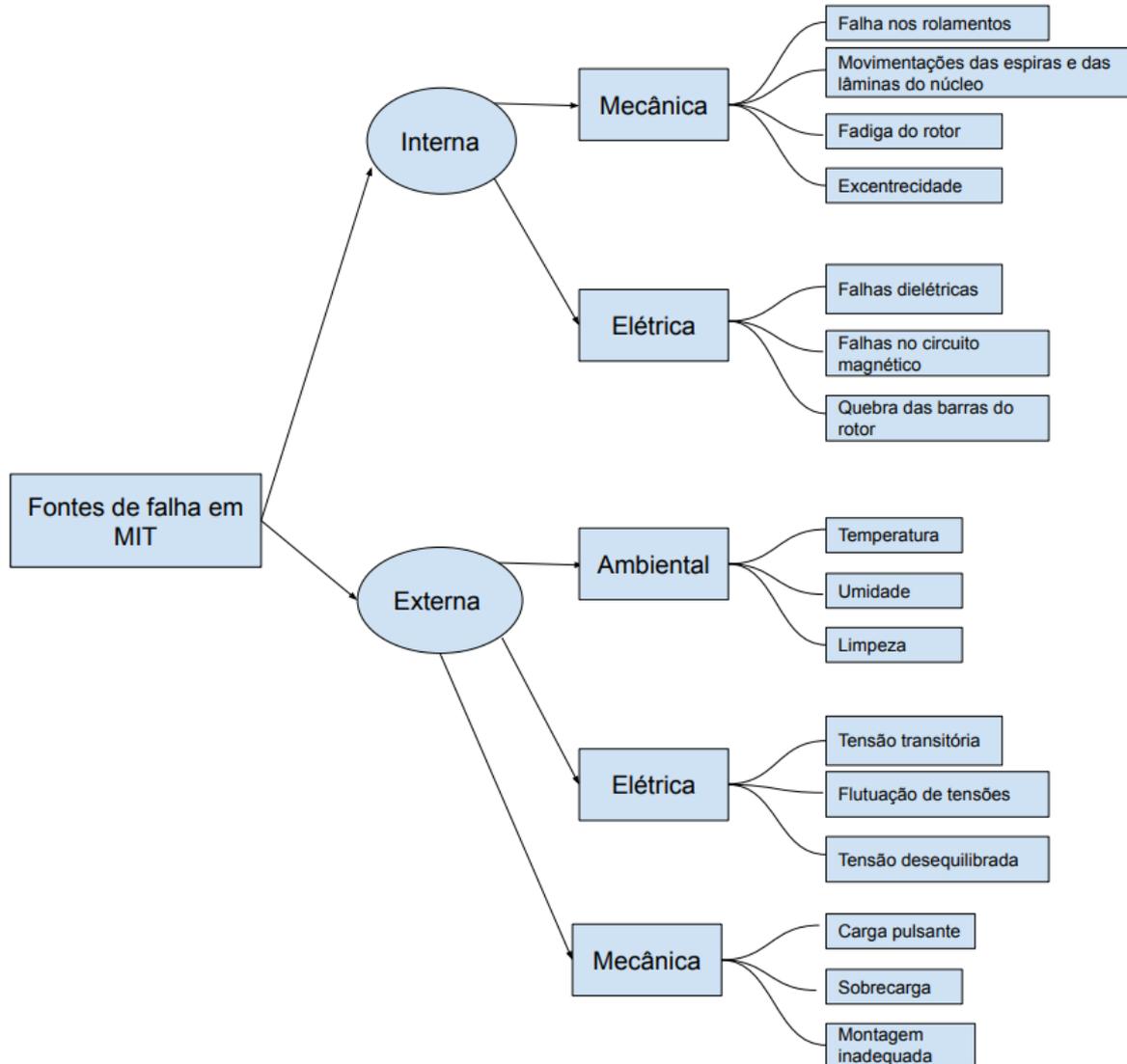
Mesmo com características relevantes citadas anteriormente, os motores elétricos são acometidos por falhas que são inerentes às máquinas, que são um conjunto de um envelhecimento natural, com as diversas condições ambientais, operando sob vários tipos de cargas, que o motor é submetido (Suetake, 2012).

As origens de falhas em máquinas possuem diversas origens, como problema no projeto, imperfeição na fabricação, montagem, instalação, ambiente de trabalho, a natureza da carga e cronograma de manutenção. Os fatores que afetam o comportamento do motor podem ser agrupados em problemas de origem magnética ou elétrica e problemas de origem mecânica (Baccarini, 2005).

As principais falhas que um MIT está sujeito são distinguidas em falhas externas e internas, na qual as externas são divididas em falhas de natureza elétrica, mecânica e ambiental. Já as internas são separadas em mecânicas e elétricas (BELLINI, FILIPPETTI, TASSONI, & CAPOLINO, 2008).

Quando a falha ocorre, o equilíbrio entre essas forças é perdido, gerando assim, falhas ainda maiores (AL KAZZAZ & Singh, 2003).

Figura 6 - Diagrama de Fonte de Falhas em MIT, baseado em KAZZAZ, 2003.

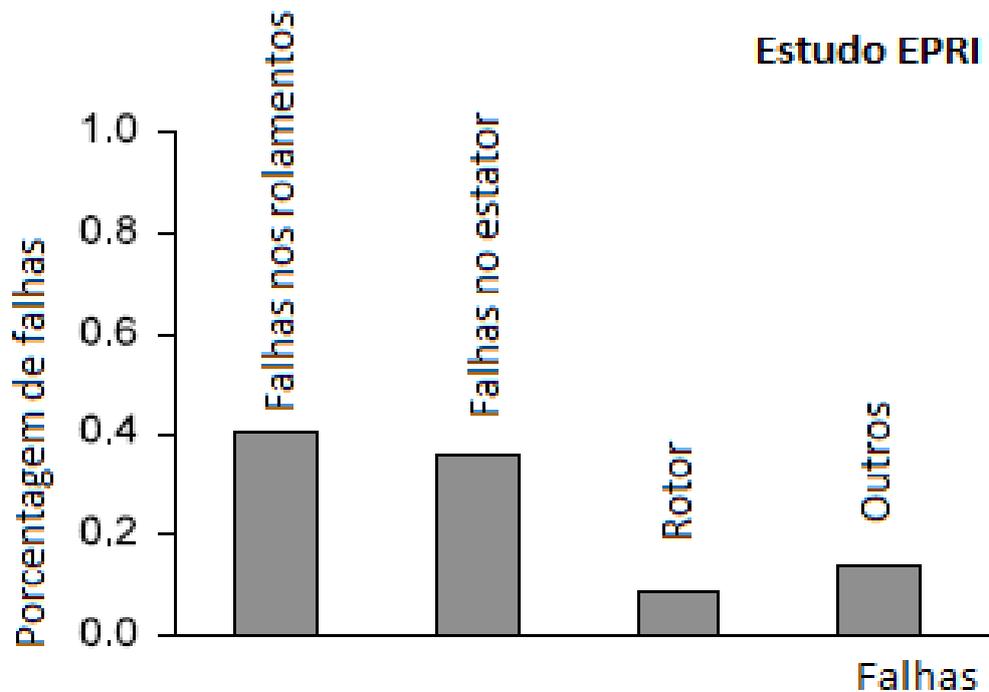


Os percentuais de falhas relacionadas aos componentes dos motores de indução são de aproximadamente: 38% no estator, 10% no rotor, 40% nos rolamentos e 12% nos demais. As principais falhas apresentadas no rotor são: excentricidade (estática ou dinâmica) e desalinhamento. No estator encontram-se também problemas de excentricidade, além de folga nas chapas (Thomson & Fenger, 2001).

