

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

FERNANDO KENJI NAKANO

**DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO
O MÉTODO OFF-LINE AVALIANDO A RESISTÊNCIA ESTATÓRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

FERNANDO KENJI NAKANO

**DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO
O MÉTODO OFF-LINE AVALIANDO A RESISTÊNCIA ESTATÓRICA**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Goedtel

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fernando Kenji Nakano

Deteção de falhas em motores de indução trifásico utilizando o método off-line avaliando a resistência estatórica

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 08/06/2015 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). Marcelo Favoretto Castoldi - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - (Coorientador)

Prof(a). Me(a). Demerval Mizuyama - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o qual me guiou em todos os momentos, me dando força, saúde e me capacitando durante todos os anos em que estive na universidade. Agradeço a Ele pelo privilégio de poder estar concluindo mais um desafio na minha vida.

Aos meus pais, que me apoiaram em todos os momentos, acreditando em meu potencial, sempre se dedicando e proporcionando condições para que eu pudesse conquistar mais um sonho. Sem eles, jamais chegaria onde cheguei e sou eternamente grato por todo empenho que tiveram para que não faltasse apoio, educação e carinho.

Agradeço à minha namorada Taynara Pitoli de Oliveira por estar ao meu lado em todos os momentos, dando seu apoio, dedicação, carinho e amor.

À todos os meus professores, pelo apoio, ensinamentos e participação ao longo desta jornada.

Agradeço aos professores Dr. Marcelo Favoretto Castoldi e Dr. Alessandro Goedel pela orientação dada, sendo de grande importância para a realização e conclusão deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo suporte e condições ofertadas para minha formação acadêmica e profissional.

À todos os meus amigos de faculdade, pelos momentos divertidos e de descontração que compartilhamos.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo Da Vince

RESUMO

NAKANO, Fernando Kenji. Detecção de falhas em motores de indução trifásico utilizando o método off-line avaliando a resistência estatórica. 2015. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Os curtos-circuitos nos enrolamentos do estator são considerados como uma das principais falhas que ocorrem em um motor de indução trifásico (MIT), influenciados pela qualidade do isolamento entre as espiras e entre as fases das bobinas no interior do motor. Há diversos fatores que afetam a vida útil do isolamento dos enrolamentos do estator, os quais podem ser destacados: sobrecargas térmicas, esforços dielétricos, descargas parciais, fenômenos transitórios na tensão de alimentação, esforços mecânicos, agentes ambientais, além do próprio envelhecimento gradativo do isolamento. Uma das formas de se estar ciente quanto à qualidade do enrolamento, é por meio de um monitoramento periódico a fim de assegurar que os níveis de curtos-circuitos, os quais afetam o rendimento do motor, não ultrapassem dos níveis toleráveis, garantindo assim que a falha presente no enrolamento não se torne catastrófica para o motor. Além disso, a detecção da falha em seu estado inicial pode evitar danos maiores ao motor, os quais afetam os processos no qual este está sendo utilizado, evitando prejuízos maiores devido ao tempo de produção perdido, além de evitar custos elevados de manutenção e reparo. Nota-se, portanto, a importância do desenvolvimento de métodos capazes de detectar e classificar os níveis de curto nos enrolamentos, de forma confiável e eficaz, a fim de garantir um bom funcionamento e máximo desempenho dos motores de indução. Baseado nestas informações, este projeto consiste em desenvolver um método off-line capaz de detectar e classificar níveis de curto em um motor de indução trifásico, por meio da análise da resistência estatórica, levando em consideração a influência da temperatura sobre a resistência.

Palavras-chave: Curtos-circuitos. Motor de Indução Trifásico. Enrolamento de Estator. Método Off-line. Detecção de Falha.

ABSTRACT

NAKANO, Fernando Kenji. Fault detection in three phase induction motors using the off-line method evaluating a stator resistance. 2015. 61f. Term paper (Bachelor of Electrical Engineering) Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Short circuits in the stator windings are considered as one of the major failures that occur in a three-phase induction motor (MIT), influenced by the quality of the insulation between the windings and between the phases of the coils inside the motor. There are several factors that affect the life of the insulation of the stator windings, which can be highlighted: thermal overload, dielectric efforts, partial discharges, transient phenomena in power supply, mechanical stress, environmental agents, besides himself gradual aging of insulation. One way to be aware about the quality of winding is through periodic monitoring to ensure that the short-circuit levels, which affect engine performance, do not exceed the tolerable levels, thus ensuring that the failure in the winding does not become catastrophic for the engine. In addition, fault detection in its initial state can avoid further damage to the engine, which affect the processes in which it is being used, avoiding greater losses due to lost production time and avoids high costs of maintenance and repair. Note, therefore, the importance of developing methods to detect and classify the short levels in the windings, reliably and effectively in order to ensure satisfactory operation and maximum performance of induction motors. Based on this information, this project is to develop an off-line method to detect and classify levels in a short induction motor, by analyzing the stator resistance, taking into account the influence of temperature on the resistance.

Keywords: Short circuits. Three-phase Induction Motor. Stator Winding. Method Offline. Fault Detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução dos Motores Elétricos.....	16
Figura 2 – Vista em Corte do Motor de Indução Trifásico com Rotor em Gaiola de Esquilo.....	16
Figura 3 – Estator e Carcaça dos Motores de Indução.....	17
Figura 4 – Rotor Gaiola de Esquilo.....	18
Figura 5 – Rotor Bobinado.....	19
Figura 6 – Enrolamento Trifásico.....	29
Figura 7 – Campo Girante em Máquinas de Indução Trifásico.....	21
Figura 8 – Circuito Equivalente do Estator de um Motor de Indução Polifásico.....	23
Figura 9 – Circuito Equivalente Simplificado do Estator de um Motor de Indução.....	24
Figura 10 – Vida Útil do Material Isolante dos Enrolamentos em Função da Temperatura.....	27
Figura 11 – Circuito R-L.....	34
Figura 12 – Materiais Utilizados nos Testes em Bancada.....	41
Figura 13 – Esquema de Ligação para o Processo Experimental.....	42
Figura 14 – Curva de Corrente Aquisitada.....	43
Figura 15 – Curva de Corrente Filtrada.....	44
Figura 16 – Curvas de Corrente para Nível de Curto de 0%.....	46
Figura 17 – Curvas de Corrente para Nível de Curto de 1%.....	49
Figura 18 – Curvas de Corrente para Nível de Curto de 3%.....	50
Figura 19 – Curvas de Corrente para Nível de Curto de 5%.....	51
Figura 20 – Curvas de Corrente para Nível de Curto de 10%.....	52
Figura 21 – Curvas de Corrente para Nível de Curto de 15%.....	53
Figura 22 – Curvas de Corrente para Nível de Curto de 20%.....	54
Figura 23 – Porcentagem de Curto no Enrolamento X Erro Quadrático Médio.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de Ocorrência de Falhas nos Principais Componentes do Motor.....	12
Tabela 2 – Efeito da Temperatura Ambiente na Vida Útil do Isolamento dos Enrolamentos.....	29
Tabela 3 – Valores de Coeficientes de Variação de Temperatura.....	37
Tabela 4 – Materiais Utilizados nos Testes em Bancada.....	41
Tabela 5 – Resultados Obtidos para um Curto Aplicado de 0%.....	45
Tabela 6 – Resultados Obtidos para um Curto Aplicado de 1%.....	47
Tabela 7 – Resultados Obtidos para um Curto Aplicado de 3%.....	47
Tabela 8 – Resultados Obtidos para um Curto Aplicado de 5%.....	47
Tabela 9 – Resultados Obtidos para um Curto Aplicado de 10%.....	48
Tabela 10 – Resultados Obtidos para um Curto Aplicado de 15%.....	48
Tabela 11 – Resultados Obtidos para um Curto Aplicado de 20%.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS	11
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS (MIT).....	15
2.1 A MÁQUINA “MOTOR DE INDUÇÃO”	15
2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	16
2.2.1 Estator	17
2.2.2 Rotor	17
2.3 CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE	19
2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DO ESTATOR	22
3 FALHAS COMUNS EM MOTORES DE INDUÇÃO.....	25
3.1 FALHAS NO ESTATOR.....	26
3.1.1 Envelhecimento do Isolamento dos Enrolamentos	27
3.1.3 Esforços Dielétricos.....	30
3.1.4 Descargas Parciais	30
3.1.5 Fenômenos Transitórios na Tensão de Alimentação	31
3.1.6 Esforços Mecânicos	32
3.1.7 Agentes Ambientais	33
4 ANÁLISE DO CIRCUITO DO ESTATOR	33
4.1 ANÁLISE TRANSIENTE DE CIRCUITO DE PRIMEIRA ORDEM	33
4.2 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA EM FUNÇÃO TEMPERATURA.....	36
5 MÉTODO PROPOSTO	38
5.1 ETAPA TEÓRICA	38
5.2 ETAPA EXPERIMENTAL	39
6 PROCEDIMENTOS E RESULTADOS	41
6.1 MATERIAIS UTILIZADOS	41
6.2 ETAPAS DO PROCESSO EXPERIMENTAL	42
6.3 RESULTADOS OBTIDOS	43
7 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são amplamente utilizados, nos mais diversos tipos de aplicações, devido à capacidade de promover a transformação de energia elétrica em energia mecânica com pequenas perdas, o que os tornam máquinas com rendimento energético elevado (GUEDES, 1994).

Entre os diversos tipos presentes no mercado, o motor de indução, também conhecido como motor assíncrono, destaca-se por apresentar um princípio de funcionamento simples, construção robusta, pouca necessidade de manutenção, baixo custo e possibilidade de emprego em praticamente qualquer aplicação, podendo estar presente em ambientes hostis, explosivos, empoeirados, etc. (GUEDES, 1994).

Segundo dados, de 2010, do Balanço Energético Nacional foram constatados que, em média, cerca de 49% das cargas elétricas industriais são compostas por motores de indução, chegando a 70% em algumas regiões do país. Atualmente, os motores de indução representam mais de 90% do total de motores utilizados nas indústrias (ANNUNCIAÇÃO, 2011).

As partes rotativas de um motor de indução não requerem conexões elétricas físicas, pois por meio da indução eletromagnética é proporcionada a transferência de energia da parte estacionária à parte rotativa. O enrolamento estacionário, chamado estator, pode gerar um campo magnético rotativo, o qual induz uma força eletromotriz alternada e correntes no rotor. A corrente induzida no rotor e o campo girante do enrolamento estacionário interagem, produzindo assim, torque no motor.

As características de torque e velocidade estão relacionadas à resistência e reatância do motor. Portanto, com diferentes proporções de resistência e reatância em seu circuito, é possível alcançar diferentes características de torque e velocidade (HUBERT, 1991).

Entre os motores de indução, o Motor de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo (MIRGE) destaca-se dos demais, pois suas características diferenciadas atribuídas à sua robustez, longa vida útil e quase ausência de manutenção o torna mais atraente, especialmente no que diz respeito ao preço (GOEDTEL, 2007).

Embora os motores de indução sejam máquinas robustas, em muitos casos estão sujeitos a esforços indesejáveis. À medida que vão sendo utilizados e expostos

a esforços excessivos, ocorre a degradação de seus componentes internos, provocando assim o surgimento de falhas.

Pesquisadores têm estudado uma série de falhas em tais motores, entre as quais podemos destacar: falha nos enrolamentos, estator ou rotor desbalanceados, barras quebradas do rotor, excentricidades e falhas nos rolamentos (SIDDIQUE et al, 2005).

Entre as falhas elétricas, as mais comumente ocorrentes estão relacionadas ao estator e ao rotor. As falhas no enrolamento estatórico geralmente estão associadas às deficiências apresentadas pelos materiais isolantes e contribuem em torno de 30% a 40% de todas as falhas presentes no motor de indução (YEH; DEMERDASH, 2007; NANDI et al., 2005; TONI et al., 2007; PEREIRA et al., 2005).

A isolação estatórica pode ser afetada por uma série de eventos, tais como: elevada taxa de variação da tensão de alimentação, alta temperatura da bobina ou do núcleo estatórico, folga na laminação do núcleo magnético estatórico, perda da proteção das conexões de bobina, contaminação provocada por óleo, umidade ou sujeira, descargas elétricas, etc. (NANDI et al., 2005).

Neste contexto, este projeto tem como finalidade desenvolver um método de detecção e classificação dos níveis de intensidade de curtos-circuitos no estator. Por meio da análise comparativa entre valores de resistência estatórica, levando em consideração o fator da temperatura do enrolamento, é possível identificar, através desse método, quando um motor apresenta uma falha estatórica.

1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os curtos-circuitos nos enrolamentos do estator são considerados como uma das principais falhas que ocorrem em um motor de indução trifásico (MIT).

Há quatro tipos de curtos-circuitos que podem ocorrer no estator, os quais são: curto-circuito dentro de uma bobina, curto-circuito entre as bobinas da mesma fase, curto-circuito fase-fase e curto-circuito fase-terra (BONNETT; SOUKUP, 1992).

O curto-circuito no enrolamento do estator é influenciado pela qualidade do isolamento entre as espiras e entre as fases das bobinas no interior do motor (STONE et al., 2004).

Dentre os fatores que afetam a vida útil do isolamento, o estresse térmico é uma das principais causas dos curtos-circuitos no estator. Este resulta na deterioração do isolamento devido ao motor operar a uma temperatura superior à de operação projetada. A vida útil do isolamento é reduzida à metade quando há um aumento de temperatura de 10°C acima de sua classe térmica (STONE et al., 2004).

Na Tabela 1 estão listados os dados dos estudos realizados pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI), o qual pesquisou e determinou a porcentagem de ocorrência de falhas nos principais componentes nos motores de indução.

Tabela 1 – Porcentagem de ocorrência de falhas nos principais componentes do motor

Falhas	IEEE – IAS % de Falhas	EPRI % de Falhas
Rolamentos	44	41
Estator	26	36
Rotor	8	9
Outros	22	14

Fonte: Suetake (2012).

Pode-se concluir por meio destes dados, que as falhas estatísticas merecem atenção quanto ao desenvolvimento de métodos capazes de detectar e classificar os níveis de curto nos enrolamentos, de forma confiável, eficaz e simples, afim de garantir um bom funcionamento e máximo desempenho dos motores de indução.

Embora um curto-circuito no enrolamento do estator não afete a operação normal em sua fase inicial, este irá reduzir a eficiência do motor e até mesmo danificá-lo quando a falha se tornar mais grave. Portanto, é de grande importância estar sempre ciente em relação à qualidade do enrolamento do estator.

Uma das formas de se manter atualizado, em relação à qualidade do enrolamento, é realizar um monitoramento periódico do enrolamento a fim de assegurar que os níveis de curtos-circuitos, os quais afetam o rendimento do motor, não ultrapassem dos níveis toleráveis, garantindo assim que a falha o qual o enrolamento apresenta não se torne catastrófica para o motor.

Além disso, o monitoramento periódico irá ajudar a eliminar os danos, que ocasionam muitas despesas em termos de tempo de produção perdido, e evitar custos elevados de manutenção e reparo (JOKSIMOVIC; PENMAN, 2000).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste projeto consiste em desenvolver um método capaz de determinar e classificar os níveis de curto em um motor de indução trifásico quando este apresenta uma falha em seus enrolamentos no estator. Para isto será utilizado como ferramenta principal o software de programação e simulação Matlab®. Além disso, para validação prática do método, são realizados testes em bancada utilizando-se um motor de indução WEG W22 Plus de 2.0 cv.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método, de simples aplicação, capaz de detectar e classificar diferentes níveis de curtos-circuitos nos enrolamentos de estator de um motor de indução trifásico.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- identificar curtos-circuitos, com diferentes níveis de intensidade, nos enrolamentos do estator de um motor de indução trifásico;
- elaborar um programa no software de simulação Matlab® capaz de prever de forma confiável os possíveis resultados que serão obtidos nos testes em bancada;
- validar o método desenvolvido, por meio de testes em bancada, aplicando-o em motores de indução trifásicos reais;
- detectar a falha no enrolamento do estator por meio de uma análise comparativa entre valores de resistência estatórica, levando em consideração a influência da temperatura em que o enrolamento está;

- gerar uma tabela com os resultados obtidos experimentalmente como forma de validação do método aplicado.

