

**FACULDADE DOCTUM
TIAGO FARIA SILVA GOMES**

**DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO ATRAVÉS DE
DIAGRAMAS FASORIAIS**

Juiz de Fora
2018

TIAGO FARIA SILVA GOMES

**DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO ATRAVÉS DE
DIAGRAMAS FASORIAIS**

Monografia de Conclusão de Curso, apresentada ao curso de Engenharia Elétrica, Faculdade Doc-tum de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. M.Sc. Kamila Peres Rocha

Juiz de Fora

2018

Gomes, Tiago Faria Silva.
Detecção de Falhas em Motores de Indução através de
Diagramas Fasoriais / Tiago Faria Silva Gomes – 2018.
110f.

Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) –
Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Motor de Indução. 2. Detecção de Falhas
I. Detecção de Falhas em Motores de Indução através de
Diagramas Fasoriais. II Faculdade Doctum Juiz de Fora

Tiago Faria Silva Gomes

Detecção de Falhas em Motores de Indução através de Diagramas Fasoriais

Monografia de Conclusão de Curso, submetida à Faculdade Doctum de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada pela seguinte banca examinadora.

Prof^{da}. M.Sc. Kamila Peres Rocha
Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Prof. M.Sc. Luis Gustavo Schröder e Braga
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Prof. M.Sc. Mozart Ferreira Braga Junior
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Examinada em: ___/___/___.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me concedido saúde e sabedoria em minha trajetória acadêmica, iluminando meus caminhos para que todos os objetivos traçados neste período de formação profissional fossem alcançados com êxito.

Em especial a minha querida mãe Efigênia Faria pelo carinho e suporte dado durante todo o período de graduação.

Aos meus familiares pelo incentivo e toda ajuda proporcionada durante esta jornada acadêmica.

Ao professor e coordenador do curso de Engenharia Elétrica da faculdade Doctum de Juiz de Fora Luis Gustavo Schröder e Braga pela dedicação, pelo compromisso e carinho depositado, em prol do curso de engenharia elétrica, sempre buscando a excelência.

A minha orientadora Kamila Peres, pela confiança, incentivo e orientação frente a este trabalho.

A todos os professores que contribuíram e enriqueceram minha formação acadêmica, com seus conhecimentos, experiências e dedicação irrestrita, tornando este período único em minha vida.

Muito obrigado a todos.

Aos colegas que convivi estes anos de graduação, trocando experiências, compartilhando conhecimentos e principalmente pelos vínculos de amizade criados.

RESUMO

O motor de indução trifásico é a principal fonte de conversão de energia elétrica em energia mecânica do setor industrial. Estes estão sujeitos a esforços térmicos, elétricos e mecânicos, que por sua vez, podem acarretar em falhas as quais comprometem seu rendimento e podem retirá-los de operação, produzindo perdas e aumentando custos de manutenção em ambientes industriais. Diante disto, este trabalho apresenta um sistema de detecção de falhas localizadas no estator, rotor e nos rolamentos do motor de indução trifásico a partir do comportamento das grandezas de tensão, corrente e velocidade do motor mediante as falhas incididas. Diagramas fasoriais de tensão e corrente, assim como gráficos de velocidade, esboçam o perfil da falha ocorrida no motor de indução, permitindo deste modo, sua detecção.

Palavras-chave: Motor de Indução, Detecção de Falhas, Diagramas Fasoriais.

ABSTRACT

The three-phase induction motor is the main source of conversion of electrical energy into mechanical energy of the industrial sector. They are subject to thermal and electrical and mechanical stresses which, in their turn, can lead to failures which compromise their performance and can remove them from operation, producing losses and increasing maintenance costs in industrial environments. In view of this, this work presents a fault detection system located in the stator, rotor and three-phase induction motor bearings, based on the behavior of the voltage, current and motor speed values, due to the faults. Phasor diagrams of voltage and current, as well as speed graphs, outline the fault profile in the induction motor, thus allowing its detection.

Key-words: Induction Motor, fault detection, Phasor Diagrams.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de motores elétricos	21
Figura 2 – Rotor do tipo gaiola de esquilo	23
Figura 3 – Motor de indução de rotor bobinado	24
Figura 4 – Partes integrantes do motor de indução trifásico	24
Figura 5 – Diagrama do fluxo de potência do MIT	26
Figura 6 – Circuito equivalente monofásico de um MIT trifásico	27
Figura 7 – Circuito utilizado para ensaio CC no MIT	29
Figura 8 – Circuito utilizado para ensaio de rotor bloqueado no MIT	29
Figura 9 – Circuito utilizado para ensaio a vazio no MIT	30
Figura 10 – Determinação do espectro da corrente no domínio da frequência	33
Figura 11 – Espectro da corrente de um motor sem falhas e com barras quebradas do rotor	34
Figura 12 – Origens das falhas do motor elétrico	38
Figura 13 – Origens das falhas do motor elétrico	39
Figura 14 – Origens das falhas do motor elétrico	39
Figura 15 – Motores com avarias originadas por curto-circuitos	40
Figura 16 – Motores com avarias originadas por sobretensão e falta de fase	40
Figura 17 – Motores com avarias originadas por sobreaquecimento e sobrecarga	41
Figura 18 – Avarias em rolamentos originadas por disfunção elétrica e passagem de corrente pelo rolamento	41
Figura 19 – Partes integrantes do rolamento	48
Figura 20 – Disposição do enrolamentos estatóricos e rotóricos	52
Figura 21 – Modelo de circuito idealizado de um motor de indução trifásico	53
Figura 22 – Representação do enrolamento trifásico em eixos dq	56
Figura 23 – Sistema de referência arbitrário em relação a fase a do motor de indução	57
Figura 24 – Gaiola simétrica do rotor e suas malhas	64
Figura 25 – Gaiola simétrica do rotor e suas malhas	65
Figura 26 – Fluxograma de simulação do modelo simétrico do motor de indução	67
Figura 27 – Tensões no estator do MIT nas Fases ABC	69
Figura 28 – Correntes no estator do MIT nas Fases ABC sem torque de carga aplicado	70
Figura 29 – Correntes no estator do MIT durante o regime transitório nas Fases ABC	70
Figura 30 – Velocidade do MIT sem torque de carga aplicado	71
Figura 31 – Circuito equivalente do MIT com destaque do ramo da corrente de magnetização	72
Figura 32 – Campos magnéticos do MIT sob a condição a vazio	72
Figura 33 – Torque eletromagnético produzido pelo MIT de indução sem torque de carga aplicado	73
Figura 34 – Fator de potência do MIT sem torque de carga aplicado	74
Figura 35 – Rendimento do motor em função da sua potência nominal	74
Figura 36 – Correntes no estator do MIT nas Fases ABC com torque de carga aplicado	75