Além disto, falhas nos rolamentos, que também podem causar excentricidade do rotor, representam grande parte das falhas em motores de indução. Defeitos como atritos no rotor e fadiga do rotor e/ou estator são

consequências de falhas mencionadas anteriormente (AL KAZZAZ & Singh, 2003).

Figura 7 - Estudo EPRI



Desta forma, muitos estudos vêm sendo concentrados na busca em aprofundar conhecimentos nesses três componentes, de forma a aumentar o tempo médio entre falhas (MTBF) e, conseqüentemente, a confiabilidade dos motores (BONNETT & YUNG, 2008).

## 2.4 Falha de Rolamento

As falhas em rolamentos são as principais causas para os baixos índices de produtividade e disponibilidade de algumas indústrias. O rolamento é um componente mecânico encontrado em uma gama enorme de aplicações, 99% dos processos produtivos existe pelo menos um rolamento em operação e eles são itens cruciais na grande maioria das plantas industriais. Tem como função sustentar o eixo e substituir o atrito que existe entre o eixo e o mancal, por uma fricção rolante.

Conforme ilustrado na Figura 8, um rolamento é composto por uma pista externa, pista interna, esferas, gaiola e escudo.

Figura 8 - Partes constituintes de um rolamento. Fonte: Adaptado de BONES (2011)



Dentre as causas da deterioração dos rolamentos, podem ser citadas as correntes de modo comum, que circulam pelos mesmo em função da carga eletrostática induzida no eixo do motor e as oscilações de conjugado devido a barras quebradas no rotor ou em função dos harmônicos de corrente de baixa ordem, presentes nos acionamentos que utilizam inversores.

Especificamente, no caso dos MIT acionados por inversores de frequência, as deteriorações dos rolamentos podem ser associadas às correntes de modo comum, que circulam pelos rolamentos em função da carga eletrostática induzida no eixo do motor as oscilações de conjugado devido às barras quebradas no rotor ou em função dos harmônicos de corrente de baixa ordem (MUETZE & BINDER, 2007).

Para as indústrias, a manutenção de rolamentos é um desafio. Somente 10% a 20% dos rolamentos alcançam sua vida útil projetada. A manutenção corretiva, no caso a substituição do rolamento defeituoso, é a ação mais barata, se comparada a outros casos de falhas, porém, é a mais complicada de se realizar (SILVA, 2008).

O *IEEE GUIDE (2007)*, por sua vez, elencou as seguintes causas como sendo as mais comuns para as falhas nos rolamentos:

- Sobrecarga térmica;
- Lubrificação inadequada ou excessiva;
- Contaminação;
- Carga excessiva;
- Vibração;
- Desalinhamento;
- Correntes de falta do eixo para terra;
- Manipulação ou montagem incorretas;
- Aplicação inadequada;
- Danos ocorridos durante o transporte ou armazenamento.

Outro fator já conhecido que provoca o desgaste dos rolamentos é o acionamento do motor de indução por meio de inversores de frequência. A substituição de rolamento defeituosos, é a manutenção corretiva mais barata, em relação aos outros tipos de falhas. Porém, a detecção deste tipo de falha é a mais complexa, e também, é a falha que mais resulta em quebras de motores (SILVA, 2008).

Quando um motor começa a desenvolver um tipo de falha, ocorrem mudanças nos sinais de vibração, alteração no fluxo magnético, variação na temperatura, variação na corrente do estator, ruídos, entre outras (Araújo, 2011). Desta forma, a detecção de falha, pode ser realizada através de técnicas de processamento de sinais (Godoy, 2016).

## **2.5 Classificação inteligente de falhas**

A proposta deste trabalho considera o emprego do classificador *Perceptron* Multicamadas, que será detalhada na próxima seção.

### **2.5.1 Redes Neurais Artificiais**

Uma RNA pode ser definida como sendo uma estrutura de processamento (rede), passível de implementação em dispositivos eletrônicos, composta por um número de unidades interconectadas (neurônios artificiais), sendo que cada unidade apresenta um comportamento específico de entrada/saída (computação local), determinado pela sua função de transferência, pelas interconexões com outras unidades, dentro de um raio de vizinhança, e possivelmente pelas entradas externas. (Castro & Von Zuben)

As RNAs, são modelos computacionais inspirados no funcionamento do sistema nervoso de seres vivos. Estas redes são compostas por unidades de

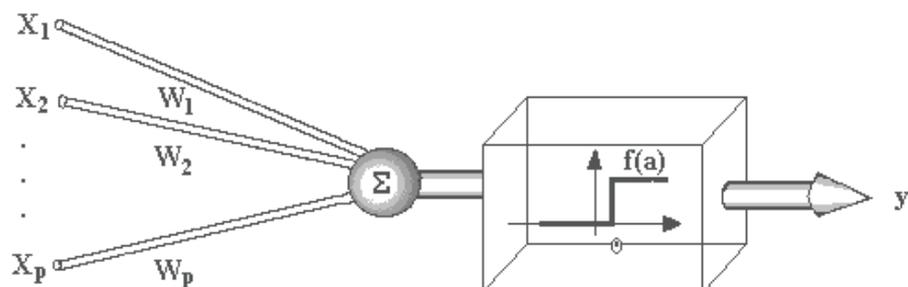
processamento que representa os neurônios, e que estão associadas a alguns pesos, que representam as conexões sinápticas. Assim, o conhecimento adquirido é propagado por todos os neurônios, alterando os pesos sinápticos. Na fase de treinamento ou aprendizagem, os pesos sinápticos são ajustados ao longo da rede de neurônios até que se obtenham padrões de respostas aos estímulos (entradas) que estejam de acordo com os valores que se deseja (Silva, Spatti, & Flauzino, 2016)

No contexto de diagnóstico de falhas em máquinas elétricas, as RNAs tem sido objeto de consideráveis pesquisas recentes (Godoy, 2016). Um dos motivos, está no fato de a arquitetura de processamento das RNAs fornece um desempenho superior a modelos convencionais, pois, estas redes são capazes de aprender e principalmente generalizar o conhecimento adquirido (Gongora, 2013).

A operação de uma unidade de processamento, proposta por McCulloch e Pitts em 1943, pode ser resumida da seguinte maneira: (McCulloch & Pitts, 1943)

- Sinais são apresentados à entrada;
- Cada sinal é multiplicado por um número, ou peso, que indica a sua influência na saída da unidade;
- É feita a soma ponderada dos sinais que produz um nível de atividade;
- Se este nível de atividade exceder um certo limite (*threshold*) a unidade produz uma determinada resposta de saída.

Figura 9 - Esquema de unidade McCulloch – Pitts



Suponha que tenhamos  $p$  sinais de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_p$  e pesos  $w_1, w_2, \dots, w_p$  e limitador  $t$ ; com sinais assumindo valores booleanos (0 ou 1) e pesos valores reais.