1.3 JUSTIFICATIVA

A maioria das máquinas modernas que estão presentes no mercado são motores de indução trifásicos que, devido ao uso constante e prolongado, podem desenvolver falhas. Tais falhas podem causar paradas da máquina e diminuição do seu nível de eficiência, afetando o desempenho da máquina.

Quando um motor apresenta uma falha, certos indícios de defeitos começam a surgir de diversas formas, como: alterações nos sinais de vibrações, variações de temperatura, ruídos e alterações no campo eletromagnético.

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados em acionamentos de bombas, ventiladores, compressores e em várias outras diferentes aplicações na indústria, devido à sua robustez, menor custo, fácil manutenção e versatilidade (BRITO, 2002).

Embora as máquinas rotativas geralmente sejam bem construídas e robustas, a possibilidade de defeitos incipientes é inerente. Defeitos incipientes no interior das máquinas geralmente afetam o seu desempenho antes mesmo que falhas significativas ocorram (CHOW; YEE, 1991).

A detecção de falhas quando estão ainda em fase de desenvolvimento, através de um monitoramento periódico, possibilita ao engenheiro de manutenção planejar uma ação preventiva com relação à falha prevista.

Os motores podem estar expostos a diversos tipos de ambientes agressivos, operação imprópria e defeitos de fabricação. Falhas incipientes como barras quebradas, rolamentos danificados, curto-circuito, etc. e falhas externas como, sobrecarga mecânica, desequilíbrio de fase, subtensão, sobretensão, rotor bloqueado, etc., são inevitáveis.

Além disso, a degradação do isolamento dos motores elétricos quando estão operando em meio a ambientes hostis pode ser acelerada, tornando-os ainda mais sujeitos a defeitos incipientes (BENBOUZID et al., 1999).

A importância deste projeto consiste na contribuição que o mesmo pode dar em relação à confiabilidade, fácil aplicação e viabilidade do método utilizado para detecção e classificação de possíveis falhas que estão presentes nos enrolamentos do estator de um motor de indução trifásico, tendo como objetivo desenvolver um método simples e de fácil aplicação.

Desta maneira, este projeto que auxiliará o engenheiro eletricista para que este identifique, a qualquer momento, ao realizar um monitoramento periódico do valor da resistência do enrolamento estatórico do motor no qual vem sendo utilizado, identificando assim uma possível falha, ganha relevância ao contribuir para garantir que o motor opere com níveis de rendimento e desempenho desejáveis.

Quando uma falha não é detectada, o motor pode sofrer consequências mais graves futuramente, podendo compromete-lo e até mesmo torná-lo inutilizável, consequentemente ocasionando em perdas financeiras.

2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS (MIT)

2.1 A MÁQUINA “MOTOR DE INDUÇÃO”

O motor de indução utilizando o campo girante foi inventado por Nikola Tesla durante o período entre 1882 e 1887, porém, a máquina de M. O. Dolivo-Dobrovolsky, desenvolvida entre 1888 e 1890, é a que mais se assemelha aos motores atuais (SANTOS et al., 2006). Desde então, os motores elétricos vêm sofrendo uma série de desenvolvimentos e melhorias. Um bom exemplo é a relação peso-potência que em 1891 era da ordem de 88 kg/kW, passou para 5,7 kg/kW nos dias atuais, como ilustrado na Figura 1.

Esta redução de peso se deve principalmente aos avanços nas técnicas de isolamento e na redução da seção dos condutores, extraindo-se, contudo, uma mesma potência (SANTOS et al., 2006).

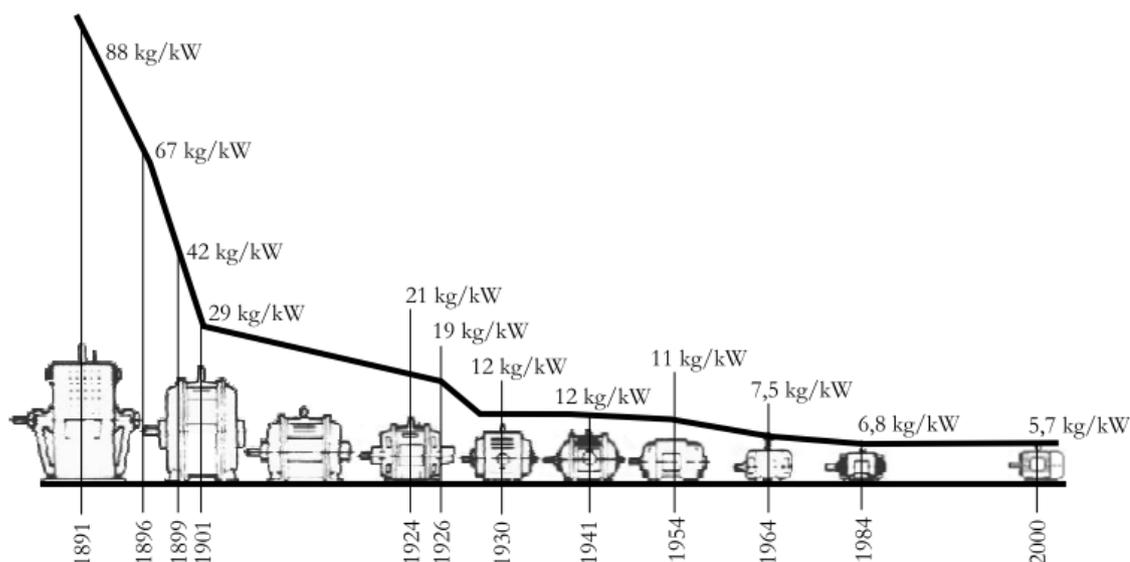


Figura 1 – Evolução dos motores elétricos

Fonte: Santos et al. (2006).

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Um motor de indução trifásico é constituído pelos seguintes componentes, de acordo com a Figura 2.

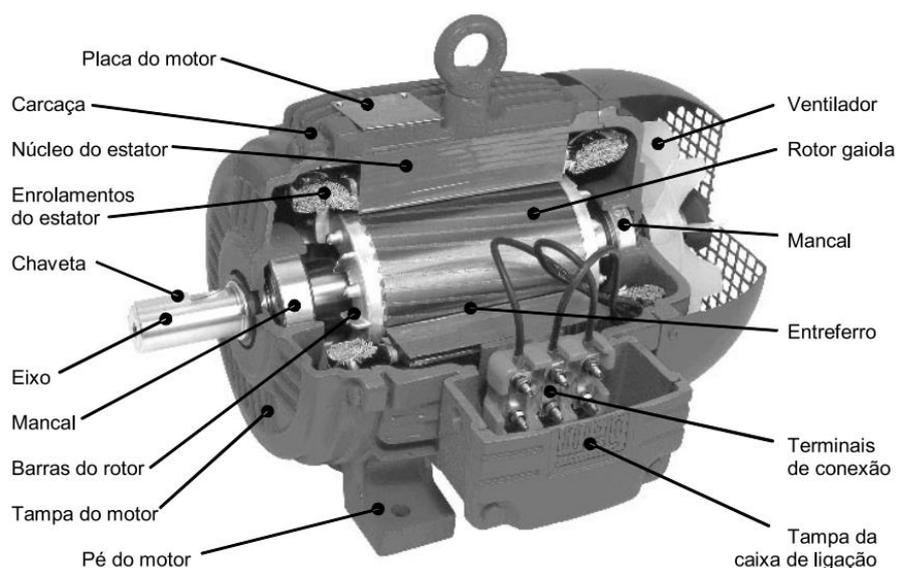


Figura 2 – Vista em corte do Motor de Indução Trifásico com Rotor em Gaiola de Esquilo

Fonte: Santos et al. (2006).

2.2.1 Estator

É a parte ativa magnética estática do motor. É constituído por um núcleo prensado de lâminas de chapas de aço silício, onde, em suas ranhuras, as bobinas que formam o enrolamento do estator são alojadas. O núcleo do estator é montado diretamente no interior de uma carcaça em ferro, aço ou alumínio (WEG, 2014).

O material empregado, para a execução do enrolamento, com maior frequência é o cobre e, mais raramente, o alumínio. Após a colocação de todas as bobinas, são realizadas as ligações internas entre elas (ligação série, paralelo, série-paralelo) e ligados os fios que constituirão os terminais externos (PAZZINI, 2002). A Figura 3 ilustra o estator e carcaça dos motores de indução.

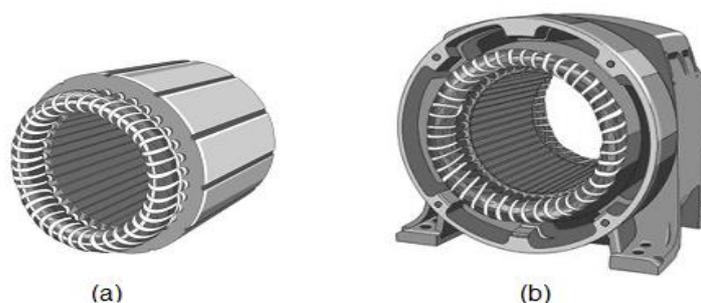


Figura 3 – Estator e carcaça dos motores de indução
Fonte: Francisco (2006).

2.2.2 Rotor

Os motores de indução trifásico podem ser classificados em motores de rotor gaiola de esquilo e motores de rotor bobinado.

O rotor gaiola de esquilo é composto por um cilindro de aço laminado, no qual as barras de cobre ou alumínio são fundidas paralelamente ao eixo, em orifícios existentes no núcleo magnético. Cada terminal da extremidade destes condutores é curto-circuitado em anéis terminais contínuos, obtendo um formato de uma gaiola.

As barras fundidas não precisam ser isoladas do núcleo, pois as correntes induzidas no rotor seguem o caminho de menor resistência (KOSOW, 2005). Além

disso, são geralmente dispostas com uma determinada inclinação com a finalidade de melhorar as propriedades de arranque e diminuir os ruídos (FRANCISCO, 2006). A Figura 4 ilustra um rotor tipo gaiola de esquilo.

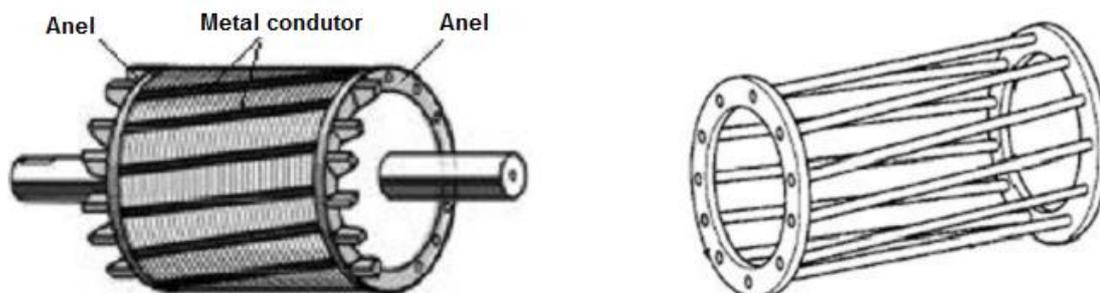


Figura 4 – Rotor gaiola de esquilo

Fonte: Francisco (2006).

O rotor bobinado também é constituído de um cilindro de aço laminado, porém os condutores de cobre são colocados em ranhuras, formato construtivo semelhante a do enrolamento do estator, isoladas do núcleo de ferro e com o mesmo número de polos do estator. Cada terminal do enrolamento é conectado a anéis deslizantes isolados do eixo do motor, permitindo o apoio das escovas de carvão. Estes anéis coletores permitem que os terminais do rotor se tornem disponíveis externamente ao motor (KOSOW, 2005).

Este motor é, normalmente, de potência elevada e destina-se a arranques de cargas com elevado binário resistente e grande inércia. Permite arranques suaves e progressivos recorrendo a resistências, chamadas resistências rotóricas, ligadas, através de escovas e anéis coletores, em série com o enrolamento trifásico do rotor.

Apesar desta vantagem, para as mesmas especificações, o motor de rotor bobinado é mais caro e menos eficiente que o motor de gaiola de esquilo. Por esta razão, este tipo de motor só é utilizado quando o de gaiola de esquilo não consegue fornecer o binário de arranque pretendido. A Figura 5 ilustra um rotor bobinado.

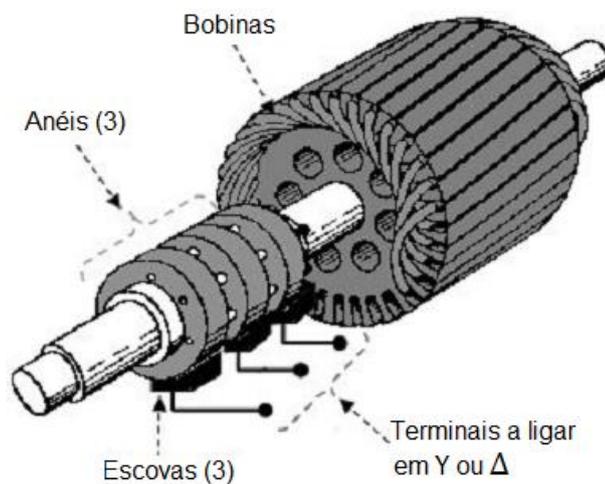


Figura 5 – Rotor bobinado

Fonte: Francisco (2006)

2.3 CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

Quando uma bobina do estator é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente. O campo magnético girante é a base do princípio de funcionamento das máquinas de indução.

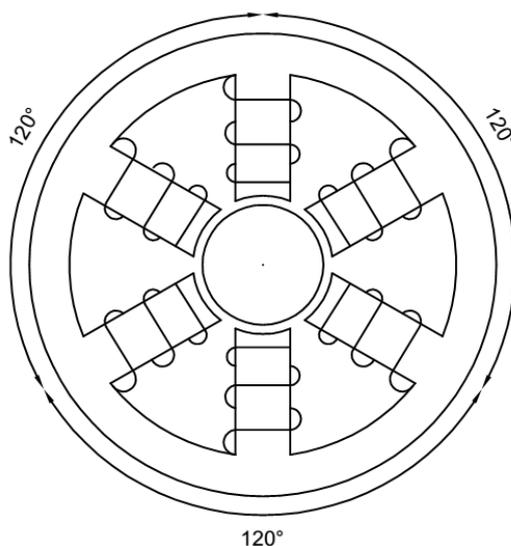


Figura 6 – Enrolamento trifásico

Fonte: Autoria própria.

Este campo é produzido colocando-se nas ranhuras do estator um conjunto de três bobinas independentes, defasadas de 120° no espaço, conforme a Figura 6, e faz-se circular por estas bobinas corrente trifásicas defasadas de 120° no tempo. Estas correntes trifásicas, aplicadas às bobinas do estator podem ser representadas pelas equações (1), (2) e (3):

$$i_a(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t) [A] \quad (1)$$

$$i_b(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) [A] \quad (2)$$

$$i_c(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) [A] \quad (3)$$

Toda bobina, com N números de espiras, quando percorrida por uma corrente produz um campo magnético cuja força magnetomotriz (FMM) é dada por $\mathfrak{F}(t) = N \cdot i(t)$. A FMM produzida pelas correntes trifásicas é dada pelas equações (4), (5) e (6):

$$\mathfrak{F}_a(t) = N \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

$$\mathfrak{F}_b(t) = N \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (5)$$

$$\mathfrak{F}_c(t) = N \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (6)$$

Se as três bobinas estiverem orientadas a um eixo comum, a força resultante será nula ($\mathfrak{F}_a(t) + \mathfrak{F}_b(t) + \mathfrak{F}_c(t) = 0$). Como as três bobinas estão defasadas no espaço de 120° , adotando-se a bobina percorrida por $i_a(t)$ (aa') na referência tem-se:

$$\mathfrak{F}(t) = \mathfrak{F}_a \cdot \cos(0^\circ) + \mathfrak{F}_b \cdot \cos(120^\circ) + \mathfrak{F}_c \cdot \cos(240^\circ) \quad (7)$$

$$\mathfrak{F}(t) = N \cdot I \cdot [\text{sen}(\omega t) \cdot \cos(0^\circ) + \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(120^\circ) + \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \cdot \cos(240^\circ)] \quad (8)$$

Desenvolvendo a equação (8) tem-se:

$$\mathfrak{F}(t) = 1,5 \cdot N \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (9)$$

Ou seja, a FMM total produzirá um campo magnético girante com velocidade e intensidade constantes, com a velocidade dependendo das correntes aplicadas às bobinas.