Figura 37 – Correntes no estator do MIT nas Fases ABC durante aplicação do torque de carga	76
Figura 38 – Velocidade do MIT com torque de carga aplicado	76
Figura 39 – Torque eletromagnético produzido pelo MIT de indução com torque de carga aplicado	77
Figura 40 – Fator de potência do MIT com torque de carga aplicado	78
Figura 41 – Diagrama fasorial das tensões de linha do MIT simétrico	81
Figura 42 – Diagrama fasorial das correntes de linha do estator do MIT simétrico	81
Figura 43 – Velocidade do MIT nominal sem falhas	82
Figura 44 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com decremento de 30% do valor da impedância estatórica	83
Figura 45 – Velocidade do MIT com decremento de 30% do valor da impedância estatórica	84
Figura 46 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com decremento de 99,99% do valor da impedância estatórica	85
Figura 47 – Velocidade do MIT com decremento de 99,99% do valor da impedância estatórica	86
Figura 48 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 40% do valor de impedância rotórica	88
Figura 49 – Velocidade do MIT com incremento de 40% do valor de impedância rotórica	88
Figura 50 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 400% do valor de impedância rotórica	90
Figura 51 – Velocidade do MIT com incremento de 400% do valor de impedância rotórica	90
Figura 52 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 35% do valor do coeficiente de atrito	92
Figura 53 – Velocidade do MIT com incremento de 35% do valor do coeficiente de atrito	92
Figura 54 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 500% do valor do coeficiente de atrito	94
Figura 55 – Velocidade do MIT com incremento de 500% do valor do coeficiente de atrito	94
Figura 56 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 2000% do valor do coeficiente de atrito	96
Figura 57 – Velocidade do MIT com incremento de 2000% do valor do coeficiente de atrito	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de falhas comuns em motores de indução	36
Tabela 2 – Estatísticas sobre falhas de motores elétricos	37
Tabela 3 – Possibilidade de ocorrência de falha no motor de indução	37
Tabela 4 – Efeito da temperatura ambiente sobre o isolamento do enrolamento estatórico	44
Tabela 5 – Parâmetros elétricos e mecânicos do motor de indução	68
Tabela 6 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT simétrico	82
Tabela 7 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com decremento de 30% do valor da impedância estatórica	85
Tabela 8 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com decremento de 99,99% do valor da impedância estatórica	87
Tabela 9 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 40% do valor de impedância rotórica	89
Tabela 10 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 400% do valor de impedância rotórica	91
Tabela 11 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 35% do valor do coeficiente de atrito	93
Tabela 12 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 500% do valor do coeficiente de atrito	95
Tabela 13 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 2000% do valor do coeficiente de atrito	97
Tabela 14 – Resumos do comportamento das grandezas analisadas mediante as falhas simuladas MIT	98
Tabela 15 – Resultados das Simulações do MIT sem e com falhas estatóricas	106
Tabela 16 – Resultados das Simulações do MIT sem e com falhas rotóricas	107
Tabela 17 – Resultados das Simulações do MIT sem e com falhas dos rolamentos	108
Tabela 18 – Continuação dos resultados das Simulações do MIT sem e com falhas dos rolamentos	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área da seção transversal do fio
A_b	Área da seção transversal da bobina
A	Ampère
CC	Corrente contínua
°C	Graus Celsius
\dot{E}_1	Força eletromotriz induzida, refletida ao estator
f_{se}	Frequência do sistema aplicada ao estator
H	Henry
\dot{I}_m	Corrente de magnetização por fase
\dot{I}'_1	Corrente de fase do estator
\dot{I}'_2	Corrente de fase do rotor refletida ao estator
i_{ar}	Corrente do rotor na fase A dada em ampère
i_{br}	Corrente do rotor na fase B dada em ampère
i_{cr}	Corrente do rotor na fase C dada em ampère
i_{as}	Corrente do estator na fase A dada em ampère
i_{bs}	Corrente do estator na fase B dada em ampère
i_{cs}	Corrente do estator na fase C dada em ampère
i'_{dr}	Corrente do rotor no eixo d referida ao estator dada em ampère
i_{ds}	Corrente do estator no eixo d dada em ampère
i'_{qr}	Corrente do rotor no eixo q referida ao estator dada em ampère
i_{qs}	Corrente do estator no eixo q dada em ampère
i'_{0r}	Corrente do rotor no eixo 0 referida ao estator dada em ampère
i_{0s}	Corrente do estator no eixo 0 dada em ampère
i_r^{abc}	Corrente total do rotor dada em ampère
i_s^{abc}	Corrente total do estator dada em ampère

J	Momento de inércia dado em $Kg \cdot m^2$
L_r	Indutância própria do rotor
L_{ra}	Indutância própria do rotor na fase A
L_{rb}	Indutância própria do rotor na fase B
L_{rc}	Indutância própria do rotor na fase C
L_s	Indutância própria do estator
L_{sa}	Indutância própria do estator na fase A
L_{sb}	Indutância própria do estator na fase B
L_{sc}	Indutância própria do estator na fase C
L_{rm}	Indutância mútua entre as fases do rotor
L_m	Indutância de magnetização
L_{rmab}	Indutância mútua do rotor entre as fases A e B
L_{rmbc}	Indutância mútua do rotor entre as fases B e C
L_{rmca}	Indutância mútua do rotor entre as fases C e A
L_m	Indutância de magnetização
L_{sm}	Indutância mútua entre as fases do estator
L_{smab}	Indutância mútua do estator entre as fases A e B
L_{smbc}	Indutância mútua do estator entre as fases B e C
L_{smca}	Indutância mútua do estator entre as fases C e A
L_{sr}^{abc}	Indutâncias mútuas do estator em relação ao rotor dadas em H
L_{rs}^{abc}	Indutâncias mútuas do rotor em relação ao estator dadas em H
L_{ls}	Indutância de dispersão do estator por fase
L_{ss}	Indutância própria do estator por fase
L_{lr}	Indutância de dispersão do rotor por fase
L'_{lr}	Indutância de dispersão do rotor referida ao estator por fase
L_{rr}	Indutância própria do rotor por fase