Neste modelo, o nível de atividade “a” é dado por:

$$a = w_1X_1 + w_2X_2 + \dots + w_pX_p$$

A saída “y” é dada por

$$y = 1, \text{ se } a \geq t$$

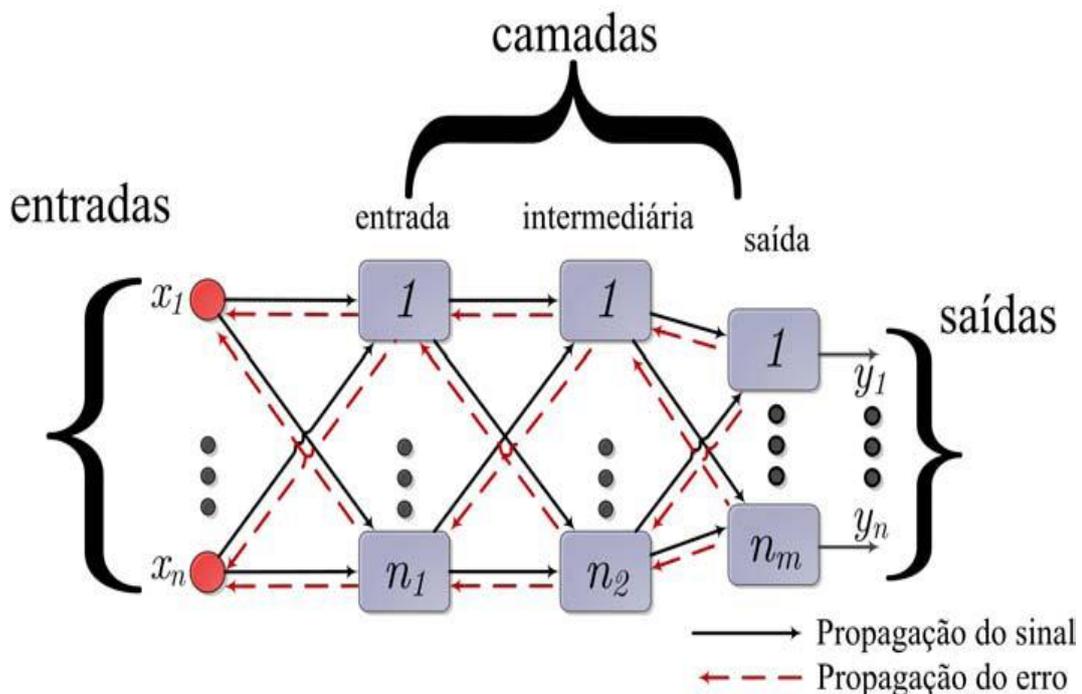
$$y = 0, \text{ se } a < t$$

A maioria dos modelos de redes neurais possui alguma regra de treinamento, onde os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. (USP, s.d.)

Alguns dos fatos que justificam a escolha de RNAs para o processo de classificação de falhas neste trabalho, são devido ao fato de que as RNAs são caracterizadas por serem capazes de lidar com problemas que possuem:

- Camada de entrada: recebe os sinais externos da rede.
- Camadas intermediárias, multicamadas ou escondidas: extraem informações inerentes ao sistema.
- Camadas de saída: fornece os sinais processados pela rede.

Figura 10 - Representação de uma Rede PMC. Fonte: Sival, Spatti & Flauzino, 2016.



Para o ajuste de peso e do limiar de cada neurônio da rede PCM é realizado um treinamento supervisionado, para que com cada amostra de dados de entrada consiga-se obter a saída desejada (Silva, Spatti, & Flauzino, 2016).

O treinamento supervisionado *backpropagation* (Haykin, 2008), possui duas etapas distintas. A primeira, *Forward*, aplica os valores para as entradas da RNA, e em seguida verifica-se o sinal de resposta na saída, e então, este valor é comparado com o sinal de resposta desejado para esta saída. A segunda etapa, *Backward*, é realizada de forma inversa, ou seja, a partir da saída para a camada de entrada. Assim, o erro produzido pela rede é utilizado no processo de ajuste dos pesos. (Godoy, 2016).

Quando se encerra a primeira etapa, é verificado se o valor de saída é próximo da saída desejada. Caso esse valor de saída não esteja dentro das variações estimadas, inicia-se a segunda etapa, de modo a retropropagar o erro por camada, assim ajustando os pesos sinápticos dos neurônios (Godoy, 2016).

Este procedimento é repetido até que se obtenha o valor dentro de uma faixa de variação estipulada.

## 2.6 Rede *Perceptron* Multicamadas

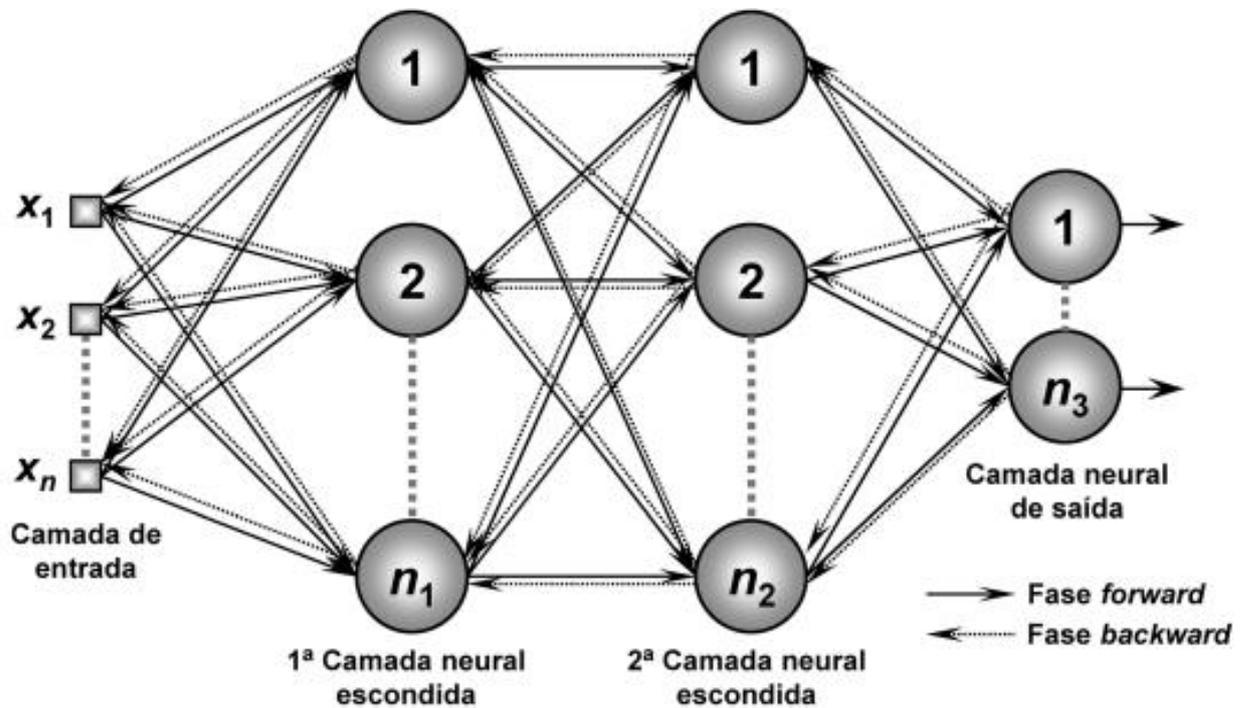
As redes *Perceptron* de múltiplas camadas (PMC) são caracterizadas pela presença de pelo menos uma camada intermediária (escondida) de neurônios, situada entre a camada de entrada e a respectiva camada neural de saída. Conseqüentemente, as redes PMC possuem no mínimo duas camadas de neurônios, os quais estarão distribuídos entre as camadas intermediárias e a camada de saída. (Silva, Spatti, & Flauzino, 2016)

A rede PMC pertence à arquitetura *feedward* de camadas múltiplas, cujo treinamento é efetuado de forma supervisionado. O fluxo de informações na estrutura da rede se inicia na camada de entrada, percorre em seguida as camadas intermediárias, sendo então finalizado na camada neural de saída. (Silva, Spatti, & Flauzino, 2016)

O algoritmo *backpropagation*, conhecido também como regra Delta generalizada, é comumente realizado mediante as aplicações sucessivas de duas fases bem específicas. A ilustração é mostrada na figura abaixo, em que considera uma configuração PMC constituída de duas camadas escondidas, composta de  $n$  sinais em sua camada de entrada, tendo ainda  $n_1$  neurônios na primeira camada neural escondida,  $n_2$  neurônios na segunda camada neural escondida e  $n_3$  sinais associados à camada neural de saída (terceira camada neural). (Silva, Spatti, & Flauzino, 2016)

A figura 11 expõe as fases *forward* e *backward*.