As Figuras 7.a e 7.b apresentam as correntes trifásicas que circulam pelas bobinas, em suas representações fasorial e no domínio do tempo. A Figura 7.c apresenta esquematicamente a ligação do conjunto de três bobinas aa' , bb' e cc' por onde circulam as correntes trifásicas.

Nas Figuras 7.d, 7.e e 7.f pode-se observar a força resultante $\mathfrak{F}(t)$ para as situações 1, 2 e 3 da corrente, respectivamente, da Figura 7.b. A regra da mão direita indica então o sentido das forças magnéticas provocadas por cada corrente trifásica e conseqüentemente do fluxo. A soma fasorial destas forças resulta na força $\mathfrak{F}(t)$ responsável pelo campo girante.

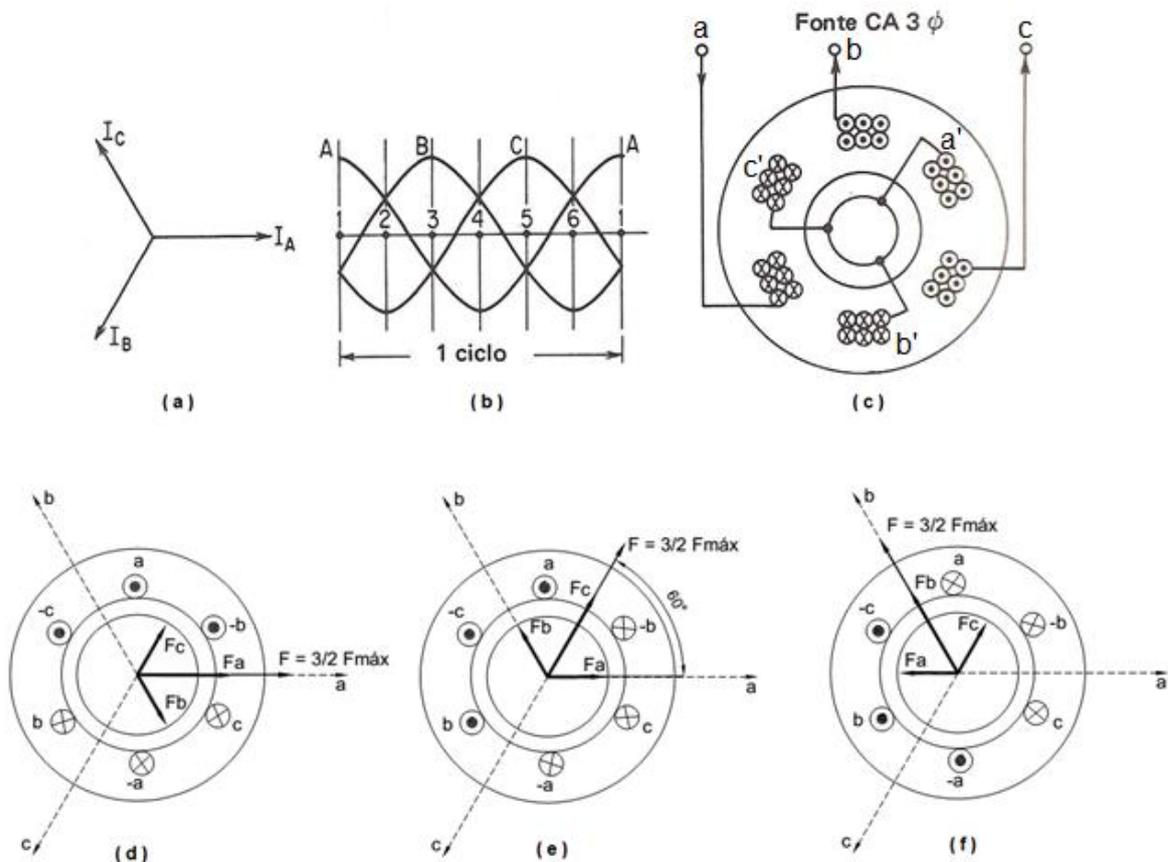


Figura 7 – Campo girante em máquinas de indução trifásico

Fonte: Kosow (2005).

Logo, o fato de aplicar três correntes trifásicas às bobinas do estator, resulta num campo magnético girante constante, cujo deslocamento no espaço corresponde exatamente aos deslocamentos tempo-fásico da frequência da fonte. Assim, enquanto na Figura 7.b a corrente foi da posição 1 a 3 ($\omega t = 120^\circ$), nas Figura 7.d, 7.e e 7.f pode-se ver um deslocamento do campo resultante de 120° .

Devido a relação direta do campo girante com o enrolamento estatórico do motor, quando ocorrem curtos-circuitos nestes enrolamentos, o campo girante também é afetado.

Através da equação (9), observa-se que a força responsável pelo campo girante depende da intensidade da corrente que circula no enrolamento do estator. Quando o enrolamento estatórico apresenta curtos-circuitos, há alteração na intensidade de corrente que circula na bobina e, conseqüentemente, alterações no campo girante.

As alterações provocadas no campo girante irão repercutir em outras grandezas que estão relacionadas a este, afetando de forma negativa o funcionamento normal do motor, causando alterações em seu rendimento e até provocando danos ao motor.

2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DO ESTATOR

A Figura 8 ilustra um enrolamento genérico de uma das fases do estator do motor de indução polifásico. É útil pensar que as máquinas trifásicas estão ligadas em Y, de modo que as corrente e tensões sejam sempre expressas por valores de fase, podendo, então, deduzir o circuito equivalente para uma fase, ficando subentendido que as tensões e correntes nas demais fases podem ser obtidas por meio de um simples deslocamento de fase que está sendo estudada ($\pm 120^\circ$ no caso de uma máquina trifásica) (FITZGERALD et al., 2006).

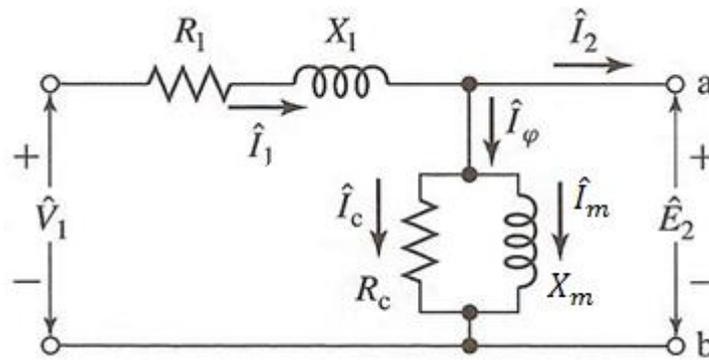


Figure 8 – Circuito equivalente do estator de um motor de indução polifásico

Fonte: Fitzgerald et al. (2006).

Considerando as condições no estator, a onda de fluxo de entreferro, ao girar sincronicamente, gera forças contra-eletromotrizes (FCEMs) equilibradas nas fases do estator. A tensão de terminal do estator difere da FCEM devido à queda de tensão na impedância de dispersão do estator ($Z_1 = R_1 + jX_1$) (FITZGERALD et al., 2006). Assim:

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (10)$$

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

\hat{E}_2 : FCEM (de fase) gerada pelo fluxo de entreferro resultante

\hat{I}_1 : Corrente do estator

R_1 : Resistência efetiva do estator

X_1 : Reatância de dispersão do estator

Como no caso de um transformador, a corrente de estator pode ser decomposta em duas componentes: uma componente de carga e uma componente de excitação (magnetização).

A componente de carga \hat{I}_2 produz uma força magnetomotriz (FMM) que corresponde à FMM da corrente do rotor. A componente de excitação \hat{I}_φ é a corrente de estator adicional que é necessária para criar o fluxo de entreferro e é uma função da FEM \hat{E}_2 (FITZGERALD et al., 2006).

A corrente de excitação pode ser decomposta em uma componente de perdas no núcleo \hat{I}_c e uma componente de magnetização \hat{I}_m , atrasada de 90° em relação a \hat{E}_2 . No circuito equivalente, a corrente de excitação pode ser levada em consideração incluindo-se um ramo em derivação, formado por uma resistência de perdas no núcleo R_c em paralelo com uma reatância de magnetização X_m , ligados a \hat{E}_2 (FITZGERALD et al., 2006), conforme representado na Figura 8.

Geralmente, ambos os valores de R_c e X_m são determinados para a frequência nominal do estator e para um valor de E_2 próximo do valor esperado de operação. Portanto, assume-se que esses valores permanecem constantes quando pequenos desvios em E_2 ocorrerem durante o funcionamento normal do motor (FITZGERALD et al., 2006).

Para o método de detecção de falhas desenvolvido neste projeto, o ramo de magnetização do circuito equivalente do estator não será considerado, pois foram desconsideradas as perdas e a influência do núcleo.

Desconsiderando R_c e X_m , o circuito da Figura 8 será reduzido a um circuito com uma resistência e uma reatância em série, conforme ilustrado na Figura 9.

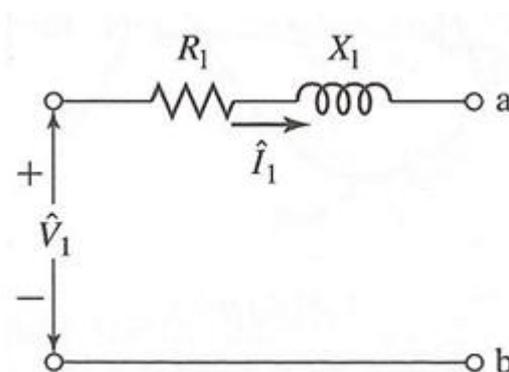


Figura 9 – Circuito equivalente simplificado do estator de um motor de indução

Fonte: Autoria própria.

A análise do circuito equivalente do rotor não será desenvolvida neste projeto, pois deseja-se identificar apenas falhas que ocorrem no enrolamento estatórico do motor de indução. O equacionamento do rotor dos motores de indução pode ser encontrado em Fitzgerald et al. (2006).

3 FALHAS COMUNS EM MOTORES DE INDUÇÃO

Segundo Bloch e Geitner (1999), “falha” é definida como qualquer alteração em uma parte ou componente da máquina, a qual a deixa incapacitada para desempenhar sua função de modo satisfatório, deixando-a insegura para permanecer em uso (PINHEIRO, 2011). As causas dessas falhas podem ser classificadas em:

- manutenção deficiente;
- operação imprópria;
- materiais com defeitos;
- erros de projeto;
- processamento e fabricação deficientes;
- instalações equivocadas;
- condições de serviço fora de especificações.

Hattangadi (2005) afirma que a maior parte das falhas que ocorrem nas máquinas elétricas estão relacionados a aspectos mecânicos e elétricos. Os fatores que provocam problemas mecânicos podem ser definidos como: expansão térmica, vibração, fadiga mecânica, corrosão, fratura, fricção, erosão ou deformação e desgaste. Dentre os fatores que provocam problemas elétricos, podem ser destacados: aquecimento elétrico, descargas parciais, degradação térmica, avaria dielétrica, magnetização, resistência de contato e indução eletromagnética (PINHEIRO, 2011).

Segundo Nandi et al. (2005), as falhas ocorrentes nas máquinas elétricas podem ser classificadas como pertencentes a uma das categorias como:

- conexões anormais dos enrolamentos do estator;
- falhas estatóricas resultando na abertura ou curto-circuito de um ou mais enrolamentos de fase do estator;
- quebra de barras ou rachaduras nos anéis terminais do rotor;
- folgas irregulares estáticas e/ou dinâmicas no entreferro;
- eixo desalinhado que pode resultar num atrito entre o estator e o rotor;
- curto-circuito na bobina do rotor;
- falhas de engrenagens ou nos rolamentos.

De acordo com Nandi et al. (2005), independentemente da categoria em que a falha se classifique, seja ela isolada ou uma combinação de duas ou mais, pode provocar os seguintes sintomas: tensões e correntes de linha desbalanceadas, aumento de vibrações, queda do torque médio, aumento das perdas, redução do rendimento e aquecimento excessivo (PINHEIRO, 2011).

Reis (2010) relata que o estator, o rotor e os rolamentos são os componentes do motor de indução mais sujeitos às falhas. No estator, os enrolamentos são as partes que mais sofrem danos. No rotor, barras quebradas e excentricidades rotóricas são os defeitos mais ocorrentes, já nos rolamentos, o desgaste físico é o problema mais comum (PINHEIRO, 2011).

3.1 FALHAS NO ESTATOR

Segundo Siddique et al. (2005), estudos realizados pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e pela *Electric Power Research Institute* (EPRI), relatam que as falhas relacionadas ao enrolamento do estator contribuem em cerca de 30% a 40% de todas as falhas ocorrentes nos motores de indução. O estator, por estar exposto a vários esforços como térmicos, elétricos, mecânicos e ambientais, os quais o afetam de forma severa, fica sujeito a desenvolver condições de falhas.

3.1.1 Envelhecimento do Isolamento dos Enrolamentos

O envelhecimento natural dos elementos que constituem o isolamento dos enrolamentos está relacionado ao fator de degradação das características dielétricas, físicas e mecânicas desse mesmo isolamento, tornando-o assim mais vulnerável a todos os outros fatores causadores de falhas, esses sim, causadores diretos das falhas (CRUZ, 2004).

3.1.2 Sobrecargas Térmicas

As sobrecargas térmicas estão geralmente associadas às condições de funcionamento e de exploração do motor de forma imprópria, em que resulta em um aumento de temperatura de funcionamento para além dos valores que seriam esperados no momento de sua instalação. A Figura 10 ilustra um gráfico relativo a vida útil do material isolante dos enrolamentos em função da temperatura o qual está operando.

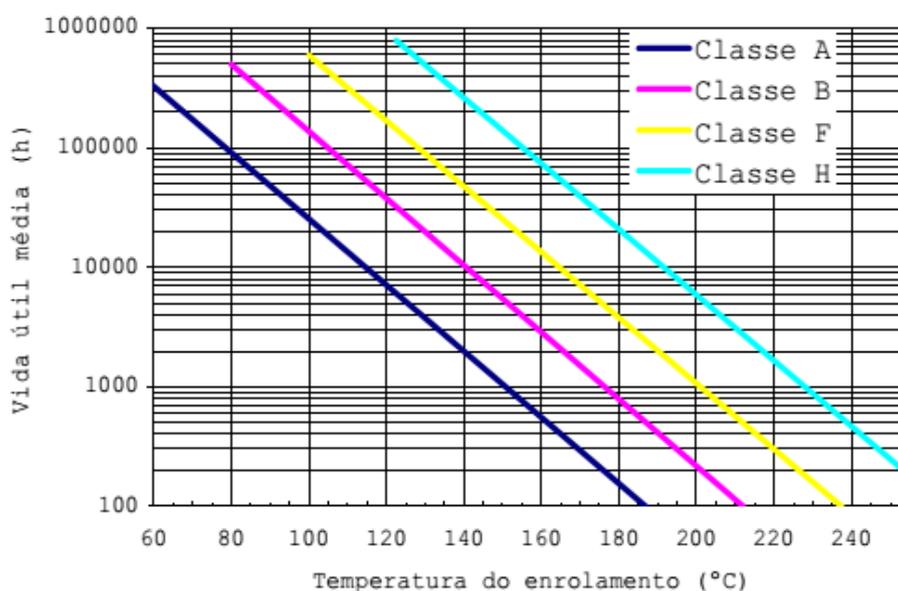


Figura 10 – Vida útil do material isolante dos enrolamentos em função da temperatura

Fonte: Bonnett (1997).