L_{ss}^{abc}	Submatriz de indutâncias do enrolamento do estator dada em H
L_{rr}^{abc}	Submatriz de indutâncias do enrolamento do rotor dada em H
K_v	Coefficiente de atrito viscoso dado em $N \cdot m \cdot s / rad$
KV	Quilovolt
MIT	Motor de Indução Trifásico
n	Número de barras quebradas no rotor;
N	Número total de barras do rotor
$N \cdot m$	Newton-metro
n_m	Velocidade mecânica do eixo do motor
n_{sinc}	Velocidade de rotação do campo magnético
P	Quantidade de polos do motor de indução
r_b	Resistência de uma barra do rotor
RPM	Rotações por minuto
r_s	Resistência do estator dada em Ω
r_r	Resistência do rotor dada em Ω
s	Escorregamento do motor de indução
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
T_L	Torque de carga do motor dado em $N \cdot m$
T_R	Torque resistente dado em $N \cdot m$
T_{em}	Torque eletromagnético dado em $N \cdot m$
$[T_{qd0}(\theta)]$	Matriz de transformação de Park
$[T_{qd0}(\theta)]^{-1}$	Matriz de transformação inversa de Park
V	Volt
\dot{V}	Tensão Monofásica aplicada ao enrolamento do estator
v_{ar}	Tensão no rotor na fase A dada em V
v_{br}	Tensão no rotor na fase B dada em V

v_{cr}	Tensão no rotor na fase C dada em V
v_{as}	Tensão no estator na fase A dada em V
v_{bs}	Tensão no estator na fase B dada em V
v_{cs}	Tensão no estator na fase C dada em V
v'_{dr}	Tensão do rotor no eixo d referida ao estator dada em V
v_{ds}	Tensão do estator no eixo d dada em V
v'_{qr}	Tensão do rotor no eixo q referida ao estator dada em V
v_{qs}	Tensão do estator no eixo q dada em V
v'_{0r}	Tensão do rotor no eixo 0 referida ao estator dada em V
v_{0s}	Tensão do estator no eixo 0 dada em V
λ_{ar}	Fluxo magnético do rotor na fase A dado em Wb
λ_{br}	Fluxo magnético do rotor fase B dado em Wb
λ_{cr}	Fluxo magnético do rotor fase C dado em Wb
λ_{as}	Fluxo magnético do estator na fase A dado em Wb
λ_{bs}	Fluxo magnético do estator fase B dado em Wb
λ_{cs}	Fluxo magnético do estator fase C dado em Wb
λ'_{dr}	Fluxo magnético do rotor no eixo d referido ao estator dado em Wb
λ_{ds}	Fluxo magnético do estator no eixo d dado em Wb
λ'_{qr}	Fluxo magnético do rotor no eixo q referido ao estator dado em Wb
λ_{qs}	Fluxo magnético do estator no eixo q dado em dado em Wb
λ'_{0r}	Fluxo magnético do rotor referido ao estator no eixo 0 dado em Wb
λ_{0s}	Fluxo magnético do estator no eixo 0 dado em Wb
λ_r^{abc}	Fluxo magnético total concatenado do estator dado em Wb
λ_s^{abc}	Fluxo magnético total concatenado do rotor dado em Wb
μ	Permeabilidade do material do entreferro
ρ	Resistividade do material da bobina

θ	Ângulo de deslocamento
ω	Velocidade do sistema de referência arbitrário
ω_r	Velocidade mecânica do rotor
ω_s	Velocidade angular do sinal da rede elétrica
Δl	Varição do comprimento do fio
Δl_b	Varição do comprimento da bobina
Δr	Varição da resistência na espira do estator
ΔR	Incremento de resistência do rotor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS GERAIS	18
1.1.1	Objetivos Específicos	18
2	CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDU- ÇÃO TRIFÁSICO	20
2.1	TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS	20
2.2	FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO	21
2.2.1	Partes Constituintes do Motor de Indução	24
2.2.1.1	<i>Fluxo de Potência e Circuito Equivalente do Motor de Indução</i>	26
3	TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDU- ÇÃO	31
3.1	PRINCIPAIS TÉCNICAS DE DETECÇÃO	31
3.1.1	Análise de Assinatura da Corrente do Motor	32
4	TIPOS DE FALHAS DO MOTOR DE INDUÇÃO	35
4.1	FALHAS COMUNS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	35
4.2	FALHAS ESTATÓRICAS	41
4.2.1	Estresses Elétricos	42
4.2.2	Estresses Mecânicos	43
4.2.3	Estresses Térmicos	43
4.2.4	Estresses Ambientais e Contaminação	44
4.3	FALHAS ROTÓRICAS	44
4.3.1	Estresses Térmicos	45
4.3.2	Estresses Magnéticos	45
4.3.3	Falhas Dinâmicas e Mecânicas	46
4.3.4	Falhas Ambientais	47
4.4	FALHA NOS ROLAMENTOS	48
5	MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR DE INDUÇÃO	51
5.1	MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	51
5.2	NOTAÇÃO MATRICIAL TRIFÁSICA DO MOTOR DE INDUÇÃO - MO- DELO ABC	53
5.3	NOTAÇÃO MATRICIAL TRIFÁSICA DO MOTOR DE INDUÇÃO - MO- DELO dq0	55
5.4	EQUAÇÕES DO SISTEMA MECÂNICO DO MOTOR DE INDUÇÃO . .	59