Figura 11 - Ilustração de rede Perceptron multicamadas



A rede PMC utilizada neste trabalho é treinada pelo algoritmo *backpropagation*. Este algoritmo apresenta uma diferença com relação ao algoritmo *feedforward*, visto que no *backpropagation* um erro é obtido a partir do sinal de saída e é enviado a camada de entrada. Esse erro é utilizado no processo de ajuste dos parâmetros internos. (Godoy, 2016)

De acordo com (GOEDEL, SILVA, & SERNIL), o processo de ajuste dos pesos da rede  $w_j$  associados ao  $j$ -ésimo neurônio de saída é feito pelo cálculo do sinal de erro em relação à  $k$ -ésima iteração ou ao  $k$ -ésimo vetor de entrada. Este sinal de erro é calculado pela seguinte equação:

$$e_i(k) = d_j(k) - y_j(k)$$

onde  $d_j(k)$  é a repostadesejada do  $j$ -ésimoneurônio de saída. Somandotodosos errosquadráticosproduzidospelosneurônios de saída da redeemrelação à  $k$ -ésima iteração, tem-se:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p e_j^2(k)$$

Onde  $p$  é o número de neurônios da saída. Para uma configuração de pesos ótima,  $E(k)$  é o minimizado pelo ajuste dos pesos sinápticos  $w_{ji}$ . Os pesos associados à camada de saída da rede são recalculados usando a seguinte expressão:

$$w_{ji}(k) \leftarrow w_{ji}(k) - \eta \frac{\delta E(k)}{\delta w_{ji}(k)}$$

onde  $w_{ji}$  é o peso conectando o  $j$ -ésimo neurônio da camada de saída ao  $i$ -ésimo neurônio da camada anterior e  $\eta$  é a constante que determina a taxa de aprendizado do algoritmo de *backpropagation*. O ajuste dos pesos pertencentes às camadas escondidas é feito de forma análoga.

## 2.7 Transformada Rápida De Fourier

A Transformada Rápida de Fourier ou FFT (Fast Fourier Transform), veio para suprir a necessidade de acelerar o processo de interpolação de grande quantidade de dados por polinômios trigonométricos. (Gonçalves, 2004)

Gonçalves explica que a FFT é um algoritmo rápido da Transformada de Fourier (FT) que consiste em realizar a transição entre variáveis do tempo para a frequência, e vice-versa. Se a FT for aplicada em um sistema linear, a saída que será obtida é uma superposição de respostas do sistema, sendo estas senóides complexas.

Existem algumas formas de representação em Fourier, no caso apresentado, os sinais e sua forma respectiva pode ser aplicado a Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT), que se aplica a sinais não periódicos em tempo discreto, representada pela seguinte forma:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N_a-1} x(n) e^{-j\left(\frac{2\pi}{N_a}\right)mn}$$

Onde:

- $n$  é um número inteiro entre  $[0...N_a]$ , que representa o índice do vetor discreto do sinal  $x(n)$ , no domínio do tempo;
- $m$  é um número inteiro entre  $[0...N_a]$ , que representa o índice do vetor discreto do sinal  $X(m)$ , no domínio da frequência;
- $N_a$  é a quantidade total de amostra.

### 3 METODOLOGIA

Devidos às características intrínsecas do MIT, e suas falhas próprias, como mencionado nos Capítulos anteriores, faz-se de extrema importância a análise de defeitos que ocorrem levando em conta sua condição de operação.

Dessa forma, utilizando 3 inversores de frequência distintos para cada um dos motores utilizados, a finalidade será um método de detecção de falhas de rolamento por meio da análise dos sinais de corrente.

A seguir serão apresentadas as características dos motores e inversores utilizados, o método de inserção de cada uma das falhas e os métodos de análises que serão utilizados para classificação.

#### 3.1 Banco de Dados

##### 3.1.1 Motores

Os parâmetros e características básicas do motor estão na Tabela abaixo. Será utilizado para os ensaios de rolamentos, com acionamento por meio de inversores de frequência. A conexão do motor foi configurada em Delta com a tensão de alimentação de linha dos inversores de frequência em 220V equilibrada.

Tabela 1 - Parâmetros e características dos MIT utilizados

Parâmetros	Motor
Fabricante	WEG
Potência (kW)	0,74
Frequência (Hz)	60
Tensão de alimentação (V)	230/380
Corrente de alimentação (A)	3,02/1,75
Número de pólos	4
Número de ranhuras	36
Fases rebobinadas	-
Nível de curto-circuito (%)	-
Velocidade (rpm)	1730
Torque nominal (N.m)	4,1
Número de barras do rotor	44

##### 3.1.2 Inversores de Frequência

Segue abaixo os modelos de inversores utilizados no trabalho e suas respectivas características:

Tabela 2 - Parâmetros e características dos inversores utilizados

Parâmetros	Sinamics G110	Micromaster MM40	ATV12H075M2
Fabricante	Siemens	Siemens	Schneider
Aceleração (s)	3	3	3
Desaceleração (s)	3	3	3
Tipo de controle	V/f	V/f-Vetorial	V/f
Freq. chaveam. (kHz)	8	8	4

A Tabela abaixo apresenta as características gerais e quantidades totais de dados obtidos através do banco de dados utilizados no contexto deste trabalho. Tal banco de dados também foi usado e Lopes (2016), Bazan (2016), Broniera (2014), Godoy (2016) e Palácios (2016), entre outros. Os inversores estão operando com uma frequência síncrona que varia na faixa de 12 a 60 Hz, com intervalos de 6Hz entre cada amostra. O torque de carga aplicado no motor para cada experimento variou-se em 0,5-1,0-1,5-2,0-2,5-3,0-4,0-4,5-5,0 N.m. (Godoy, 2016)

Tabela 3 - Quantidade de aquisições utilizados por defeito

Motor	Condição	Sinamics G110	Micromaster MM440	ATV12H075M2
Motor (0,74kW)	Saudável	70	73	62
	Desgaste 15 minutos	74	74	78
	Desgaste 30 minutos	74	74	78
	Desgaste 60 minutos	74	74	78
	Desgaste 90 minutos	74	74	78

Dessa forma, com o banco de dados já definido, foram induzidas falhas de desgaste nos rolamentos.

## 3.2 Dados Experimentais e Classificação

### 3.2.1 Dados Experimentais

Segundo (Godoy, 2016), devido ao grande número de falhas advindas do rolamento, deve-se aprofundar a investigação causada pelo desgaste gradual de um rolamento ao longo de operação da máquina. Segundo (Suetake, 2012), este tipo de falha é normalmente atribuído ao excesso de vibração, desalinhamento ou excentricidade.