As sobrecargas térmicas estão associadas a diversos fatores, entre os quais se destacam:

- a) variações na tensão de alimentação: geralmente os motores de indução são construídos de modo a operarem, de forma satisfatória, numa faixa de tensões dentro do limite $U_n \pm 10\%$, onde U_n corresponde aos valores da tensão que consta na chapa de características. Caso o motor seja alimentado por uma tensão fora desta faixa, a vida útil do isolamento dos enrolamentos poderá ser drasticamente reduzida (CRUZ, 2004);
- b) desequilíbrios no sistema de alimentação: pequenos desequilíbrios no sistema de alimentação do motor, os quais ocorrem em diversas situações, causam um aumento muito significativo na temperatura dos enrolamentos. Verifica-se, aproximadamente, que um desequilíbrio de 3,5% no sistema de tensões de alimentação do motor resulta em um aumento de 25% na temperatura do enrolamento da fase onde circula a corrente elétrica mais elevada. Associando esse valor em relação a redução da vida útil do enrolamento devido a este aumento de temperatura, conclui-se a importância de manter um sistema de alimentação o mais equilibrado possível de modo a maximizar a vida útil do isolamento dos enrolamentos do motor (CRUZ, 2004);
- c) arranques consecutivos e/ou prolongados: durante o período de partida, os motores de indução absorvem um valor de corrente elétrica que está compreendido entre 5 e 8 vezes o valor da corrente nominal. Caso o motor for sujeito a um número elevado de partidas durante um curto período de tempo, a temperatura dos enrolamentos aumentará rapidamente. Além disso, caso a carga mecânica que está acoplada ao motor impuser um tempo de arranque longo, a situação se torna ainda mais agravante. Outro efeito desses sobreaquecimentos consiste na expansão e contração do sistema de isolamento, que a médio prazo resulta em materiais quebradiços, tornando-os mais sujeitos às falhas (CRUZ, 2004).

- d) sobrecargas mecânicas: geralmente os motores de indução são escolhidos de modo que a potência da carga mecânica que está acoplado a ele corresponda em cerca de 85% da potência nominal do motor. Porém, há casos e que isto não ocorre, e toda a potência do motor é utilizada. Um aumento da carga para além do valor estimado pelo fabricante resulta, para este caso, em uma sobrecarga. Considerando que a temperatura dos enrolamentos é, de forma aproximada, proporcional ao quadrado do valor da carga do motor, conclui-se que esta condição de operação acarreta em uma redução significativa da vida útil do isolamento devido à elevação da temperatura do mesmo (CRUZ, 2004);
- e) ventilação obstruída: o calor gerado no interior de um motor é dissipado para o meio ambiente através de fenômenos de condução, convecção e radiação. Qualquer situação que impeça a circulação normal de ar no interior ou ao redor do motor provocará um aumento da temperatura dos enrolamentos (CRUZ, 2004);
- f) temperatura ambiente: a vida útil do isolamento dos enrolamentos de um motor de indução depende fortemente da temperatura ambiente em que está operando. Considerando que os motores de indução são fabricados para operarem a uma temperatura ambiente máxima de 40°C, a Tabela 1 exibe a grande redução da vida útil do isolamento dos enrolamentos quando este limite é excedido (CRUZ, 2004).

Tabela 2 - Efeito da temperatura ambiente na vida útil do isolamento dos enrolamentos.

Temperatura ambiente (°C)	Vida do isolamento (horas)
30	250 000
40	125 000
50	60 000
60	30 000

Fonte: Cruz (2004).

3.1.3 Esforços Dielétricos

O sistema de isolamento dos enrolamentos de qualquer motor de indução está sujeito a esforços resultantes da necessidade de garantir um isolamento elétrico adequado entre as espiras de uma mesma bobina, entre as espiras de bobinas pertencentes a fases distintas e entre as espiras de todas as bobinas e as ranhuras onde elas estão alojadas. Quanto maior for o “esforço de isolamento” realizado pelo material isolante, menor será sua vida útil (CRUZ, 2004).

3.1.4 Descargas Parciais

Este fenômeno ocorre quando há campos elétricos localizados que, devido à sua intensidade, excedem a rigidez dielétrica do meio material circulante, provocando uma descarga resultante da ionização desse meio (CRUZ, 2004).

Existem três tipos de descargas parciais: descargas internas, que ocorrem em cavidades do dielétrico; descargas à superfície das bobinas dos enrolamentos e descargas ligadas às zonas onde existem campos elétricos intensos, tais como em locais onde os materiais formam curvaturas apertadas (CRUZ, 2004).

A intensidade deste fenômeno depende de inúmeros fatores, como: umidade, temperatura, geometria dos materiais, etc. Como consequência dessas descargas, ocorrem sobreaquecimentos das áreas adjacentes, erosões, ou reações químicas diversas, resultando numa degradação do isolamento dos enrolamentos (CRUZ, 2004).

Mesmo em motores de baixa tensão, quando são alimentados por conversores de frequência, observa-se também o aparecimento de descargas parciais. Nestes casos, as descargas parciais são provocadas pelas elevadas taxas de repetição dos picos de tensão impostos pelos conversores mais modernos e podem provocar o rompimento do isolamento individual das espiras das bobinas em um período de tempo entre 10 e 1000 horas de funcionamento, causando assim curtos-circuitos (CRUZ, 2004).

3.1.5 Fenômenos Transitórios na Tensão de Alimentação

Quando os motores ficam sujeitos a fenômenos transitórios de curta duração na tensão de alimentação, ocorre a redução da vida útil do isolamento dos enrolamentos, podendo provocar curtos-circuitos entre espiras ou entre espiras e o núcleo ferromagnético do motor. Vários fatores contribuem para o surgimento de fenômenos transitórios, como destaque tem-se:

- a) uso de variadores eletrônicos de velocidade: as inovações mais recentes dos conversores de frequência, principalmente em relação aos semicondutores que os constituem, causaram maiores esforços nos isolamentos dos enrolamentos do motor. Altos valores de pico da tensão de alimentação, relacionados às frequências de comutação dos semicondutores da ordem das dezenas de kHz, além dos tempos de comutação inferiores a 100ns aumentam os esforços elétricos do isolamento. Devido a distribuição não linear da tensão ao longo dos enrolamentos, os esforços elétricos nas primeiras espiras são maiores. Como resultado, os esforços no isolamento das espiras de cada bobina podem ser 10 vezes maiores do que nos casos em que o motor é alimentado por um sistema de tensões senoidais. Quando os motores são alimentados por conversores de frequência podem surgir picos de tensão em seus terminais que ultrapassam largamente a respectiva tensão nominal (CRUZ, 2004);
- b) curtos-circuitos que ocorrem no barramento de alimentação do motor podem originar sobretensões que chegam a atingir 3,5 vezes o valor da tensão nominal do motor, com tempos de subida extremamente curtos (CRUZ, 2004);
- c) ligações deficientes do motor à terra;
- d) atuação de fusíveis limitadores de corrente;

- e) transferências de barramentos de alimentação do motor;
- f) funcionamento de equipamentos de manobra e proteção ligada ao barramento de alimentação do motor;
- g) operações de manobra de bancos de capacitores conectados aos terminais do enrolamento estatórico do motor, para compensação do fator de potência. Neste caso, deve ser considerado uma situação especial em que o motor e os capacitores, quando desligados do sistema de alimentação, continuam ligados entre si. Nessas situações pode-se verificar um fenômeno de ressonância elétrica entre as indutâncias de fugas do motor e o banco de capacitores, surgindo sobretensões de valores notáveis aos terminais do enrolamento estatórico (CRUZ, 2004);
- h) Descargas atmosféricas na linha de alimentação do motor.

3.1.6 Esforços Mecânicos

Os esforços mecânicos ocorrem devido aos movimentos da bobina e ao atrito entre rotor e estator.

Quanto aos movimentos da bobina, Siddique et al. (2005) relata que a força magnética sobre as bobinas é a máxima durante a partida do motor, provocando vibrações das bobinas nas direções radial e axial. Este movimento pode causar danos à isolação por afrouxar o material isolante dos condutores.

O atrito entre o rotor e estator pode ocorrer devido a inúmeras razões como: defeitos nos rolamentos, deflexão do eixo, desalinhamento entre rotor e estator, etc. (SIDDIQUE et al., 2005).

Caso haja choques durante a partida, então, neste momento, a força do rotor pode causar laminações no estator, comprometendo a isolação dos enrolamentos, resultando num contato direto da bobina com a massa. Se o choque ocorrer também enquanto o motor estiver operando à velocidade nominal, ocorre um desgaste

premature, devido ao contato direto da bobina com a massa, causado pelo calor excessivo existente no atrito (SIDDIQUE et al., 2005).

Além disso, pode ocorrer danos físicos diretos causados por peças que podem eventualmente soltar-se do rotor do motor, tais como barras quebradas ou pedaços de aletas de ventilação (CRUZ, 2004).

3.1.7 Agentes Ambientais

A existência de agentes contaminantes no ambiente o qual o motor está inserido, tais como: poeiras, umidade, óleos, ferrugem, produtos químicos, etc., contribuem para uma degradação mais acelerada do sistema de isolamento dos enrolamentos. Além disso, vale mencionar a condensação que poderá ocorrer nos enrolamentos de motores inativos que ficam durante longos períodos de tempo colocados em armazéns como reserva (CRUZ, 2004).

4 ANÁLISE DO CIRCUITO DO ESTATOR

4.1 ANÁLISE TRANSIENTE DE CIRCUITO DE PRIMEIRA ORDEM

Os circuitos de primeira ordem são caracterizados por possuírem apenas um elemento capaz de armazenar energia, podendo ser a carga num capacitor ou fluxo de corrente num indutor. Isto resulta em uma equação diferencial de primeira ordem com os coeficientes constantes, já que estão sendo considerados circuitos lineares invariantes no tempo.

A equação (11) define a forma geral da solução dos circuitos transientes de primeira ordem; isto é, esta representa a solução da equação diferencial que descreve uma corrente ou uma tensão incógnita em qualquer posição da rede (IRWIN, 2013).

Uma das formas de se chegar a essa solução é resolver a equação que descreve o comportamento da rede utilizando o que é frequentemente chamado de

procedimento da variável de estado. Nessa técnica, escreve-se a equação da tensão entre os terminais do capacitor e/ou a equação da corrente que passa pelo indutor, lembrando que essas grandezas não podem variar instantaneamente (IRWIN, 2013).

$$x(t) = K_1 + K_2 e^{-t/\tau} \quad (11)$$

O termo K_1 é conhecido como solução do regime estacionário, ou seja, o valor da variável $x(t)$ quando $t \rightarrow \infty$, fazendo com que o segundo termo da equação se torne desprezível.

A constante τ é chamada de constante de tempo do circuito. Quando $\tau > 0$, o segundo termo da equação (11) representa um decaimento exponencial que possui o valor K_2 para $t = 0$, e o valor 0 para $t \rightarrow \infty$. A taxa do decaimento exponencial é determinada pela constante de tempo τ . Se o circuito possui uma constante de tempo baixa, este atinge rapidamente o valor do regime estacionário, porém se a constante de tempo é alta, um tempo maior será necessário para o circuito atingir o regime estacionário (IRWIN, 2013).

O circuito ilustrado pela Figura 11 se assemelha ao utilizado para representar os enrolamentos do estator do motor de indução. No tempo $t = 0$, a chave é fechada.

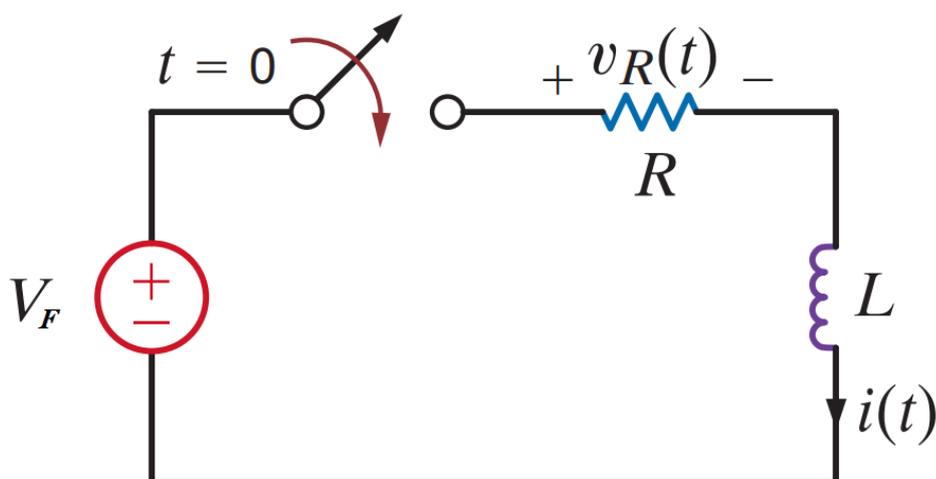


Figura 11 – Circuito R-L

Fonte: Irwin (2013).

A equação da Lei de Kirchhoff da Tensão (LKT) que descreve a corrente no indutor, para um tempo $t > 0$ é:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = V_F \quad (12)$$

ou

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{R}{L}i(t) = \frac{V_F}{L} \quad (13)$$

Pelo desenvolvimento anterior, admite-se que a solução dessa equação diferencial de primeira ordem tem a forma:

$$i(t) = K_1 + K_2 e^{-t/\tau} \quad (14)$$

A substituição dessa solução na equação diferencial fornece:

$$-\frac{K_2}{\tau} e^{-t/\tau} + \frac{RK_1}{L} + \frac{RK_2}{L} e^{-t/\tau} = \frac{V_F}{L} \quad (15)$$

Igualando-se os termos constantes e os termos exponenciais, obtém-se:

$$K_1 = \frac{V_F}{R} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (17)$$

Portanto,

$$i(t) = \frac{V_F}{R} + K_2 e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \quad (18)$$

em que V_F/R é o valor da corrente em regime estacionário, e R/L é a constante de tempo do circuito. A constante K_2 é determinada pela condição inicial do indutor.

Caso não exista corrente inicial no indutor, tem-se, para $t = 0$:

$$0 = \frac{V_F}{R} + K_2 \quad (19)$$

e

$$K_2 = -\frac{V_F}{R} \quad (20)$$

Portanto tem-se:

$$i(t) = \frac{V_F}{R} - \frac{V_F}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (21)$$

A equação (21) pode ser aplicada ao circuito ilustrado na Figura 9 para se obter a corrente, pois devido as considerações adotadas, o circuito equivalente do estator passa a se comportar como um circuito R-L.

No método desenvolvido, é considerada a variação do valor da resistência do enrolamento estático em função da temperatura, portanto, o valor da resistência R presente na equação (21) deve estar em função do valor da temperatura.

4.2 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA EM FUNÇÃO TEMPERATURA

Nos condutores metálicos a resistência aumenta com o aumento da temperatura. Variando então a temperatura, a resistência também varia e, conseqüentemente, a corrente. A resistência pode variar com a temperatura conforme a equação (22) (CALVANCATE, 2003).

$$R_1 = R_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot (T_1 - T_0)] \quad (22)$$

onde: R_1 : resistência do condutor à temperatura T_1

R_0 : resistência do condutor à temperatura T_0

α_0 : coef. de variação da resistência com a temperatura para a temperatura T_0

Reescrevendo a equação (22) em termos de R_0 , obtém-se a seguinte forma:

$$R_0 = \frac{R_1}{[1 + \alpha_0 \cdot (T_1 - T_0)]} \quad (23)$$

A equação (23) será utilizada, no método desenvolvido, para normalizar valores de resistências na temperatura de normalização desejada.