5.4.1	Momento de Inércia e Atrito Viscoso do Motor de Indução:	60
6	INFLUÊNCIA DAS FALHAS SOBRE OS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO	62
6.1	EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO SOBRE OS PARÂMETROS DO ESTATOR	62
6.1.1	Efeitos de Barras Quebradas sobre os Parâmetros do Rotor	63
6.1.2	Efeitos das Falhas no Rolamento sobre a Velocidade do Motor de Indução	65
7	SIMULAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SIMÉTRICO	66
7.1	PRÉ-SIMULAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO	66
7.1.1	Simulação Dinâmica do Motor de Indução Simétrico	69
8	DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTOR DE INDUÇÃO POR MEIO DE DIAGRAMAS FASORIAIS	79
8.1	SISTEMA PROPOSTO	79
8.1.1	Diagramas Fasoriais	79
8.1.2	Procedimentos de simulação e inserção de falhas no motor de indução .	80
8.2	DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO SEM FALHAS .	80
8.3	DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO MEDIANTE FALHAS ESTATÓRICAS	83
8.4	DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO MEDIANTE FALHAS ROTÓRICAS	87
8.5	DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO MEDIANTE FALHAS NOS ROLAMENTOS	91
9	RESULTADOS	98
9.1	CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO	98
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
11	TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
	APÊNDICE A – Resultados das Simulações do Motor de Indução Trifásico	106

1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos são empregados em muitos setores industriais, sendo este, a máquina elétrica principal neste setor, dotada de capacidade para realizar a conversão de energia elétrica em força motriz Goedel (2007). Além de serem utilizados em larga escala para as mais variadas aplicações industriais, os motores de indução trifásicos, também se destacam pela quantidade de energia elétrica consumida em sua alimentação no âmbito industrial Silva e Cardoso (2005). Conforme explicitado por (SUETAKE, 2012), estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no ano de 2005, apontam que 47% da energia elétrica produzida no Brasil é consumida pelas plantas industriais. Essa energia consumida pelo setor industrial é equivalente a 346 bilhões de MWh anuais, na qual, 50% deste valor são destinados a alimentação de motores elétricos.

Os principais atributos dos motores de indução, estão associados a sua construção provida de simplicidade, a sua robustez para realizar operações versáteis e seu baixo custo de aquisição e manutenção Suetake et al. (2010). Contudo, essas virtudes dos motores de indução podem ser comprometidas a medida que são submetidos a esforços e as fatores, tais como, tempo e modo de operação, condições ambientais e defeitos intrínsecos derivados de seu processo de fabricação Xie (2012 apud ALVES, 2017). Diante destas condições indesejáveis, uma variedade de falhas podem incidir sobre os motores de indução, acarretando falhas nos enrolamentos, rotor ou estator desbalanceados, barras quebradas do rotor, excentricidades, assim como falhas nos rolamentos Siddique, Yadava e Singh (2005). Conforme descrito em Karmakar et al. (2016), a maior possibilidade de falhas no motores de indução está situada nos rolamentos, seguido de falhas do estator e por fim falhas localizadas junto ao rotor. Essas falhas podem produzir avarias tanto para o sistema de alimentação do motor, bem como ao seu circuito estático e rotórico, independente do tipo de falha ocorrida. Tais falhas, podem acarretar em tensões e correntes de linha desbalanceadas, elevação do nível de vibração, diminuição do conjugado médio, elevação das perdas, aquecimento excessivo e conseqüentemente promover a redução de rendimento do motor (ALVES, 2017).

A detecção das falhas que incidem sobre os motores de indução, tem sido utilizada como objeto de estudo nos últimos anos, com o intuito de aprimorar a eficiência de detecção de avarias por meio algoritmos simples e sensores de baixo custo Baccarini (2005). Equipes de manutenção preditiva, atualmente, já contam com excelentes ferramentas para detecção e diagnósticos de falhas mecânicas em motores, com destaque para a análise de vibração, na qual dispõem de programas inteligentes, sistema on-line, alertas de falhas e etc. Entretanto, essas tecnologias não são capazes de prever quando o motor irá sair de operação devido a falhas elétricas, uma vez que estas ferramentas não apresentam capacidade para tal diagnóstico. Muitas equipes de manutenção diante dos desafios de detectar e diagnosticar falhas de origens elétricas ainda recorrem a cronogramas de manutenções preventivas e realizam testes tradicionais e de baixa eficiência, uma vez que a velocidade de propagação das falhas elétricas é elevada e a quantidade

de motores a serem diagnosticados pelas equipes de manutenção muita das vezes é extenso Assunção (2006). Diante deste contexto, existe a necessidade de monitoramento das condições de operação do motor, com intuito de reduzir danos, custos com paradas não programadas e aumentar a vida útil dos motores. A aplicação difundida da automação, assim como a redução de custos com o surgimento e desenvolvimento de interfaces homem-máquina e dos sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), permitem a disseminação destes sistemas de monitoramento de motores elétricos no âmbito industrial (PINHEIRO, 2011).

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Frente as severas condições de operação, falhas estatóricas, rotóricas e mecânicas podem incidir sobre o motor de indução trifásico, promovendo interrupções de seu funcionamento e consequentemente produzindo perdas pelas paradas indesejáveis de ambientes de produção, uma vez que a força motriz dos mais variados setores industriais é proveniente deste tipo de motor. Este trabalho tem por objetivo, monitorar grandezas de fácil aquisição como tensões e correntes estatóricas, bem como a velocidade na ponta do eixo do motor de indução trifásico em tempo real, diante de avarias. Tais grandezas, na presença de falhas incididas sobre o motor de indução, apresentam comportamentos nos quais é possível traçar um perfil das falhas ocorridas. A relevância deste trabalho é justificada uma vez que este possui completa aplicabilidade em situações práticas, promovendo redução de custos de manutenção em motores de indução trifásicos nos setores industriais.

1.1.1 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, foram traçados os objetivos específicos que irão compor este trabalho, tais como:

- Apresentar os tipos de falhas mais comuns em motores de indução, bem como suas classificações, e quais os aspectos elétricos, mecânicos e ambientais que as produzem;
- Modelar matematicamente o motor de indução trifásico por meio de equações diferenciais, difundidas e consolidadas nas literaturas existentes, com intuito de obter todo o comportamento dinâmico do motor simétrico (sem falhas) e com assimetrias (com falhas);
- Apresentar os efeitos das falhas estatóricas, rotóricas e de rolamentos sobre os parâmetros do motor de indução;
- Por meio dos ambientes computacionais disponibilizados pelos softwares MATLAB[®] e SIMULINK[®], promover simulações a partir da inserção de todo equacionamento que apresenta o comportamento dinâmico do motor, com intuito de visualizar, analisar e

apresentar graficamente todo este comportamento, diante situações operacionais descritas neste trabalho;

- Inserir falhas estatóricas, rotóricas e de rolamentos nas simulações computacionais do motor de indução trifásico em estudo, por meio da alteração de seus parâmetros nominais elétricos e mecânicos;
- Visualizar e plotar diagramas fasoriais referentes ao comportamento das grandezas analisadas (tensão estatórica, corrente estatórica, defasagem angular entre tensão e corrente e velocidade do motor), frente as falhas inseridas, produzindo um sistema de detecção de avarias por meio de diagramas e gráficos, traçando os perfis das falhas em torno de valores nominais das grandezas medidas do motor de indução.