Os MIT quando acionados por inversores de frequência, têm seus sinais de tensão e corrente distorcidos por ruídos provenientes dos chaveamentos do inversor. Para tanto, foram aplicadas diferentes estratégias de amostragem, visando eliminar componentes harmônicos indesejáveis. (Godoy, 2016)

De acordo com Godoy (2016), para tal ação dos testes, foi efetuada a substituição do lubrificante por pasta abrasiva, a qual contaminou os rolamentos após a remoção das blindagens de proteção lateral. Foram consideradas 4 situações distintas de desgaste: desgaste inicial, desgaste médio, desgaste avançado e desgaste severo. Com tempos definidos, respectivamente: 15, 30, 60, 90 minutos.

Figura 12 - Desgaste do rolamento



A figura 13 considera as 4 situações distintas de desgaste (inicial, médio, avançado e severo):

Figura 13 - Contaminação do rolamento com pasta abrasiva



Segue abaixo a especificações do rolamento rígido de esferas utilizado (Modelo NSK 6204):

Tabela 4 - Especificações dos rolamentos

Parâmetros	Especificações
Diâmetro do furo (mm)	20
Diâmetro externo (mm)	47
Largura (mm)	14
Carga dinâmica (kN)	13,5
Carga estática (kN)	6,55
Velocidade (rpm)	32000
Velocidade limite (rpm)	17000

Segundo (Godoy, 2016), após o período de desgaste, os rolamentos foram retirados e lavados com solvente para completa remoção de resíduos. Uma vez limpos, foram secos com ar comprimidos, novamente lubrificadas e montadas nas máquinas para sequência dos ensaios e aquisição de sinais. Após cada processo de desgaste, fica visualmente perceptível a formação de folgas entre as partes componentes do rolamento.

### 3.3 Estrutura e Classificação dos dados

Para que seja feita a classificação de falhas do MIT, serão aplicados métodos para realizar um pré-processamento dos dados de corrente. Tal

aplicação será com os dados do motor saudável e com falhas, com correntes trifásicas do motor. O pré-processamento e para classificação de falhas é utilizada apenas a fase “a”. Com essa etapa concluída, os dados se encontrarão reduzidos e normalizados.

Os dados que serão utilizados serão divididos em 2 grupos: dados de treinamento e dados de teste. Terão proporção de 80% e 20%, respectivamente.

Para classificação dos dados será utilizado a rede neural inteligente *Perceptron* Multicamadas. Serão realizadas duas análises da rede, sendo a primeira com intuito de verificar o desempenho na classificação de dois padrões: motor com falha e motor saudável. A segunda será realizada considerando o motor saudável e todas as falhas em cada um dos casos de 15, 30, 60 e 90 minutos. Os parâmetros utilizados na rede *Perceptron* Multicamadas estão na tabela abaixo.

Tabela 5 - Parâmetros PMC

Parâmetros	Tipo Utilizado
Função de ativação da camada de entrada e camada oculta	Tangente Hiperbólica
Função de ativação da camada de saída	Rampa Linear
Algoritmo de treinamento	<i>Backpropagation</i> com Levenberg-Marquardt

Foi utilizada uma camada oculta durante o processo de classificação. A função de ativação foi escolhida baseada em testes realizados, sendo que a tangente hiperbólica foi a que representou melhor resultado. Segundo Godoy (2016), a função *backpropagation* tem a finalidade de encontrar as derivadas da função de erro com relação aos pesos e bias do RNA.

Para determinação da quantidade de neurônios em cada camada, foram realizados testes, e os parâmetros utilizados para a primeira análise de configuração da rede neural estão na tabela abaixo:

Tabela 6 - Topologia PMC - Classificação Simples

Características	Quantidade
Neurônios na camada de entrada	8
Neurônios na camada oculta	4
Neurônios na camada de saída	2
Neurônios de camadas escondidas	1
Iterações máximas	100

Com essas características, as sequências abaixo foram utilizadas:

Tabela 7- Classificação Simples

<b>Característica</b>	<b>Saída Desejada</b>
Saudável	0 1
Falha	1 0

O número de neurônios está relacionado com a capacidade de aprendizagem da rede. Quanto maior o número de neurônios, mais a rede terá condições de mapear o conjunto de entrada/saída.

Já para a segunda análise de todas as falhas, a topologia será a seguinte:

Tabela 8- Topologia PMC Multiclassificação

<b>Característica</b>	<b>Quantidade</b>
Neurônios na camada de entrada	15
Neurônios na camada oculta	12
Neurônios na camada de saída	5
Neurônios de camadas escondidas	1
Iterações máximas	100

E por fim, a característica da camada de saída, será:

Tabela 9 - Multiclassificação

<b>Característica</b>	<b>Saída Desejada</b>
Saudável	0 0 0 1
Falha inicial	0 0 0 1 0
Falha média	0 0 1 0 0
Falha avançada	0 1 0 0 0
Falha severa	1 0 0 0 0

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Levando em consideração os dados expostos no capítulo 4, os resultados experimentais visam a detecção de falhas em rolamentos de Motores de Indução Trifásico.

### 4.1 Falha de Desgastes no Rolamento

Os resultados serão expostos e divididos em 4 etapas:

1. Corrente no domínio do tempo – Classificação Simples;
2. Corrente no domínio do tempo – Multiclassificação;
3. Corrente no domínio da frequência – Classificação Simples;
4. Corrente no domínio da frequência – Multiclassificação.

E por fim, uma análise geral de todos os resultados.

#### 4.1.1 Corrente no domínio do tempo – Classificação Simples

A tabela 10 representa os resultados obtidos para Classificação Simples, diferenciando dados de motor com falhas de dados de falha de motor saudável. Os inversores também estão expostos: MM40, G110 e ATV.

O primeiro inversor, MM40, é composto por 6480 amostras do motor, totalizando 5184 (80%) para dados de treinamento, e 1296 (20%) para dados de teste. Nota-se que obteve precisão global de 100%, pois obteve precisão de 100% para classificação de falhas e 100% para classificação saudável.

Tabela 10 - Classificação Simples

PMC			
Inversor	Classes	Saudável	Falha
MM40	Saudável	225	0
	Falha	0	1041
G110	Saudável	243	0
	Falha	3	1050
ATV	Saudável	260	5
	Falha	13	1108

Com o inversor G110, utilizando também 6480 amostras, com 5184 para dados de treinamento e 1296 para dados de teste, obteve-se precisão global de 99,8%, pois o motor saudável atingiu precisão de 98,8%.



Tabela 12 - Multiclassificador G110

PMC –G110					
Classes	D.15 min	D.30 min	D.60 min	D.90 min	Saudável
D.15 min	261	212	129	183	168
D.30 min	0	61	0	0	0
D.60 min	0	0	121	0	0
D.90 min	0	0	0	66	0
Saudável	0	0	0	0	94

E por fim, com o inversor ATV e a mesma quantidade de dados da classificação simples, resultou em precisão global de 45,8%, com os seguintes dados:

Tabela 13 - Multiclassificador ATV

PMC –ATV					
Classes	D.15 min	D.30 min	D.60 min	D.90 min	Saudável
D.15 min	286	244	198	78	224
D.30 min	0	46	0	0	0
D.60 min	0	0	71	0	1
D.90 min	0	3	1	184	2
Saudável	0	0	0	0	48

15 minutos: 100%

30 minutos: 15,7%

60 minutos: 26,3%

90 minutos: 70,2%

Analisando os dados obtidos, tem-se que os dados coletados a partir do inversor G110 apresentam maior precisão global.