Para o cobre 100% tem-se, conforme listado na Tabela 2, para alguns valores de temperatura seus respectivos valores de coeficiente de variação de temperatura (CALVANCATE, 2003).

Tabela 3 – Valores de coeficientes de variação de temperatura.

$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\alpha_0(^{\circ}\text{C}^{-1})$
0	0,00470
20	0,00393
25	0,00385

Fonte: Cavalcante (2003).

Para se conhecer o valor de α_R , a uma determinada temperatura T_R , a correção pode ser realizada pela equação (24).

$$\alpha_R = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + (T_R - T_0)} \quad (24)$$

5 MÉTODO PROPOSTO

Este método consiste em determinar de forma experimental e na prática, por meio de simulações computacionais e experimentos em bancadas, a existência de curtos-circuitos nos enrolamentos do estator de um motor de indução trifásico, analisando o enrolamento estatórico, utilizando uma forma simples, confiável e com pouco investimento.

Para o estudo e desenvolvimento deste método será utilizada a ferramenta de implementação e simulação Matlab[®], e para a aplicação e comprovação do método serão realizados testes em bancadas no Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Cornélio Procopio.

O desenvolvimento do projeto pode ser dividido em duas etapas: a etapa teórica, o qual serão realizadas simulações com auxílio de ferramentas computacionais, com o objetivo de testar e analisar a aplicabilidade e viabilidade do método proposto; a etapa experimental, o qual será realizada após a etapa teórica, realizando testes e aquisições de dados em bancada, tendo como objetivo comprovar e validar na prática a aplicabilidade do método desenvolvido.

5.1 ETAPA TEÓRICA

Para estudo inicial do método é elaborado um circuito R-L, representando a bobina do estator, no programa de simulação. Os valores dos parâmetros R e L utilizados na simulação são correspondentes aos do motor a ser utilizado nos testes em bancada.

No circuito simulado é utilizada uma fonte de tensão contínua (fonte DC), na qual a tensão fornecida ao circuito deve ser informada, em série ao circuito R-L. Será considerado que a resistência do circuito varia em função da temperatura, portanto esta temperatura, o qual representa a temperatura em que o enrolamento está durante o teste, deverá ser informada na simulação.

Outro fator que influencia diretamente no valor da resistência é a intensidade de curto presente no enrolamento, este fator também deve ser informado para realizar as simulações. Para a simulação do curto será utilizada a equação (25).

$$R_c = \frac{R \cdot (100 - C)}{100} \quad (25)$$

onde: R_c : resistência com o curto aplicado

R : resistência sem curto aplicado

C : curto aplicado em [%]

Por meio da análise transiente de circuitos de primeira ordem é obtida a expressão da corrente do circuito R-L em função do tempo, conforme a equação (21). A partir desta expressão é possível gerar uma representação gráfica da corrente teórica, o qual servirá como parâmetro de comparação para a curva de corrente adquirida.

5.2 ETAPA EXPERIMENTAL

Na etapa experimental, para a aquisição dos dados de corrente do enrolamento estático, serão utilizados: um motor de indução trifásico de 2.0 cv., uma fonte de tensão contínua, um sensor de corrente, uma placa de aquisição de dados (DAQ) e dois multímetros.

Na prática, também será considerada a influência da temperatura sobre o valor da resistência do enrolamento. Portanto antes de iniciar a aquisição dos dados deve-se registrar, com o auxílio de um multímetro, um valor de temperatura e o respectivo valor de resistência do enrolamento, para o motor sem o curto aplicado. Os valores de temperatura e resistência registrados são adotados como valores de base para normalização da resistência, e são representados por T_0 e R_0 respectivamente.

Antes de realizar a aquisição dos dados deve se certificar da correta calibração do sensor, para que os dados obtidos sejam o mais preciso possível.

No processo de aquisição dos dados é aplicada sobre o enrolamento do estator, por meio do chaveamento da fonte DC, um degrau de tensão de 1 volt (aplica-se, de preferência, uma tensão baixa para que não provoque aquecimento no enrolamento e cause interferência na temperatura) obtendo assim, através do sensor de corrente e da placa de aquisição, os dados para obter a curva de corrente. Observa-se na curva plotada um comportamento semelhante à de um circuito R-L, composta por uma parte transitória e outra em regime estacionário.

Devido à grande quantidade de ruídos presentes na curva obtida é necessário realizar uma filtragem desse sinal. Para a filtragem do sinal, serão utilizados filtros passa-baixa para reduzir os ruídos indesejáveis. Com a redução dos ruídos do sinal é possível, através dos dados de corrente, calcular o valor médio da corrente no trecho em regime estacionário.

Por meio do valor médio da corrente estacionária e do valor da tensão aplicada, utiliza-se a Lei de Ohm para calcular o valor da resistência do enrolamento, representada por R_1 , para a temperatura T_1 registrada.

Independente da temperatura que o motor estiver durante as aquisições, por meio da equação (23), é possível normalizar o valor da resistência R_1 , obtida a uma temperatura T_1 , para a temperatura de normalização T_0 .

Após normalizada, a resistência R_1 passa a ser representada por $R_{0_{calc}}$ e por estar na mesma temperatura de referência de R_0 é possível, por meio do cálculo do erro relativo percentual entre R_0 e $R_{0_{calc}}$ apresentado na equação (26), detectar se o enrolamento apresenta ou não falha. Além disso, caso seja detectada a falha, é possível calcular sua intensidade.

$$Curto = \frac{|R_0 - R_{0_{calc}}|}{R_0} \cdot 100 \quad (26)$$

6 PROCEDIMENTOS E RESULTADOS

6.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização dos testes em bancada são utilizados os seguintes equipamentos, conforme listados na Tabela 3 e ilustrados na Figura 12.

Tabela 4 – Materiais utilizados nos testes em bancada.

Item	Descrição	Quant.
1	Fonte de Tensão DC – Minipa MPL-3303M	1
2	Multímetro – Minipa MDM-8045B	1
3	Notebook	1
4	Multímetro - Icel Manaus MD 6390	1
5	DAQ – National Instruments NI USB-6009	1
6	Sensor de corrente	1
7	Motor de Indução Trifásico – WEG W22 PLUS	1

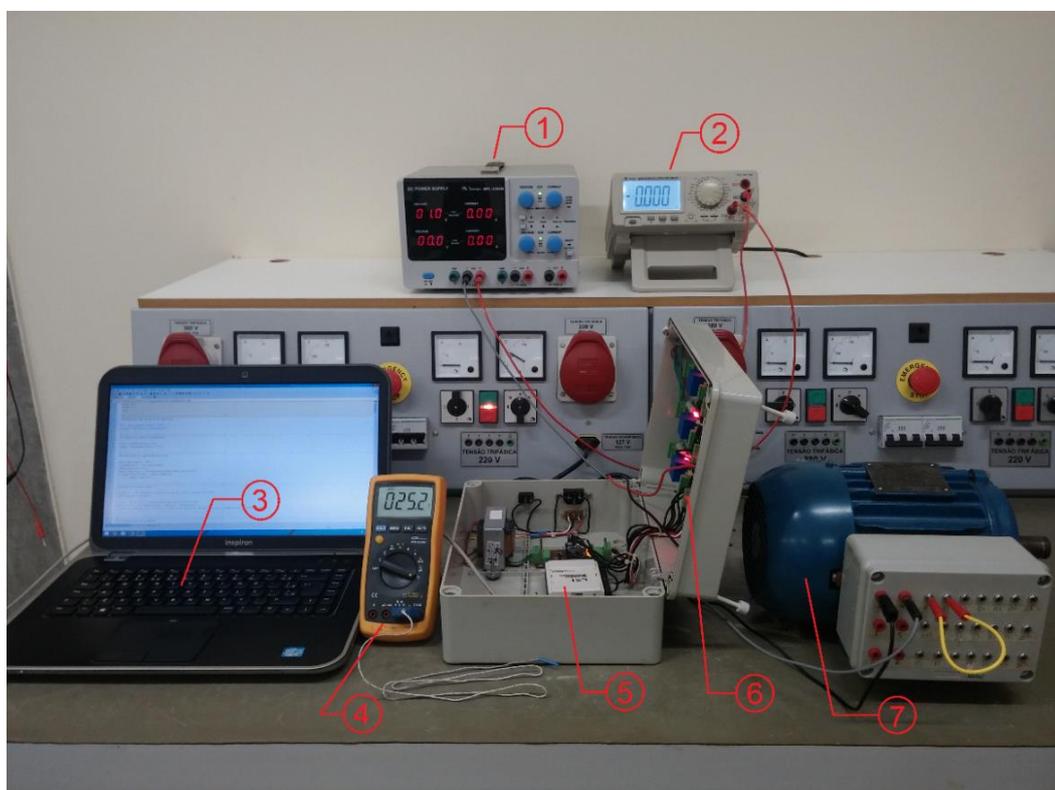


Figura 12 – Materiais utilizados nos testes em bancada

Fonte: Autoria própria.

6.2 ETAPAS DO PROCESSO EXPERIMENTAL

Na etapa experimental do método, os equipamentos utilizados foram ligados conforme o esquema ilustrado na Figura 13.

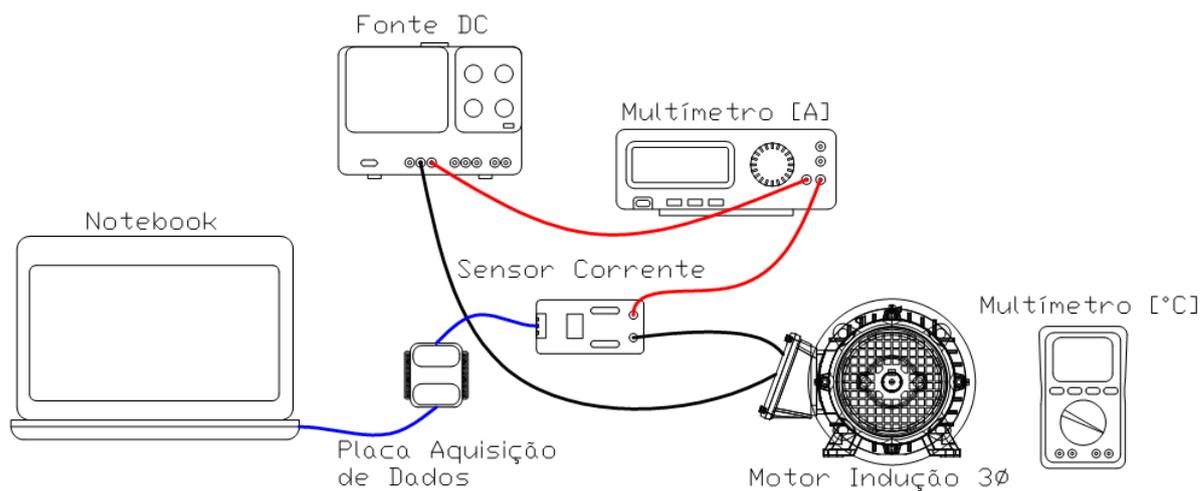


Figura 13 – Esquema de ligação para o processo experimental

Fonte: Autoria própria.

Para a realização prática do método foram seguidos os seguintes passos:

- 1ª Passo – Realizar a calibração do sensor de corrente, ajustando o ganho do mesmo. Uma vez calibrado não será mais necessária sua calibração.
- 2ª Passo – Com o auxílio de um multímetro, registrar um valor de temperatura, em graus celsius, e seu respectivo valor de resistência, para o motor sem o curto aplicado. Estes valores registrados são adotados como valores de base para normalização da resistência e representados por T_0 e R_0 respectivamente. Estes valores são utilizados para normalizar os valores de resistências R_1 , registradas nas respectivas temperaturas T_1 .
- 3ª Passo – Realizar 10 aquisições de dados de corrente para cada nível de curto na resistência, sendo estes 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 15% e 20%.

- 4º Passo – Por meio dos dados de corrente aquiritados é possível plotar a representação gráfica da corrente. As curvas de corrente plotadas apresentam muitos ruídos, portanto é necessário que se apliquem filtros para se obter um sinal menos ruidoso.
- 5º Passo – Utilizar a curva de corrente filtrada para aplicação do método proposto.
- 6º Passo – Após obtidos os resultados, realizar uma análise dos mesmos, comprovando assim a eficácia do método.

6.3 RESULTADOS OBTIDOS

Para a aquisição da curva de corrente aplica-se, por meio do chaveamento da fonte DC, um degrau de 1 volt, durante 8 segundos, no enrolamento estático do motor. A frequência de amostragem de dados adotada é de 7500 amostras/segundo, obtendo assim uma curva de corrente semelhante ao ilustrado na Figura 14.

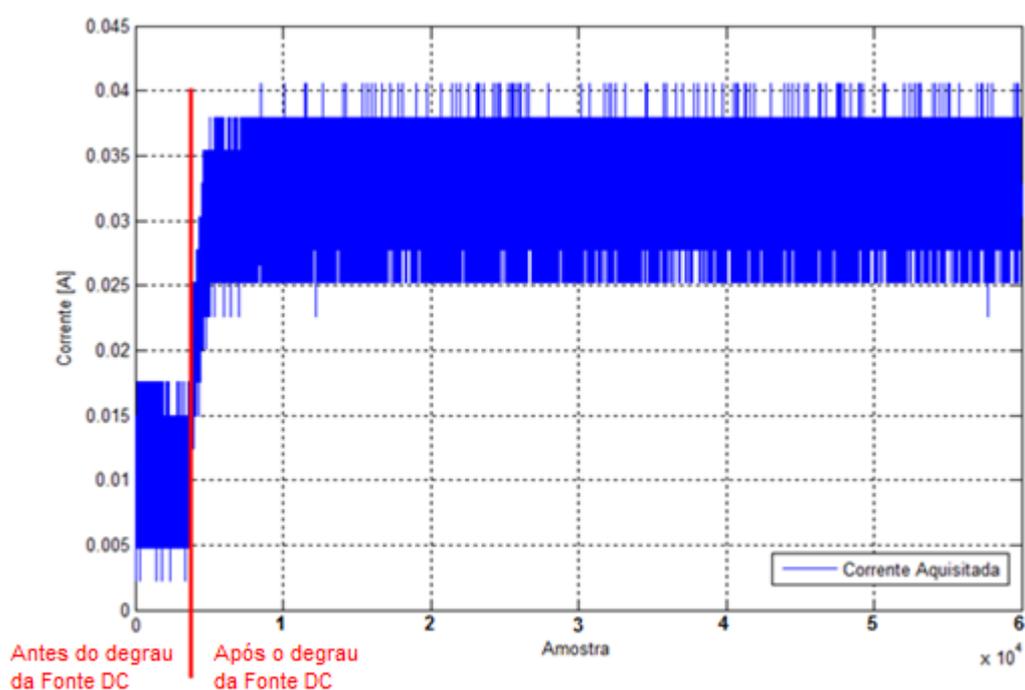


Figura 14 – Curva de corrente aquiritada

Fonte: Autoria própria.

O sinal obtido, conforme ilustrado na Figura 14, contém muitas variações devido a erros de quantização e, portanto, é necessária sua filtragem. Após a filtragem do sinal, utilizando os filtros de Butterworth, disponível na biblioteca do Matlab, de ordem 1 (PERES, 2014), e Análise de Espectro Singular (SCALASSARA et al., 2004), e também manipulando o algoritmo utilizado, para excluir os dados do sinal adquirido antes do degrau da fonte DC, obtém-se um sinal semelhante ao ilustrado na Figura 15.