2 CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

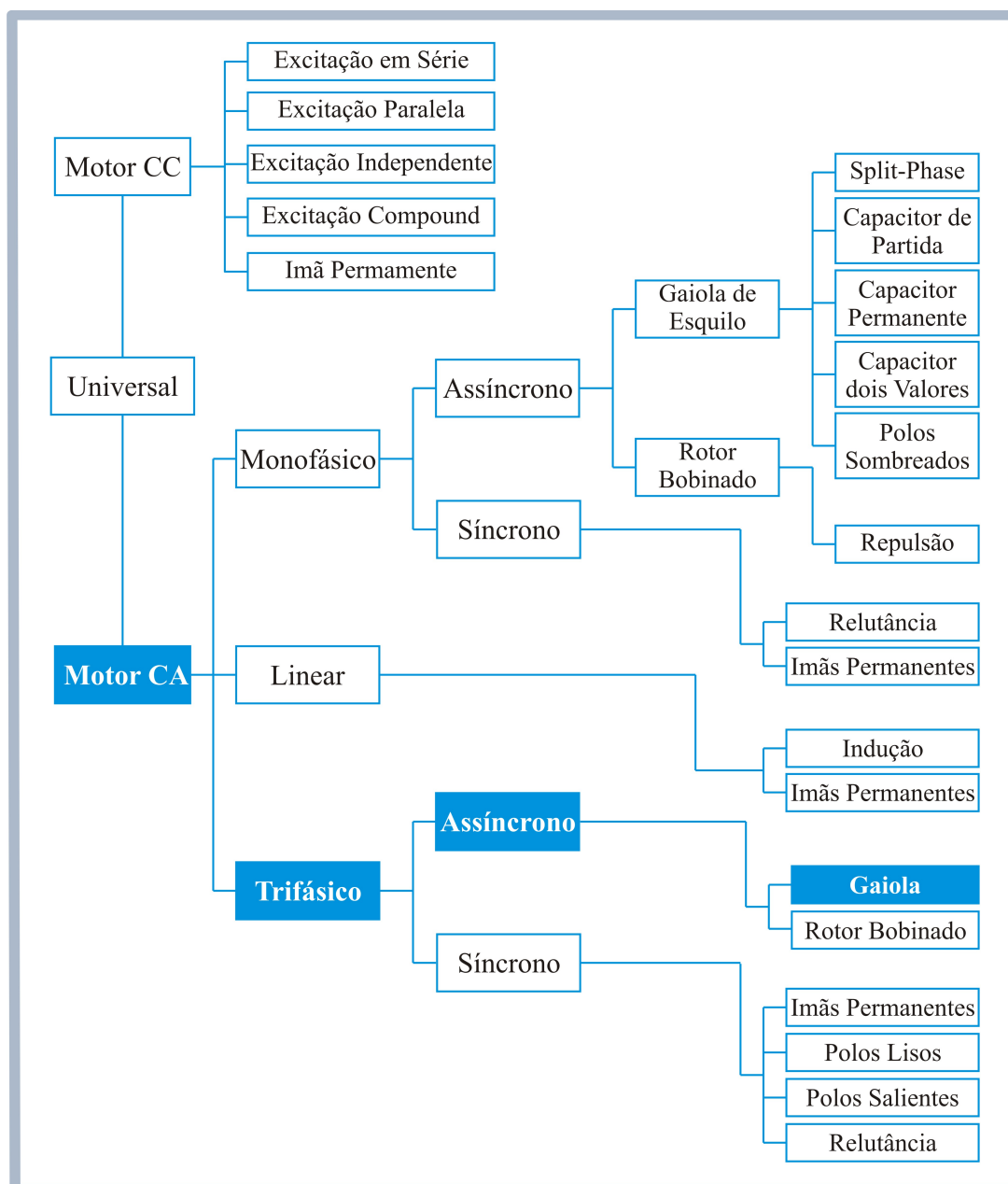
Neste capítulo, será apresentado o funcionamento do motor de indução, seu circuito equivalente, o fluxo de potência e suas perdas, bem como os parâmetros estatóricos e rotóricos que compõem a máquina elétrica de indução.

2.1 TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS

Conforme descrito por WEG (2016), o motor elétrico consiste em uma máquina dotada de capacidade para transformar energia elétrica em mecânica. Entre os motores elétricos mais utilizados, o motor de indução tem seu papel de destaque pois associada a sua construção simples, a máquina de indução possui também, baixo custo, facilidade de transporte e limpeza, comando simplificado, grande versatilidade quanto a adaptação dos mais variados tipos de cargas e detém rendimentos elevados quando comparado a outros tipos de motores elétricos. Os tipos de motores elétricos mais comuns são os de corrente contínua e de corrente alternada, na qual uma extensa gama de motores são produzidos para as mais variadas aplicações a partir destes dois tipos (WEG, 2016). A figura 1 ilustra em destaque o motor de corrente alternada, trifásico, assíncrono ou de indução do tipo gaiola de esquilo que será objeto de estudo neste trabalho. Além disso, figura 1 apresenta o quão é vasto o universo tecnológico dos motores elétricos. Os motores de corrente contínua e alternada, estão descritos de modo sucinto a seguir, na qual estão relatados algumas de suas características.

- **Motor de Corrente Contínua:** Apresentam custo elevado e necessitam de corrente contínua ou dispositivos que convertam corrente alternada em corrente contínua. Estes, podem operar com grande precisão e flexibilidade, podendo funcionar em uma ampla faixa de limites com velocidades ajustáveis.
- **Motor de Corrente Alternada:** São mais utilizados devido a distribuição de energia elétrica ser realizada normalmente em corrente alternada. Nesta categoria de motores elétricos, têm-se o motor assíncrono, na qual opera em velocidade fixa (sem escorregamento) e são utilizados geralmente para grandes potências. O motor de indução, também pertencente ao tipo de motor de corrente alternada, opera com velocidade constante, na qual varia ligeiramente de acordo com a carga mecânica acoplada ao seu eixo.