#### 4.1.3 Corrente no domínio da frequência– FFT – Classificação Simples

A tabela 14 representa os resultados obtidos para Classificação Simples, diferenciando dados de motor com falhas de dados de falha de motor saudável. O primeiro inversor, MM40, é composto por 6480 amostras do motor, totalizando 5184 (80%) para dados de treinamento, e 1296 (20%) para dados de teste. Nota-se que obteve precisão global de 100% para classificação de falha e motor saudável.

Tabela 14 - Classificação Simples

PMC			
Inversor	Classes	Saudável	Falha
MM40	Saudável	225	0
	Falha	0	1041
G110	Saudável	266	0
	Falha	0	1030
ATV	Saudável	295	0
	Falha	0	1091

Com o inversor G110, utilizando também 6480 amostras, com 5184 para dados de treinamento e 1296 para dados de teste, obteve-se precisão de 100%, com 100% de precisão para classificação de falha e também 100% para motor saudável.

Por fim, o inversor ATV totalizando 6930 amostras, sendo 5544 utilizadas para treinamento e 1386 para teste. Este caso, também obteve precisão global de 100%, pois atingiu 100% de precisão para falha e 100% para análise de motor saudável.

Conclui-se que no caso de Classificação simples no domínio da frequência, os três inversores possuem 100% de precisão.

#### 4.1.4 Corrente no domínio da frequência – FFT - Multiclassificação

A tabela 15 apresenta os resultados da Multiclassificação de falhas, com falhas de desgastes de 15, 30, 60 e 90 minutos e também a saudável. Diante dessas premissas, o inversor MM40 foi resultou precisão global de 95,8% com precisão de motor saudável de 97%. As precisões de classificação de desgastes:

15 minutos: 100%

30 minutos: 99,6%

60 minutos: 95,3%

90 minutos: 86,3%

Tabela 15- Multiclassificador MM40

PMC – MM40					
Classes	D.15 min	D.30 min	D.60 min	D.90 min	Saudável
D.15 min	258	1	12	34	8
D.30 min	0	268	0	0	0
D.60 min	0	0	241	0	0
D.90 min	0	0	0	214	0
Saudável	0	0	0	0	260

Em relação ao inversor G110, o procedimento adotado da matriz foi o mesmo, porém apresentou precisão global de 95,4%. A classificação de motor saudável foi de 100% e para falhas de desgastes:

15 minutos: 100%

60 minutos: 100%

30 minutos: 88,7%

90 minutos: 88,6%

Tabela 16 -Multiclassificador G110

PMC –G110					
Classes	D.15 min	D.30 min	D.60 min	D.90 min	Saudável
D.15 min	281	29	0	31	0
D.30 min	0	227	0	0	0
D.60 min	0	0	260	0	0
D.90 min	0	0	0	240	0
Saudável	0	0	0	0	228

Por fim, com o inversor ATV e a mesma quantidade de dados da classificação simples, resultou em precisão global de 84,5%, com os seguintes dados:

Tabela 17 - Multiclassificador ATV

PMC –ATV					
Classes	D.15 min	D.30 min	D.60 min	D.90 min	Saudável
D.15 min	287	46	86	82	1
D.30 min	0	283	0	0	0
D.60 min	0	0	180	0	0
D.90 min	0	0	0	199	0
Saudável	0	0	0	0	267

15 minutos: 100%

60 minutos: 67,7%

30 minutos: 83,8%

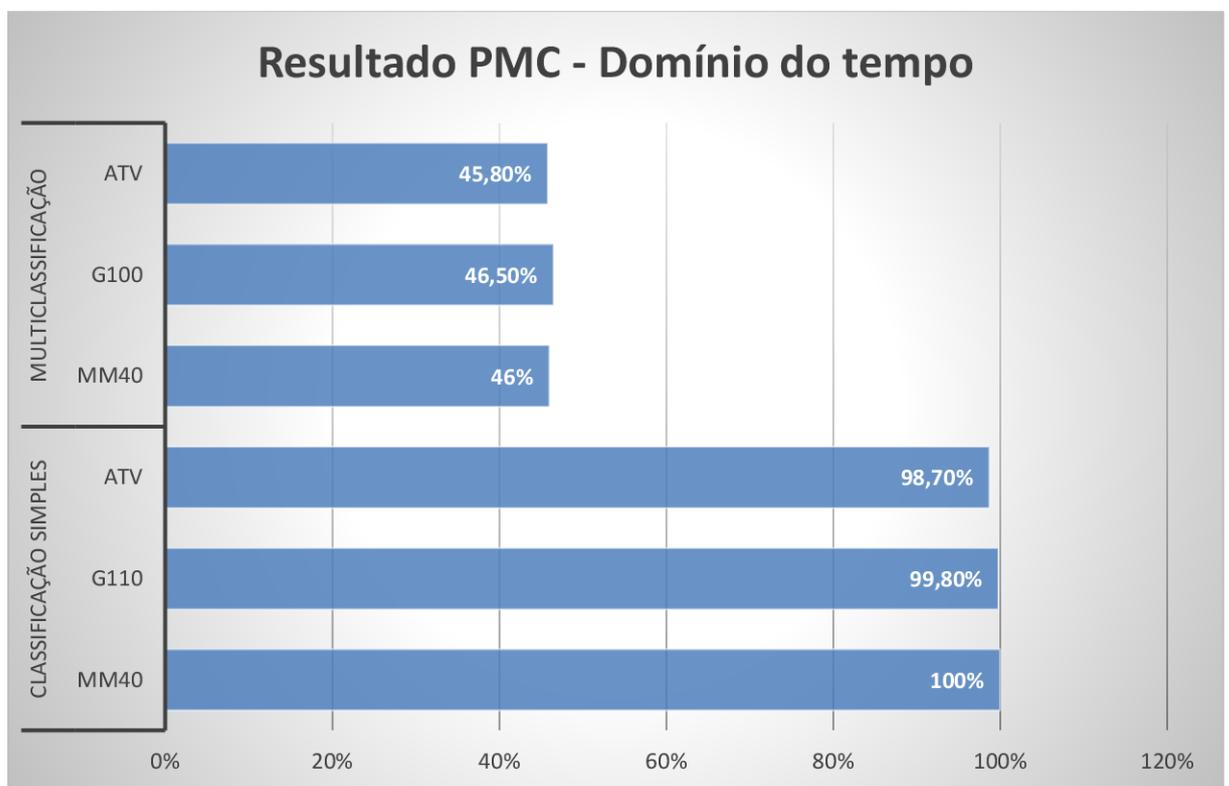
90 minutos: 70,8%

E por fim, o inversor MM40 é o com maior precisão global entre os 3, quando se trata de Multiclassificação da corrente no domínio da frequência.

#### 4.2 Análise de resultados da Rede *Perceptron* Multicamadas

O gráfico da figura 14 contém a comparação da Rede *Perceptron* Multicamadas quando Classificação Simples e Multiclassificação para corrente no domínio do tempo.