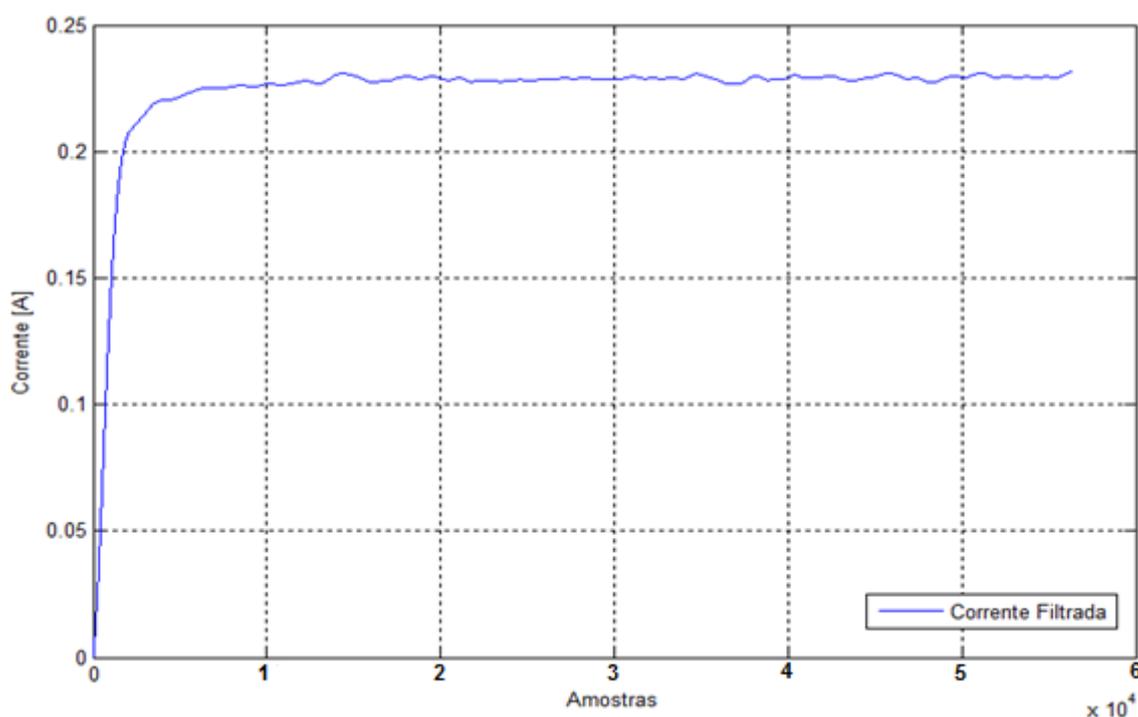


Figura 15 – Curva de corrente filtrada

Fonte: Autoria própria.

Obtida a curva de corrente filtrada é possível então, de forma mais precisa, calcular o valor médio da corrente no trecho em regime estacionário.

Para calcular o valor médio da corrente foram selecionados os dados contidos no trecho que consiste entre a amostra 14000 e 50000, ou seja, foram utilizadas 36000 amostras. Após obtido o valor médio da corrente estacionária é possível então calcular o valor da resistência, nomeada R_1 , do enrolamento na temperatura T_1 .

Os valores de base adotados para normalização da resistência, representados por R_0 e T_0 , foram de 4,5390 Ω e 25,7 °C respectivamente. A partir destes dados são normalizados todos os valores de resistência R_1 obtidos.

Os resultados obtidos, para o motor sem curto, estão registrados na Tabela 4. Nesta tabela estão contidos os valores de temperatura T_1 do enrolamento do estator durante a aquisição dos dados, os valores de $R_{0_{calc}}$, os valores dos níveis de curtos-circuitos detectados e calculados, utilizando a equação (26), e também o valor do erro quadrático médio.

O valor do erro quadrático médio é obtido por meio da comparação entre a curva de corrente filtrada, normalizada para a temperatura T_0 , adquirida para diferentes níveis de curto, e a curva de corrente teórica sem curto, também à temperatura T_0 . Para o cálculo do erro quadrático médio foram selecionadas, ao longo de cada curva, 500 amostras. A equação (27) demonstra como o este valor pode ser obtido.

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^{500} (I_{aqf} - I_{teo})^2}{500} \quad (27)$$

onde: I_{aqf} : corrente adquirida filtrada

I_{teo} : corrente teórica sem curto

Tabela 5 – Resultados obtidos para um curto aplicado de 0%.

T_1	$R_{0_{calc}}$	% Curto	Erro quadrático
25,5	4,5432	0,0915	0,1232
25,5	4,5376	0,0315	0,1254
25,5	4,5354	0,0804	0,1050
25,6	4,5439	0,1069	0,1166
25,6	4,5446	0,1230	0,1187
25,6	4,5413	0,0505	0,1178
25,6	4,5399	0,0206	0,1306
25,7	4,5444	0,1182	0,1216
25,7	4,5459	0,1525	0,1195
25,7	4,5335	0,1206	0,1187

A Figura 16, a qual contém dados extraídos da primeira aquisição para o enrolamento sem curto, ilustra, respectivamente, (a) as curvas de corrente aqisitada, (b) corrente filtrada e (c) a comparação entre a corrente aqisitada filtrada com a corrente teórica, ambas com o mesmo nível de curto aplicado, comprovando a similaridade entre o modelo do sistema teórico com o real.

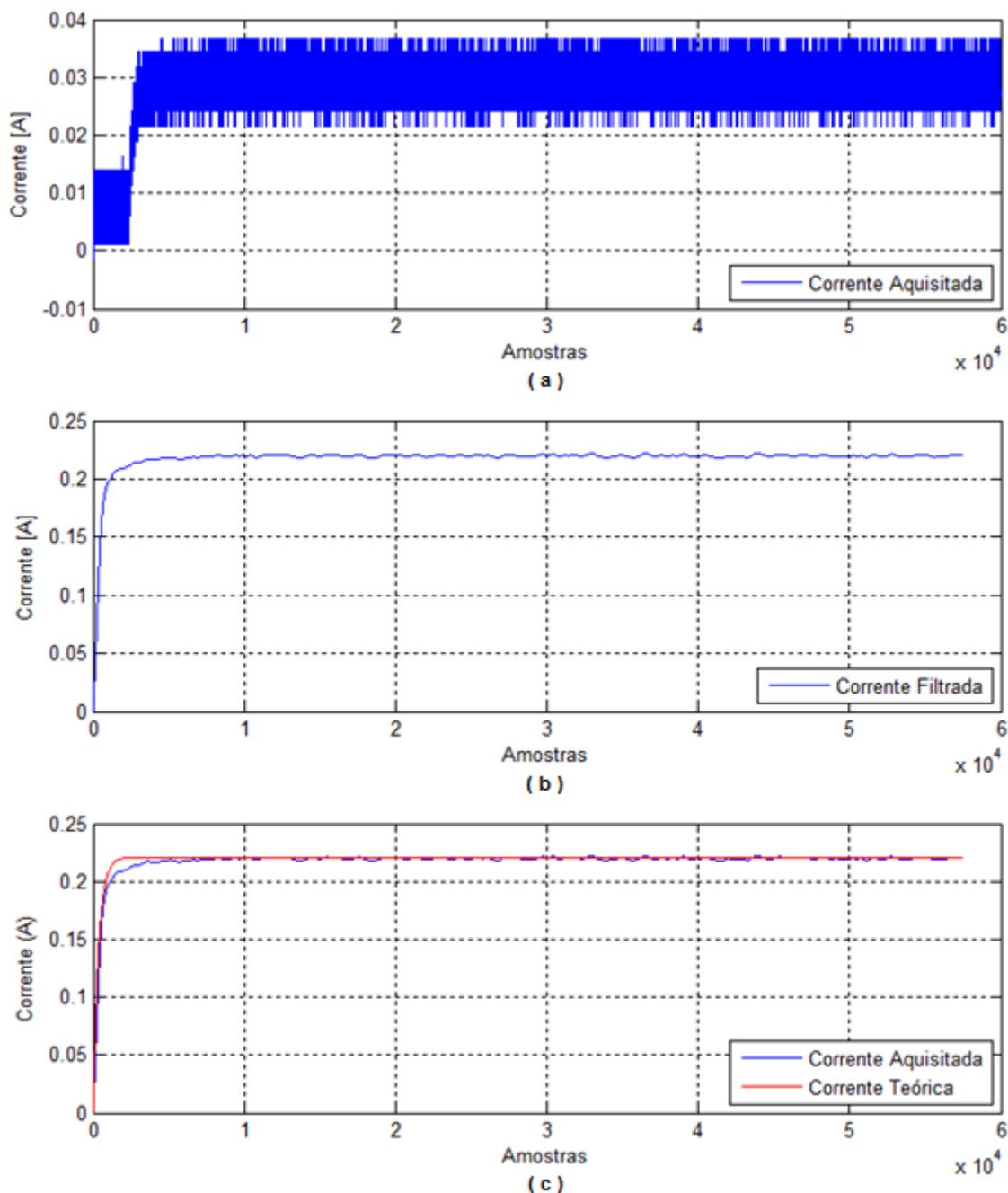


Figure 16 – Curvas de corrente para nível de curto de 0%

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma foram obtidos os resultados para os níveis de curto de 1%, 3%, 5%, 10%, 15% e 20% conforme registrados nas Tabelas 5, 6, 7, 8, 9 e 10 respectivamente.

Tabela 6 – Resultados obtidos para um curto aplicado de 1%.

T_1	$R_{0_{calc}}$	% Curto	Erro quadrático
25,7	4,4721	1,4737	0,1759
25,7	4,4727	1,4617	0,1830
25,8	4,4888	1,1049	0,1411
25,8	4,4868	1,1492	0,1494
25,8	4,4927	1,0201	0,1347
25,8	4,4856	1,1768	0,1456
25,8	4,4858	1,1714	0,1531
25,6	4,4919	1,0385	0,1389
25,6	4,4892	1,0977	0,1379
25,6	4,4878	1,1284	0,1486

Tabela 7 – Resultados obtidos para um curto aplicado de 3%.

T_1	$R_{0_{calc}}$	% Curto	Erro quadrático
25,6	4,3768	3,5743	0,6594
25,6	4,3814	3,4715	0,6394
25,6	4,3684	3,7595	0,7083
25,6	4,3821	3,4560	0,5995
25,6	4,3772	3,5638	0,6438
25,6	4,3774	3,5599	0,6611
25,6	4,3786	3,5342	0,6594
25,6	4,3763	3,5848	0,6613
25,6	4,3867	3,3550	0,5940
25,6	4,3857	3,3780	0,6006

Tabela 8 - Resultados obtidos para um curto aplicado de 5%.

T_1	$R_{0_{calc}}$	% Curto	Erro quadrático
25,6	4,2403	6,5810	2,2917
25,6	4,2331	6,7395	2,3760
25,6	4,2691	5,9467	1,8163
25,6	4,2666	6,0006	1,8536
25,6	4,2605	6,1357	1,9584
25,6	4,2595	6,1569	1,9916
25,6	4,2652	6,0318	1,8775
25,6	4,2605	6,1357	1,9662
25,6	4,2616	6,1120	1,9638
25,6	4,2593	6,1616	1,9944

Tabela 9 - Resultados obtidos para um curto aplicado de 10%.

T_1	$R_{0_{calc}}$	% Curto	Erro quadrático
25,6	3,9949	11,9869	8,6288
25,6	3,9947	11,9919	8,6770
25,6	3,9922	12,0460	8,7243
25,6	3,9953	11,9794	8,6873
25,6	3,9922	12,0465	8,7379
25,6	3,9970	11,9400	8,5637
25,6	4,0063	11,7361	8,2461
25,6	3,9984	11,9100	8,5230
25,6	3,9925	12,0393	8,7592
25,6	3,9891	12,1155	8,8387

Tabela 10 – Resultados obtidos para um curto aplicado de 15%.

T_1	$R_{0_{calc}}$	% Curto	Erro quadrático
25,7	3,6414	19,7743	28,3452
25,7	3,6458	19,6792	28,0437
25,7	3,6364	19,8844	28,7499
25,7	3,6428	19,7439	28,2367
25,7	3,6433	19,7329	28,2383
25,7	3,6394	19,8193	28,5088
25,7	3,6418	19,7661	28,4820
25,6	3,6515	19,5531	27,6710
25,6	3,6486	19,6161	27,9205
25,6	3,6413	19,7768	28,4113

Tabela 11 – Resultados obtidos para um curto aplicado de 20%.

T_1	$R_{0_{calc}}$	% Curto	Erro quadrático
25,6	3,3281	26,6775	62,7527
25,6	3,3237	26,7757	63,1066
25,6	3,3203	26,8501	63,8545
25,6	3,3175	26,9111	64,3598
25,6	3,3234	26,7805	63,3845
25,6	3,3220	26,8130	63,7456
25,6	3,3233	26,7837	63,4590
25,6	3,3231	26,7879	63,4501
25,6	3,3137	26,9959	64,8478
25,6	3,3157	26,9498	64,3102

Nas Figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22 estão ilustrados, respectivamente, as curvas de corrente para os níveis de curto de 1%, 3%, 5%, 10%, 15% e 20%. Todas as figuras foram plotadas a partir de dados extraídos da primeira aquisição, para os respectivos níveis de curto.

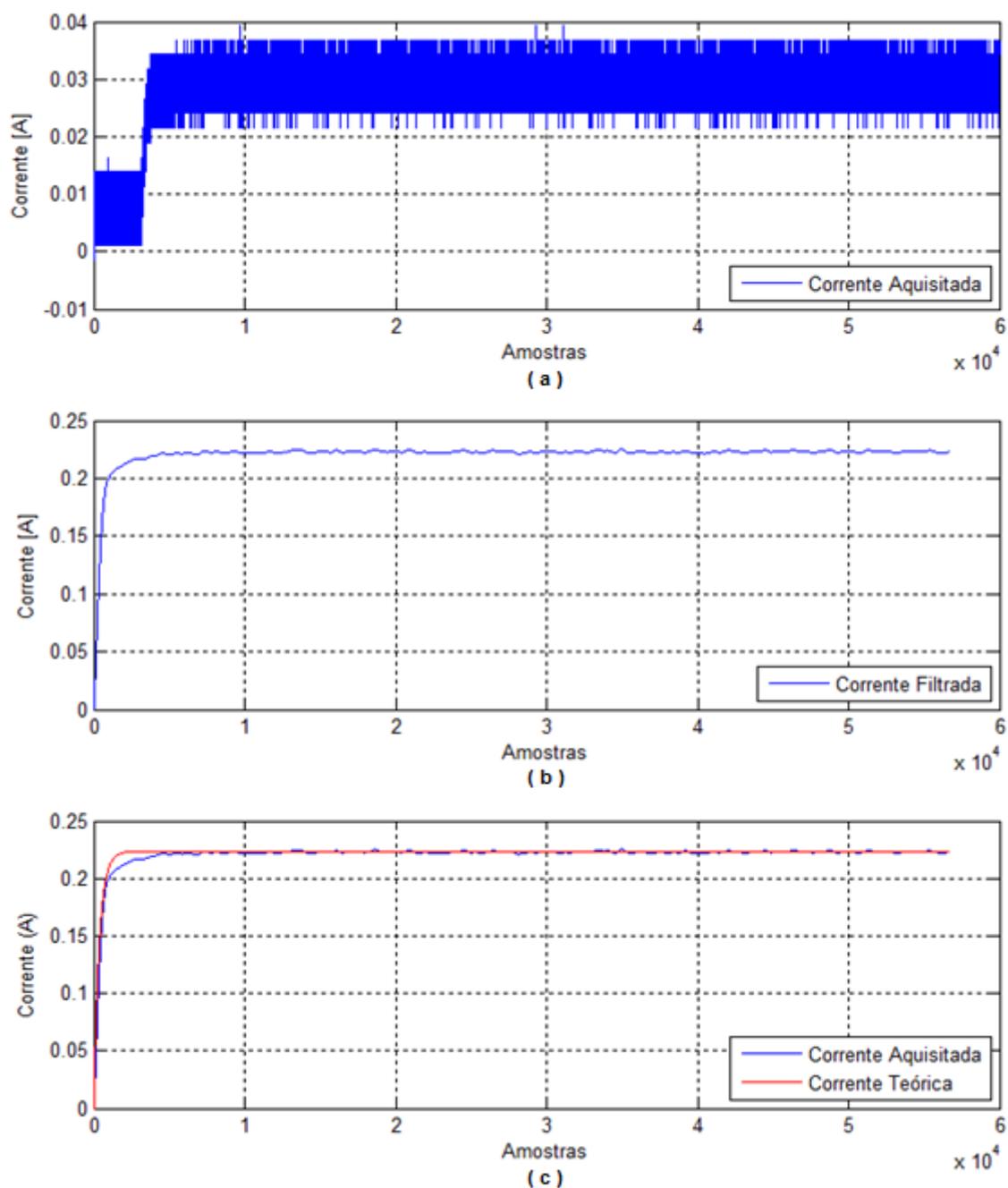


Figura 17 – Curvas de corrente para nível de curto de 1%

Fonte: Autoria própria.