Figura 1 – Tipos de motores elétricos



Fonte: Adaptado de WEG (2016, p. 6)

2.2 FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

De acordo com Umans (2014), o funcionamento do motor de indução é explicado a partir da aplicação direta da corrente alternada junto aos enrolamentos do estator, enquanto o rotor recebe a corrente do estator por meio de indução. A excitação proveniente da conexão de uma fonte polifásica equilibrada aos terminais do estator do motor de indução, produz um campo magnético no entreferro da máquina, na qual gira na velocidade síncrona. As tensões inseridas junto as bobinas do estator por meio de uma fonte de alimentação externa, produzem um campo magnético girante, com amplitude constante e frequência equivalente a da rede de

alimentação. Este campo magnético produzido pelo estator, ao atingir os condutores do rotor, induzem corrente, criando uma força eletromotriz, na qual o rotor gera seu próprio campo magnético girante. Desde modo, o campo magnético desenvolvido pelo rotor tenta alinhar-se ao campo girante gerado pelo estator, produzindo torque e movimento rotacional do eixo do rotor. A velocidade de rotação do campo magnético do estator (velocidade síncrona) é superior a do campo produzido do rotor. Esta diferença de velocidades é denominada de movimento assíncrono entre campos magnéticos do estator e do rotor em um motor de indução Araújo (2015). O valor da velocidade síncrona está relacionada a quantidade de polos e a frequência aplicada ao estator do motor de indução. A equação 2.1 apresenta essa relação e expressa a velocidade síncrona em RPM (CHAPMAN, 2013).

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 \cdot f_{se}}{P} \quad (2.1)$$

A diferença de velocidades entre os campos magnéticos girantes do estator e do rotor acarretam no escorregamento do rotor. A tensão induzida nas barras do rotor do motor de indução depende da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. A denominada velocidade de escorregamento do rotor (velocidade relativa) é expressa em porcentagem conforme apresentado na equação 2.2 (CHAPMAN, 2013).

$$S = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

- n_{sinc} representa a velocidade dos campos magnéticos;
- n_m representa a velocidade mecânica do eixo do motor.

Em algumas situações, o motor de indução é denominado de transformador rotativo. Esta nomenclatura na qual lhe foi atribuída é proveniente da sua operação ser baseada em induzir tensões e correntes em seu rotor, assim como um transformador induz tensões e correntes do seu enrolamento primário para o enrolamento secundário. Entretanto, se opondo ao funcionamento do transformador, a frequência do rotor do motor de indução não é obrigatoriamente a mesma do estator. Algumas situações sobre a frequência de operação do rotor, bem como seu escorregamento serão explicitadas na sequência.

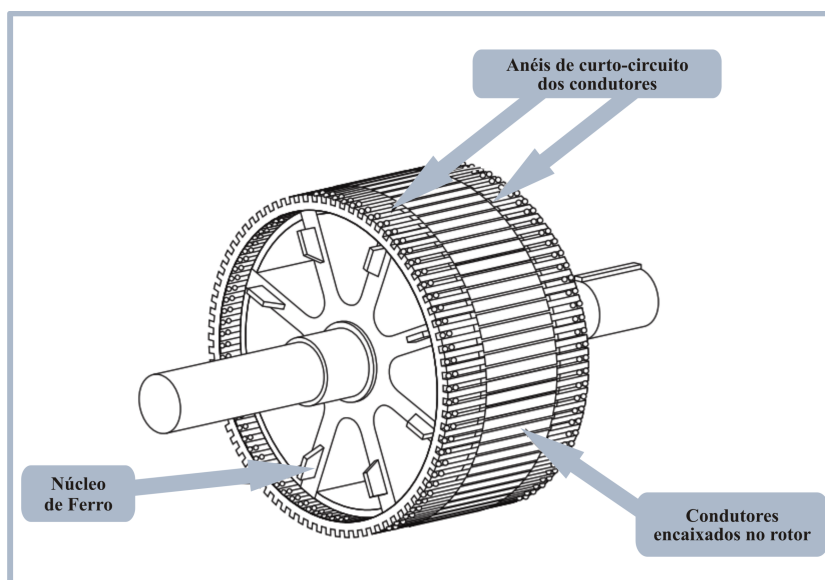
- Para rotor bloqueado ($n_m = 0$), tem-se $f_{re} = f_{se}$ e escorregamento $S = 1$;
- Para $n_m = n_{\text{sinc}}$, tem-se $f_{re} = 0$ Hz e escorregamento $S = 0$;
- Para qualquer velocidade intermediária entre $S = 0$ e $S = 1$ a frequência do rotor f_{re} se torna diretamente proporcional à diferença de velocidade entre os campos magnéticos do estator e do rotor.

Após esta análise, é possível obter a frequência do rotor de um motor de indução. A equação 2.3 extraída de Chapman (2013), apresenta a relação entre escorregamento e a frequência do estator para a obtenção da frequência do rotor.

$$f_{re} = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \cdot f_{se} \quad (2.3)$$

O rotor do motor de indução, é projetado e construído com a mesma quantidade de polos e um enrolamento polifásico semelhante ao estator. O rotor do motor de indução podem ser do tipo bobinado ou gaiola de esquilo (*squirrel-cage*). O rotor do tipo gaiola de esquilo, apresenta barras condutoras as quais são posicionadas nas ranhuras do ferro do rotor e curto-circuitadas por anéis condutores Umans (2014). A figura 2 apresenta um desenho esquemático de um rotor do tipo gaiola de esquilo de um motor de indução com suas partes integrantes.