Figura 14 - Resultado no domínio do tempo



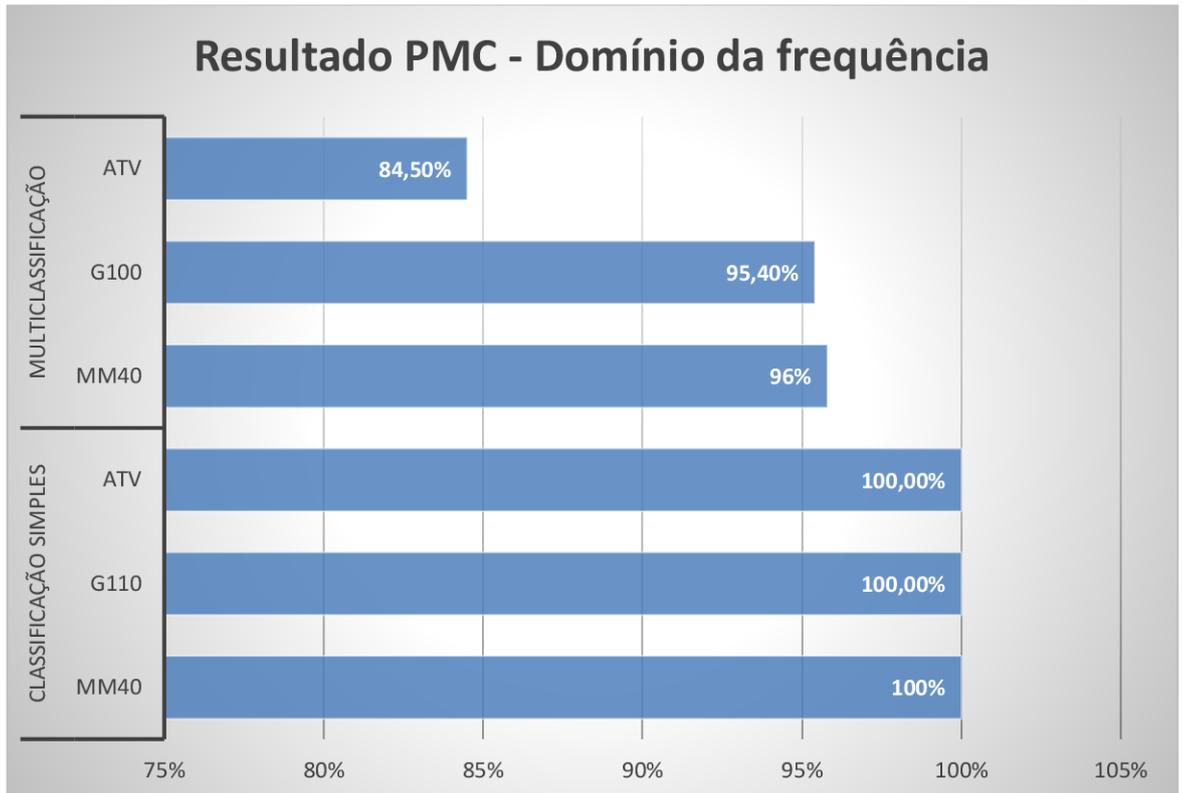
Em relação ao domínio do tempo, percebe-se que a Classificação Simples possui inversores de maior precisão que a Multiclassificação.

No aspecto apenas da Classificação simples, o inversor de maior precisão global é o MM40. Nota-se que o MM40 possui precisão de 100% utilizando Classificação Simples, e quando se trata de Multiclassificação, cai para 46%, perdendo assim sua eficiência.

Já o motor acionado pelo inversor ATV é de menor precisão. Todo esse processo influencia diretamente a classificação de falhas em MIT.

Abaixo, segue o gráfico da figura 15 com a comparação da Rede *Perceptron* Multicamadas quando Classificação Simples e Multiclassificação para corrente no domínio da frequência:

Figura 15- Resultado no domínio da frequência

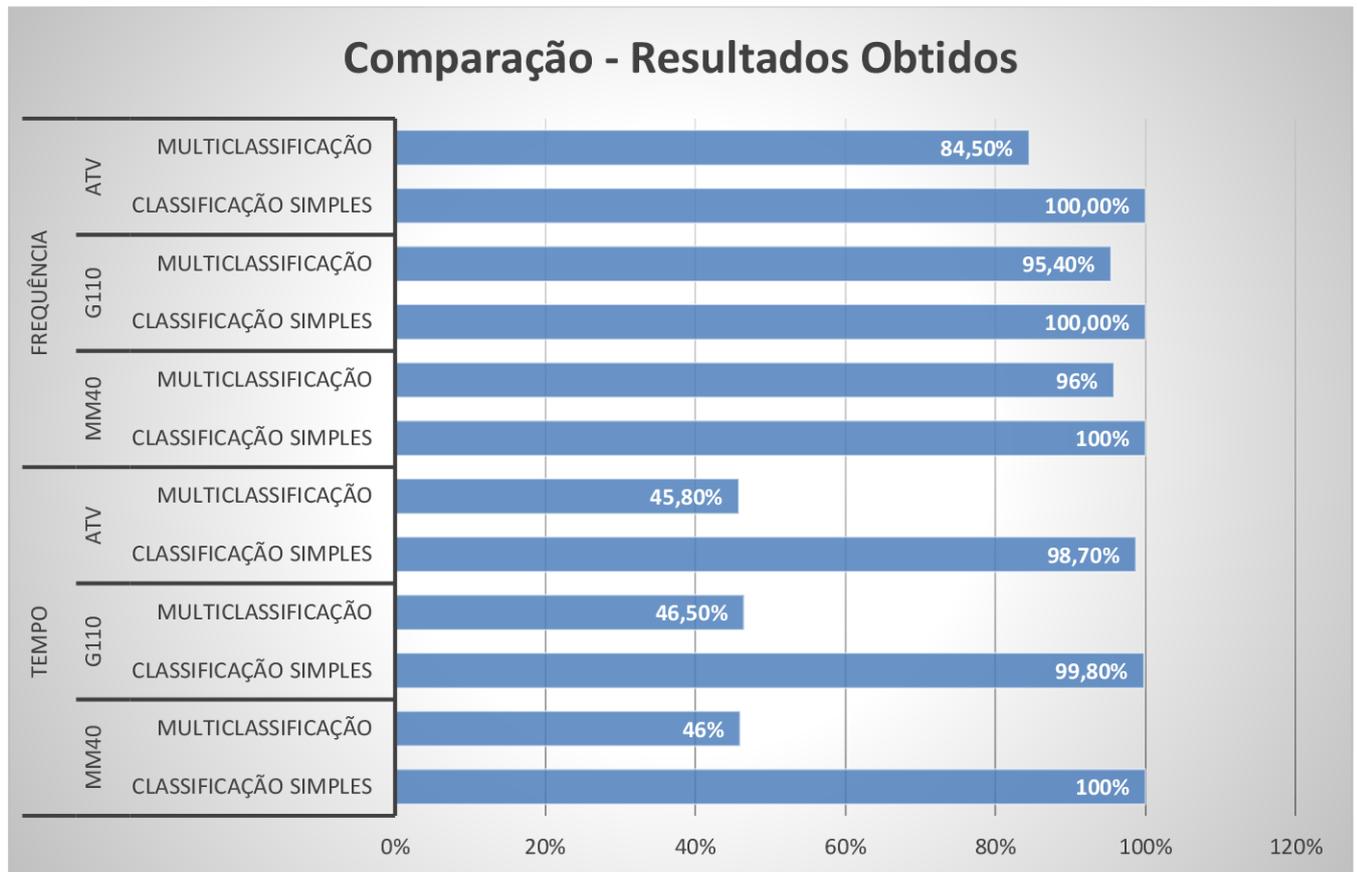


Se tratando do domínio da frequência, o método por Classificação Simples possui 100% de precisão com os inversores MM40, G110 e ATV. Quando os mesmos inversores são utilizados no método de Multiclassificação, a precisão diminui, mas não tanto quanto no domínio do tempo, e o inversor MM40 é o que mantém maior precisão global dos três.

Sendo assim, a Classificação Simples é a mais eficiente no método de Multiclassificação.