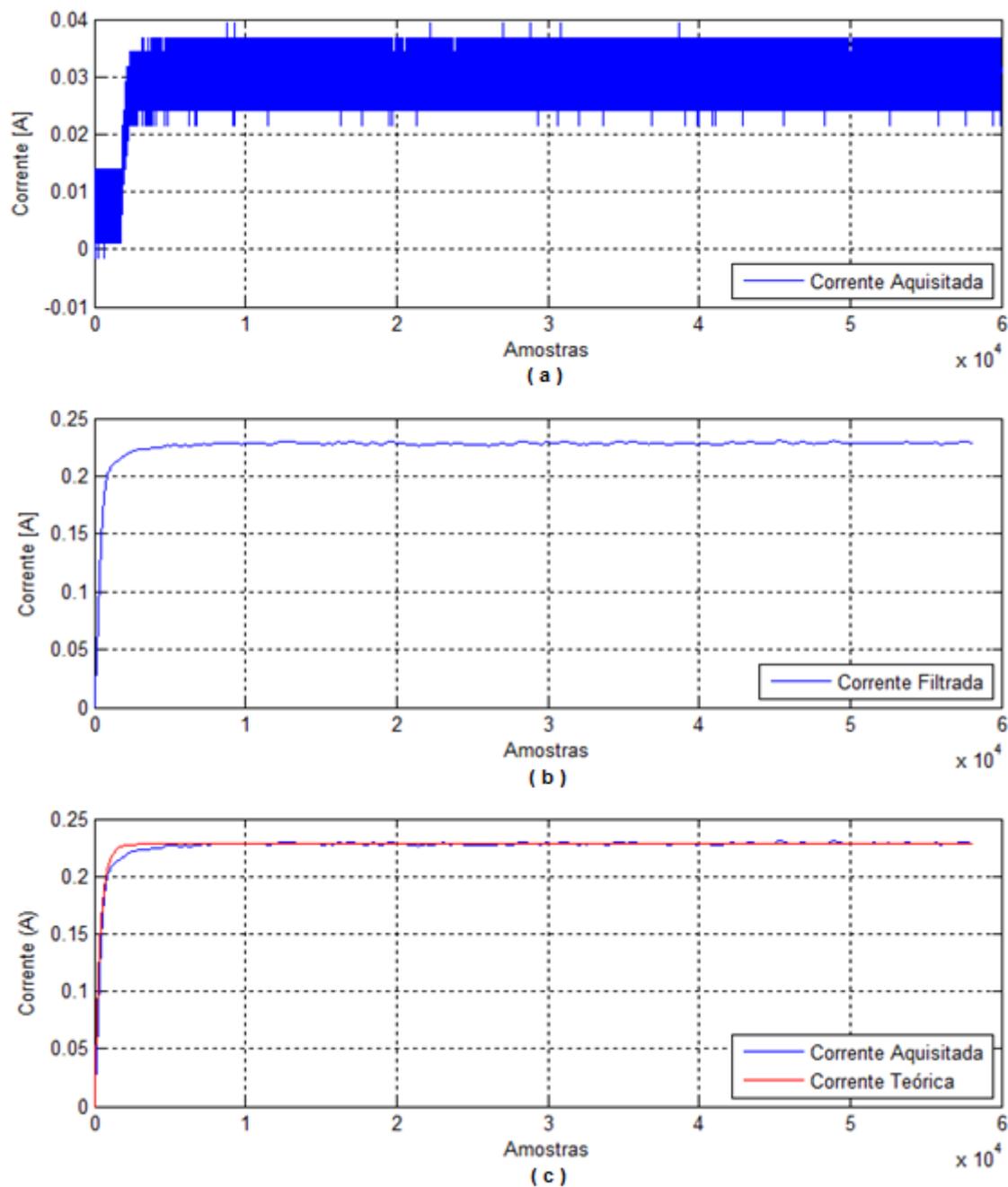


Figura 18 – Curvas de corrente para nível de curto de 3%

Fonte: Autoria própria.

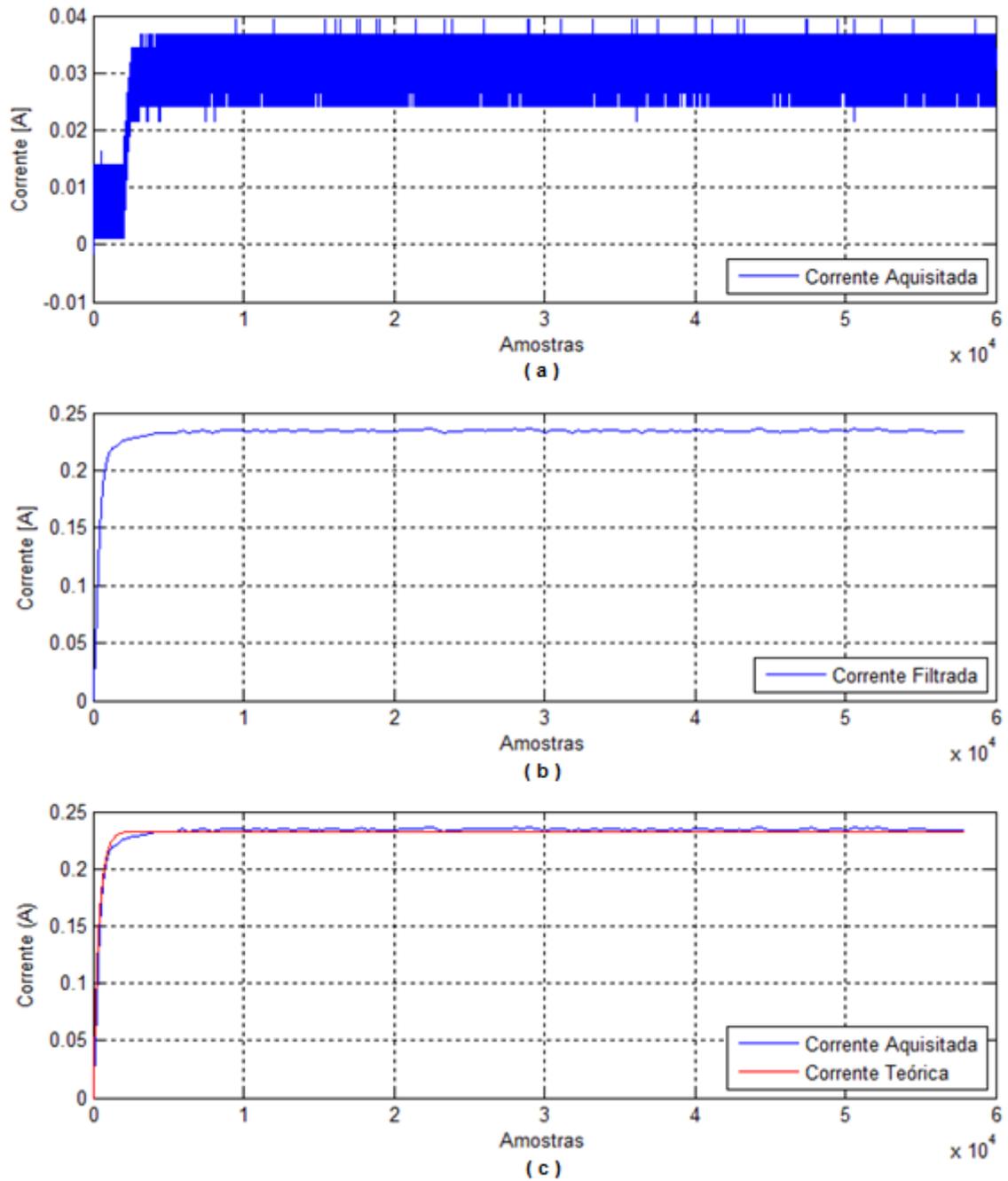


Figura 19 – Curvas de corrente para nível de curto de 5%

Fonte: Autoria própria.

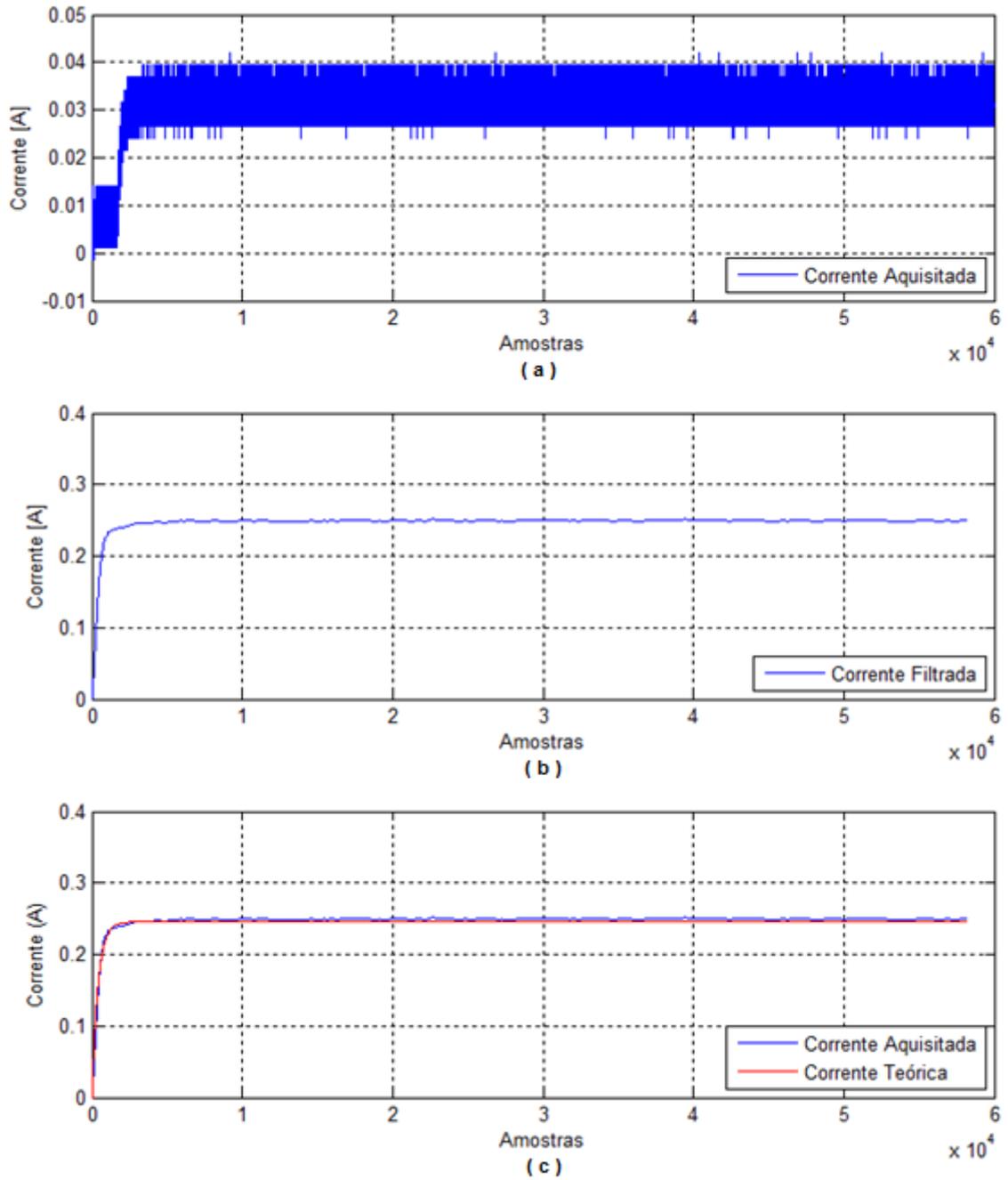


Figura 20 – Curvas de corrente para nível de curto de 10%

Fonte: Autoria própria.

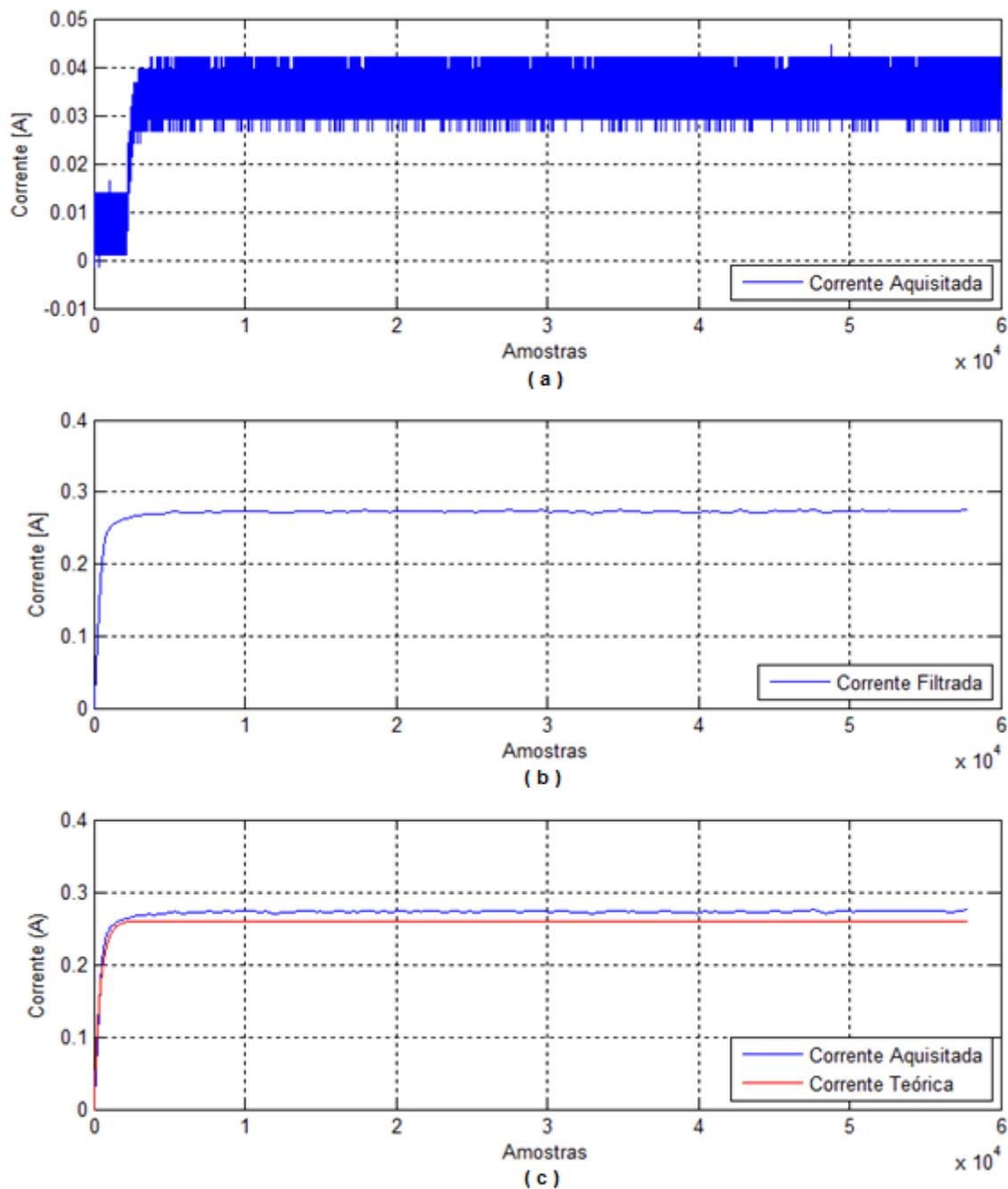


Figura 21 – Curvas de corrente para nível de curto de 15%

Fonte: Autoria própria.