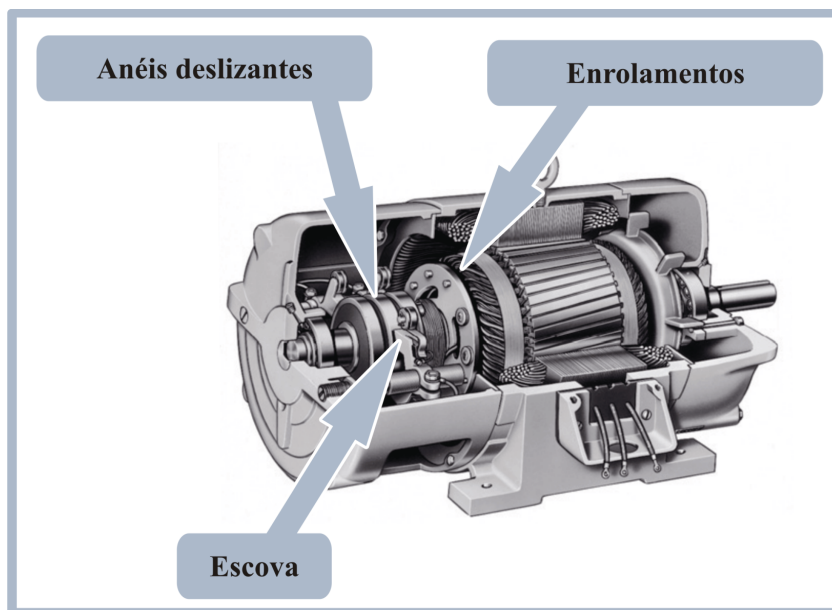
Figura 2 – Rotor do tipo gaiola de esquilo



Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 308)

O motor de indução que possui rotor bobinado conforme exposto em Umans (2014), tem seus terminais do enrolamento do rotor conectados por meio de anéis deslizantes posicionados sobre o eixo e através de escovas de carvão localizadas sobre os anéis, permite o acesso a estes terminais externamente ao motor conforme apresentado na figura 3. Os motores com rotor bobinado, podem ter suas características alteradas, como por exemplo, a inserção de resistências extras inseridas junto ao circuito rotor, alteram a relação conjugado *versus* velocidade (CHAPMAN, 2013).

Figura 3 – Motor de indução de rotor bobinado

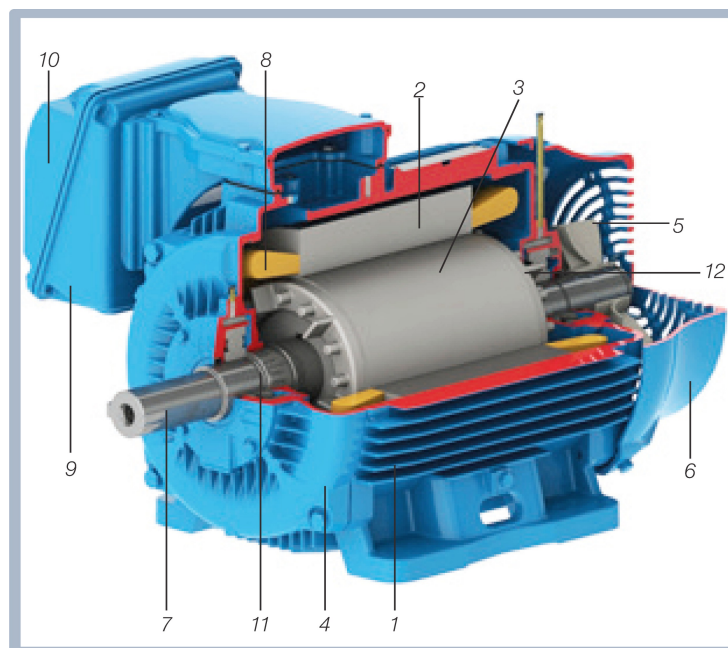


Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 311)

2.2.1 Partes Constituintes do Motor de Indução

O motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, é constituído segundo WEG (2016), por duas partes fundamentais, o estator e o rotor. Além destas, outras partes que integram o motor de indução trifásico estão ilustradas na figura 4 e serão descritas a seguir:

Figura 4 – Partes integrantes do motor de indução trifásico



Fonte: Adaptado de WEG (2016, p. 13)

Partes integrantes do estator:

- (1) Carcaça produzida em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, na qual constitui a estrutura de suporte para as demais partes do motor. A carcaça possui aletas em toda sua extensão para dissipação de calor e são resistentes a corrosão;
- (2) Núcleo de chapas produzidas em aço magnético;
- (8) Os enrolamentos trifásicos são constituídos por três conjuntos simétricos de bobinas, dispostos sobre o núcleo, formando um sistema trifásico equilibrado, na qual é conectado a rede de alimentação trifásica.

Partes integrantes do rotor:

- (7) O eixo é responsável por toda transmissão da potência mecânica gerada pelo motor de indução;
- (3) As chapas são produzidas em aço magnético, similar as chapas do estator;
- (12) Barras e seus anéis de curto-circuito, produzidas em alumínio injetado sobre pressão formam o rotor do motor de indução.

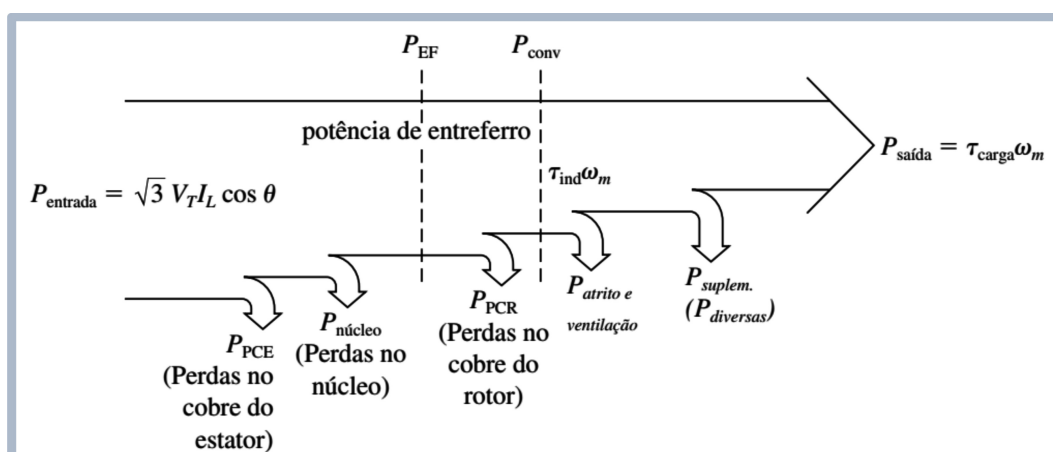
Demais partes integrantes do motor de indução:

- (4) Tampa;
- (3) As chapas são produzidas em aço magnético, similar as chapas do estator;
- (5) Sistema de ventilação (ventilador);
- (6) Tampa defletora;
- (9) Caixa de ligações do motor;
- (6) Terminais de ligação, são conectores metálicos que interligam a rede de alimentação externa ao motor;
- (11) Rolamentos.