A partir dos resultados obtidos, na Figura 16 é possível efetuar uma análise de eficiência dos métodos apresentados anteriormente, por meio de sua precisão.

Figura 16 - Resultados obtidos



A classificação simples possui 100% de precisão quando é classificada no domínio da frequência. Já no domínio do tempo a precisão é alta, mas os inversores G110 e ATV não são 100%. No caso da Multiclassificação, o que prevalece a maior precisão é claramente no domínio da frequência.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho expõem a precisão da Rede *Perceptron* Multicamadas como classificadora de falhas de rolamento de Motor de Indução Trifásico, apresentando a precisão e viabilidade dos Método de Processamento, comprovado por testes (domínio do tempo e domínio da frequência) com resultados expostos, sendo uma boa ferramenta para manutenção preditiva da mesma.

Tendo em vista as características e parâmetros do motor utilizado no experimento para o ensaio de falhas de desgaste no rolamento, e também os três diferentes tipos de Inversores de Frequência, Sinamics G110, Micromaster MM40 e ATV12H075M2, com frequências de chaveamento 8kHz, 8kHz e 4kHz, respectivamente, e a classificação dos inversores de acordo com o determinado tipo de falha exposto no capítulo 4.2, pode-se observar que a falha com corrente no domínio da frequência em classificação simples, não houve diferença de precisão entre os inversores.

Porém, conclui-se que os inversores de maiores precisões, são os que possuem maior frequência de chaveamento, no caso exposto, Sinamics G110 e Micromaster MM40, ambos com 8kHz. Entre esses dois inversores citados, ainda assim o Micromaster MM40 mais se destaca na categoria, isso se acontece, além da frequência de chaveamento, devido ao controle V/f – vetorial que apresenta algumas vantagens, como: alta precisão de regulação de velocidades, torque linear para aplicações de tração ou posição, quando em baixa velocidade a operação do torque é suave não oscila, embora haja variação de carga, etc.

Assim, conclui-se que para o caso em estudo neste trabalho, a Classificação no domínio da frequência é mais efetiva e precisa que no tempo, e os melhores resultados de classificação e precisão global foram obtidos a partir dos dados coletados a partir da máquina acionada pelo inversor MM40 tanto na Classificação Simples, quanto na Multiclassificação.

Dessa forma, fica passível de testes para um trabalho futuro, a utilização de outros modelos de motores de indução e inversores de frequência para novas classificações de falhas, podendo ser incluídas outras Redes Neurais para tais fins.



## Referências

- AL KAZZAZ, S., & Singh, G. (2003). *Induction Machine Drive Condition Monitoring and Diagnostic Research - A Survey*. . Electric Power System Research.
- Araújo, R. d. (2011). *Desaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência*. UFMG, Belo Horizonte.
- Avelar, V., Baccarini, L., & Amaral, G. (2011). *Desenvolvimento de um sistema inteligente para diagnóstico de falhas nos rolamentos do estator de motores de indução*. X SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.
- Baccarini, L. M. (2005). *Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução*. Belo Horizonte.
- BELLINI, A., FILIPPETTI, F., TASSONI, C., & CAPOLINO, G. (2008). Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 55, 12, p. 4109-4126.
- BONNETT, A., & YUNG, C. (jan./feb. de 2008). Increased efficiency versus increased reliability. *IEEE Industry Applications Magazine*, 14, 1, 29-36.
- Castro, L., & Von Zuben, F. (s.d.). *Redes Neurais Artificiais*. Unicamp.
- Chapman, S. J. (2013). *Fundamentos de Máquinas Elétricas* (5 ed.). Amgh Editora.
- Eletric, S. (2017). *Inversores de Frequência*. Fonte: Schneider Eletric:  
<https://www.se.com/br/pt/product-category/2900-inversores-de-freque%C3%A7%C3%A3o-e-soft-starters/>
- FAIZ, J., GHORBANIAN, V., & EBRAHIMI, B. (2012). Locating broken bars in line-start and inverter-fed induction motors using modified winding function method. *Electromagnetics*, 32, 3, 173-192.
- Godoy, W. F. (2016). *Multiclassificador Inteligente de Falhas no Domínio do Tempo em Motores de Indução Trifásico Alimentado por Inversores de Frequência*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- GOEDEL, A., SILVA, I. N., & SERNIL, P. J. (s.d.). *Uma abordagem neural para estimação de conjugado em motores de indução* (Vol. 17). Scielo Sba Controle & Automação.
- Gonçalves, L. A. (2004). *Um Estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em Processamento de Imagens*. Porto Alegre.
- Gongora, W. (2013). *Uma abordagem neural no diagnóstico de falhas em rolamento em motores de indução trifásicos*. Tese (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Mestrado em Engenharia Elétrica.
- Henao, H., Demian, C., & Capolino, G. (2003). *A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external*. Industry Applications, IEEE Transactions.
- Inversores de Frequência*. (s.d.). Fonte: Escola da vida:  
[http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento\\_12009/Inversores\\_de\\_Frequencia.pdf](http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12009/Inversores_de_Frequencia.pdf)

- Karabadjji, N., Seridi, H., Khelf, I., Azizi, N., & Boulkroune, R. (oct, 2014). *Improved decision tree construction based on attribute selection and data sampling for fault diagnosis in rotating machines*. Engineering Applications of Artificial Intelligence.
- Massirer, D. (2007). *Sistema especialista protótipo para auxílio à verificação da estrutura de produto de motores elétricos*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- McCulloch, W., & Pitts, W. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*.
- MUETZE, A., & BINDER, A. (2007). Practical rules for assessment of inverter-induced bearing currents in inverter-fed ac motor up to 500 kw. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Rashid. (1993). *Power Electronics: circuits, devices and applications*. New Jersey.
- Rashid, M. (1993). *Incremental kinematics for finite element applications*; .
- Santos, F., Silva, I., & Suetake, M. (10 de 2012). Sobre aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de falhas em máquinas de indução -uma visão geral. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*.
- SAUER, I. L. (2015). *Energia Elétrica: crise, diagnóstico e saída*. Revista USP.
- Silva, d. N., Spatti, D. H., & Flauzino, R. A. (2016). *Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas* . São Paulo: Artliber.
- SILVA, J. (2008). Aplicação da análise de componentes principais (PCA) no diagnóstico de defeitos em rolamentos através da assinatura elétrica de motores de indução. *Tese (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá*.
- Silva, P. L. (2011). *Inversor de Frequência*. Rio de Janeiro.
- Society, I. P. (2007). *IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis*. Nova York.
- Suetake, M. (2012). *Sistemas Inteligentes para o Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásico*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Escola de Engenharia de São Carlos.
- Thomson, W., & Fenger, M. (2001). *Current signature analysis to detect induction motor faults*. Industry Applications Magazine, IEEE.
- USP. (s.d.). Fonte: <https://sites.icmc.usp.br/andre/research/neural/#trei>
- WEG. (s.d.). Acesso em 01 de 5 de 2018, disponível em Motores elétricos de indução trifásico de baixa e alta tensão.: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/weg-motores-de-inducao-trifasicos-de-baixa-e-alta-tensao-linha-m-rotor-de-gaiola-horizontalis-11066437-manual-portugues-br.pdf>
- WEG. (s.d.). Acesso em 03 de mai de 2018, disponível em Motores de indução alimentados por inversores de frequência pwm.: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/weg-motores-de->

inducão-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-artigo-tecnico-portugues-br.pdf

WEG. (s.d.). *WEG Automação - Guia de aplicação de Inversores de Frequência*. Fonte: [www.weg.com.br](http://www.weg.com.br).