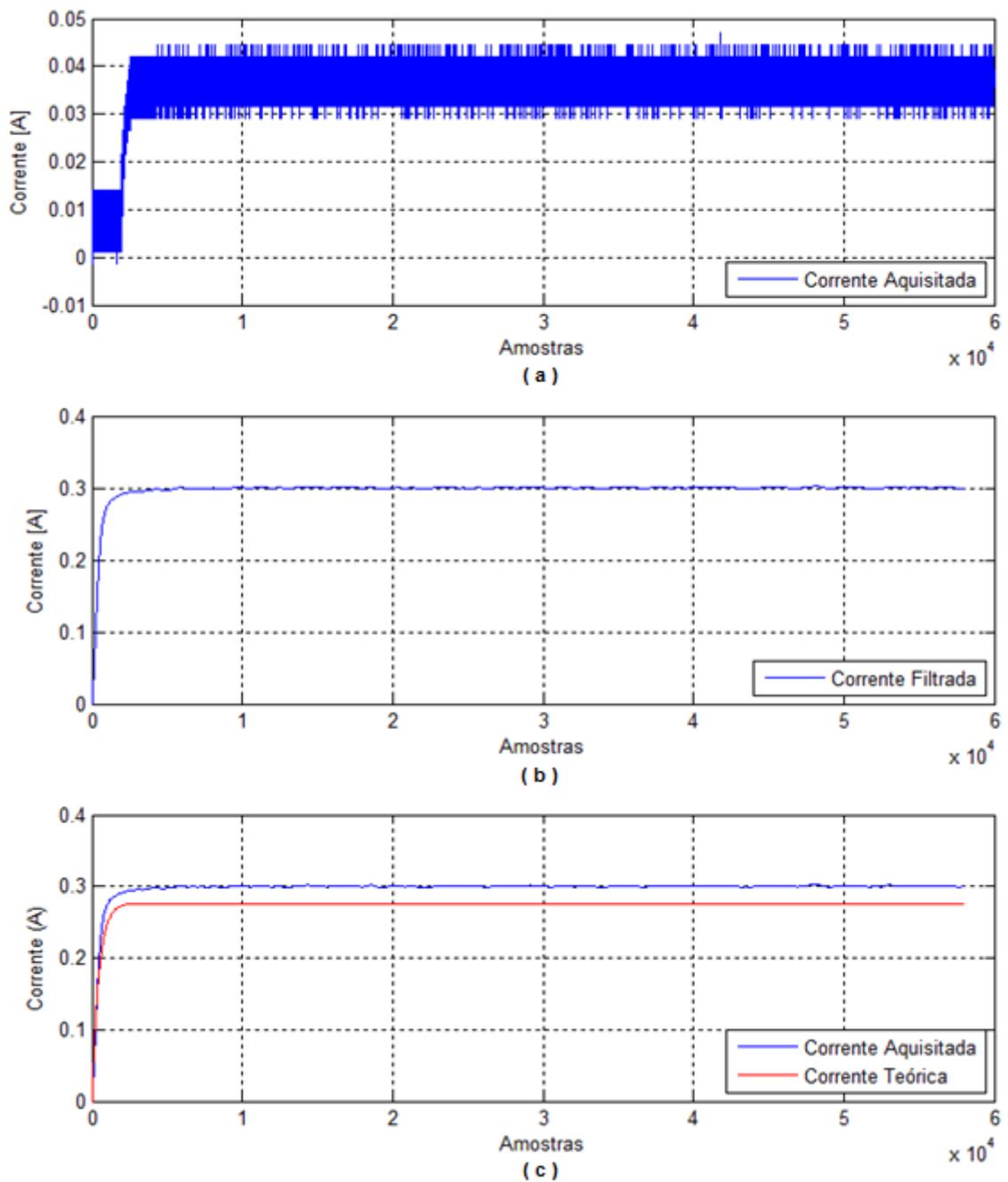


Figura 22 – Curvas de corrente para nível de curto de 20%

Fonte: Autoria própria.

Após obtidos os dados de erro quadrático médio, por meio da comparação entre as curvas de corrente filtrada aquisitada e corrente teórica sem curto, foi construído um gráfico, ilustrado na Figura 23, representando a evolução do erro quadrático obtido em função da porcentagem de curto presente no enrolamento.

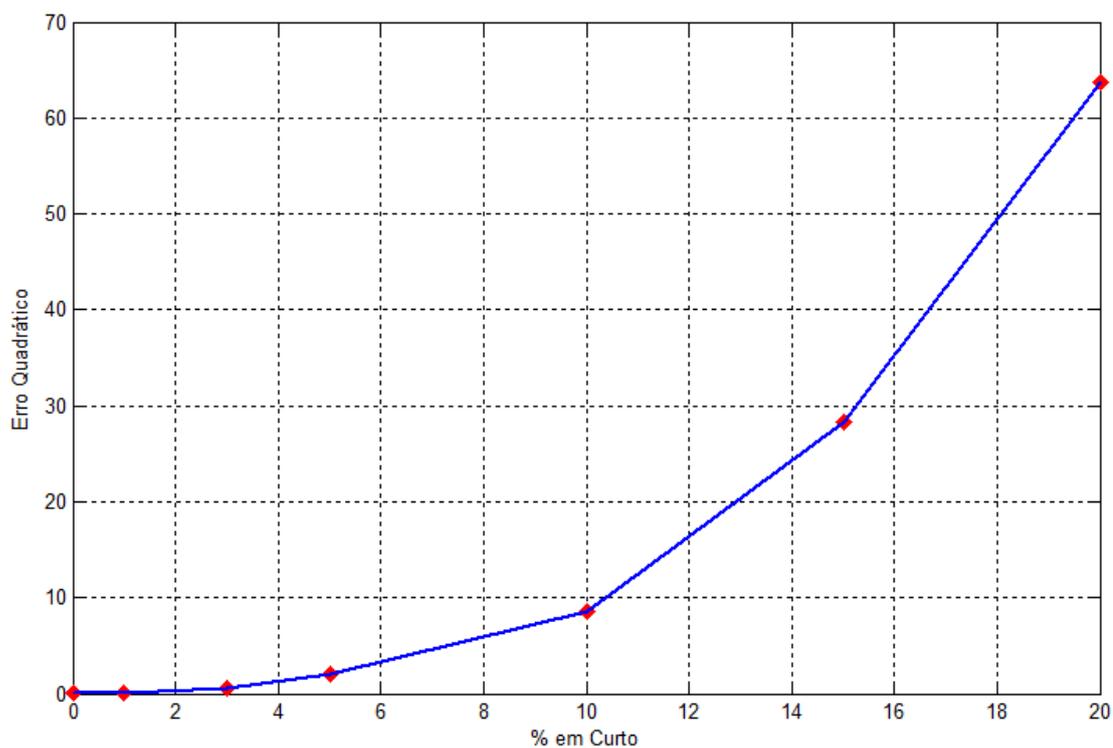


Figura 23 – Porcentagem de curto no enrolamento X Erro quadrático médio

Fonte: Autoria própria.

7 CONCLUSÃO

Neste projeto foi apresentado um método capaz de detectar curtos-circuitos presentes no enrolamento estatórico de um motor de indução trifásico e determinar seus níveis. Os testes foram realizados utilizando um motor WEG W22 Plus de 2,0 cv, pertencente ao Laboratório de Sistemas Inteligentes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o método proposto é eficiente para a tarefa solicitada. Um fator extremamente importante, que influencia na qualidade dos resultados obtidos, é a calibração do sensor de corrente. Por este motivo deve-se atentar para que o sensor esteja devidamente calibrado.

Outro fator que influencia diretamente na qualidade dos resultados é a precisão dos equipamentos de medição utilizados. O método apresentou bons resultados, pois foram utilizados equipamentos com boa qualidade de precisão, porém o mesmo pode ser comprometido caso sejam usados equipamentos com baixa qualidade de precisão.

Os gráficos de corrente obtidos apresentaram erros de quantização, provenientes da placa de aquisição de dados utilizada, devido ao baixo sinal de degrau aplicado. Tais erros não influenciaram nos resultados, visto que, após a filtragem do sinal estes erros foram minimizados e no fim bons resultados foram obtidos.

No caso deste projeto foi utilizado, para estudo e desenvolvimento do método, um motor de indução trifásico, porém, este mesmo método pode ser aplicado a qualquer tipo de equipamento que possui enrolamentos. Portanto pode ser aplicado para detectar curtos-circuitos em transformadores, geradores e outros tipos de motores elétricos. Deste modo, este trabalho é muito válido, uma vez que provou a eficácia e aplicabilidade do método proposto.

Além disso este método pode ser utilizado em trabalhos futuros para o desenvolvimento de um protótipo, embarcando em um sistema microcontrolado, podendo assim ser aplicado na indústria.

REFERÊNCIAS

ANNUNCIACÃO, Luiz. **Estudo do Impacto do Sistema de Acionamento de um Motor de Indução Trifásico na Eficiência Energética e na Qualidade da Energia Elétrica: Um Estudo de Caso – Elevador de Canecas**. 2011. 146 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

BENBOUZID, Mohamed E. H.; VIEIRA, Michelle; THEYS, Céline. **Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques**. IEEE Transaction on Power Electronics, v.14 (1), pp. 14-22, 1999.

BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K. **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting**. 3ª ed. vol. 2, Gulf Professional Publishing, Houston, 1999.

BONNETT, Austin H.; SOUKUP, George C. **Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors**. IEEE - Transaction on Industrial Application, v.28 (4), pp. 921-937, 1992.

BONNETT, Austin H. **A comparison between insulation systems available for PWM-inverter-fed motors**. IEEE Trans. Industry Applicat., vol. 33, nº 5, pp. 1331-1341, September/October 1997.

BRITO, Jorge N. **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. 2002. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

CAVALCANTE, Ronaldo F. **Elementos de Ciência dos Materiais**. 2003. 13 f. Apostila de Materiais Elétricos – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2003.

CHOW, Mo-Yuen; YEE, Sui O. **Methodology for on-line incipient fault detection in single-phase squirrel-cage induction motors using artificial neural network.** IEEE Transactions on Energy Conversion. v.6 (3), 1991.

CRUZ, Sérgio M. A. **Diagnóstico e Análise de Avarias nos Enrolamentos Estatóricos de Motores de Indução Trifásicos Através da Aplicação do Método dos Referenciais Múltiplos.** 2004. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrônica) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas.** 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FRANCISCO, António M. S. **Motores de Indução Trifásicos.** 2006. 12 f. Notas de Aula. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestanda/maquinas%20el%C3%A9ctricas%202/aulas%20te%C3%B3ricas/Motores_inducao_tri.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2014, 22:30.

GUEDES, Manuel V. **O motor de Indução Trifásico: Seleção e Aplicação.** 1994. 75 f. Notas de aula – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1994.

GOEDEL, Alessandro. **Estimador Neural de Velocidade para Motores de Indução Trifásicos.** 2007. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HATTANGADI, A. A. **Plant and Machinery Failure Prevention.** McGraw-Hill, 2005.

HUBERT, Charles I. **Electric machines: theory, operation, applications, adjustment and control.** 2nd ed. Merrill Pub Co., 1991.

IRWIN, J. David. **Análise básica de circuitos para engenharia.** 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

JOKSIMOVIC, Gojko M.; PENMAN, James. **The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, n°. 5, p.1078-1084, Oct. 2000.

KOSOW, Irving L. **Maquinas elétricas e transformadores.** 15.ed. São Paulo: Globo, 2005.

NANDI, Subhasis; TOLIYAT, Hamid A.; LI, Xiaodong. **Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review.** IEEE Transaction on Energy Conversion, [S.I.], v.20, n.4, p.719-729, 2005.

PAZZINI, Luiz H. A. **Acionamentos Elétricos – Motores de Indução Trifásicos.** 2002. 13 f. Notas de Aula – Faculdades Integradas de São Paulo, São Paulo, 2002.

PEREIRA, Luís A.; GAZZANA, Daniel S.; PEREIRA, Luís F. A. **Motor current signature analysis and fuzzy logic applied to the diagnosis of short-circuit faults in induction motors.** In: ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON), 32, 2005. Proceedings... [S.I.], 2005. p.6.

PERES, Pedro L. D. **Análise de Sinais – Filtros.** 2014. Notas de Aula – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2014.

PINHEIRO, Hélio H. C. **Sistema para Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução Utilizando Lógica Fuzzy.** 2011. 103 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2011.

REIS, Anderson J. S. **Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos Utilizando Redes Neurais.** 2010. 88 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2010.

SANTOS, Afonso H. M.; SIMÕES, Alexandre A.; MARTINS, André R. S.; VIANA, Augusto N. C.; FERREIRA, Cláudio; BORTONI, Edson C.; GUARDIA, Eduardo C.; LORA, Electro E. S.; NOGUEIRA, Fábio J. H.; TEIXEIRA, Flávio N.; HADDAD, Jamil; CORTEZ, José A.; NOGUEIRA, Luiz A. H.; ALMEIDA, Manuel S. V.; PIRANI, Marcelo J.; DIAS, Marcos V. X.; MARQUES, Milton C. S.; VENTURINI, Osvaldo; GAMA, Paulo H. R. P.; MENDES, Pedro P. C.; YAMACHITA, Roberto A.; DA SILVA, Valberto F. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações.** 3ª ed. Itajubá, 2006. 621 p.

SCALASSARA, Paulo R.; BARIN, Claudia S.; MACIEL, Carlos D. Minimização de Ruído Eletroquímico Usando Processamento Digital de Sinais. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 25, n. 2, p. 135-144, dez. 2004.

SIDDIQUE, Arfat; YADAVA, G. S.; SINGH, Bhim. **A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors.** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, Março de 2005, pp 106-114.

STONE, Greg C.; BOULTER, Edward A.; CULBERT, Ian; DHIRANI, Hussein. **Electrical Insulation For Rotating Machines-Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair.** IEEE Press and A John Wiley & Sons, INC., 2004, ch. 4.

SUETAKE, Marcelo. **Sistemas Inteligentes para Monitoramento e Diagnósticos de Falhas em Motores de Indução Trifásicos.** 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TONI, Krstevski; SLOBODAN, Mirčevski; ALEKSANDAR, Bučkovski. **Detection of Turn to Turn Faults in Stator Winding with Axial Magnetic Flux in Induction Motors.** In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE (IEMDC), 2007. Proceedings... [S.l.], 2007. v.1, p.826-829.

YEH, Chia-Chou; DEMERDASH, Nabeel A. O. **Induction Motor-Drive Systems with Fault Tolerant Inverter-Motor Capabilities**. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE (IEMDC), 2007. Proceedings...[S.l.: s.n.], 2007. v.2, p.1451-1458.

WEG. **Motores de Indução Trifásico**. Catálogo Linha Master. 2014. 26 f. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-trifasicos-linha-master-50009359-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2014, 20:20.