2.2.1.1 Fluxo de Potência e Circuito Equivalente do Motor de Indução

O funcionamento do motor de indução é efetuado a partir da indução de tensões e correntes do circuito do estator para o rotor, realizando ação semelhante ao de um transformador Chapman (2013). Segundo Shindo (2003), o motor em regime estacionário possui as características de um transformador curto-circuitado, com enlace de fluxo baixo entre os enrolamentos o estator e as barras do rotor. Neste contexto, existe potência sendo transferida do estator para o rotor, na qual a perdas são dissipadas na barras do rotor e do ferro. A interação entre os campos magnéticos girantes do estator e do rotor, resultam em um torque, na qual deve ser suficiente para girar a carga na ponta do eixo e conseqüentemente produzir rotação. A potência transferida do estator, passando pelo entreferro do motor de indução é dissipada em perdas por efeito joule no rotor e na potência de saída durante o processo de conversão de energia elétrica em mecânica. Para elucidar claramente as perdas durante no processo de conversão de energia elétrica em mecânica por um motor de indução trifásico, a figura 5, apresenta o diagrama de fluxo de potência do motor, contendo todas as perdas elétricas e mecânicas.

Figura 5 – Diagrama do fluxo de potência do MIT



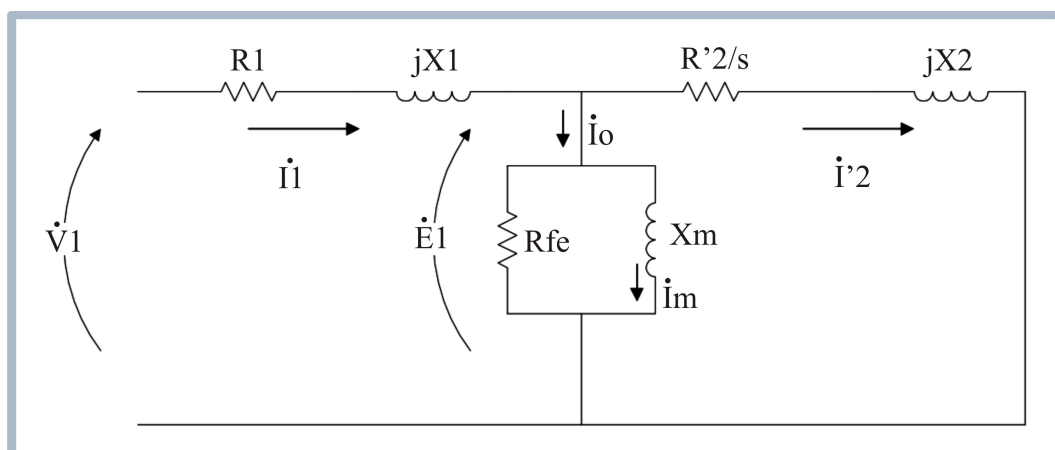
Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 322)

Conforme descrito em Chapman (2013) e ilustrado na figura 5, a potência de entrada no motor de indução se dá por meio de tensões e correntes trifásicas e logo em seguida já ocorre as perdas I^2R no cobre do estator (P_{PCE}). Na sequência, seguindo o diagrama de fluxo do motor de indução, é possível notar que parte da potência é perdida devido as correntes parasitas e histerese no estator ($P_{\text{NÚCLEO}}$). A potência restante até a este ponto é transmitida ao rotor do motor por meio do entreferro (P_{EF}). Ao chegar no rotor, a potência transmitida através do entreferro é reduzida devido as perdas I^2R localizadas no cobre do circuito do rotor (P_{PCR}). O restante da potência após passar pelo circuito do rotor é convertida em trabalho mecânico (P_{CONV}), contudo, sofrerá atenuações em seu valor, devido as perdas por atrito e ventilação (P_{AeV}) e suplementares

($P_{Suplementares}$)¹ até chegar finalmente a ponta do eixo do motor de indução como potência de saída, ou seja, a potência que realmente realiza trabalho motriz. Vale ressaltar que as perdas localizadas no núcleo nem sempre aparecem no diagrama de fluxo de potência e perdas do motor de indução, uma vez que a natureza destas perdas, assim como a sua localização de ocorrência são de complexa identificação. Entretanto, cabe mencionar que as perdas no núcleo são provenientes do circuito do estator em maior magnitude, bem como do circuito do rotor em menor magnitude. Ainda no contexto de análise das perdas do circuito no motor indução, a velocidade na qual o motor opera, tem influências diretas sobre os valores das perdas. Quanto maior for a velocidade maior será as perdas por atrito, ventilação e suplementares, ao passo que as perdas no núcleo serão menores.

O circuito equivalente monofásico de um motor de indução trifásico, pode ser observado através da figura 6, na qual é possível observar a presença de parâmetros estatóricos e rotóricos, bem como aqueles situados entre o estator e rotor (núcleo). O estudo de cada parâmetro presente no circuito do motor de indução trifásico, se justifica pelo fato de ocorrer inúmeros fenômenos associados a estes parâmetros durante o seu funcionamento (SHINDO, 2003).

Figura 6 – Circuito equivalente monofásico de um MIT trifásico



Fonte: Adaptado de Shindo (2003)

Os parâmetros presentes no circuito equivalente do motor de indução, assim como suas definições serão descritas a seguir:

Parâmetros Estatóricos:

- $R1$: Representa a resistência do enrolamento do estator por fase;
- $jX1$: Representa a reatância de dispersão por fase do estator. Retrata a parcela dos fluxos que enlaçam parcialmente ou até mesmo em sua totalidade os enrolamentos estatóricos.

¹Perdas suplementares representam cerca de 1% das perdas totais e não são classificadas. Podem ser originadas devido as perdas no ferro, pelas harmônicas do fluxo, perdas por efeito pelicular nos enrolamentos do estatóricos e nas barras do rotor e até mesmo por perdas no ferro nos elementos estruturais do motor de indução.

Entretanto, não acarretam em contribuição para formação de fluxo útil no motor de indução, em outras palavras, se caracteriza como fluxo mútuo entre estator e rotor.

Parâmetros Rotóricos:

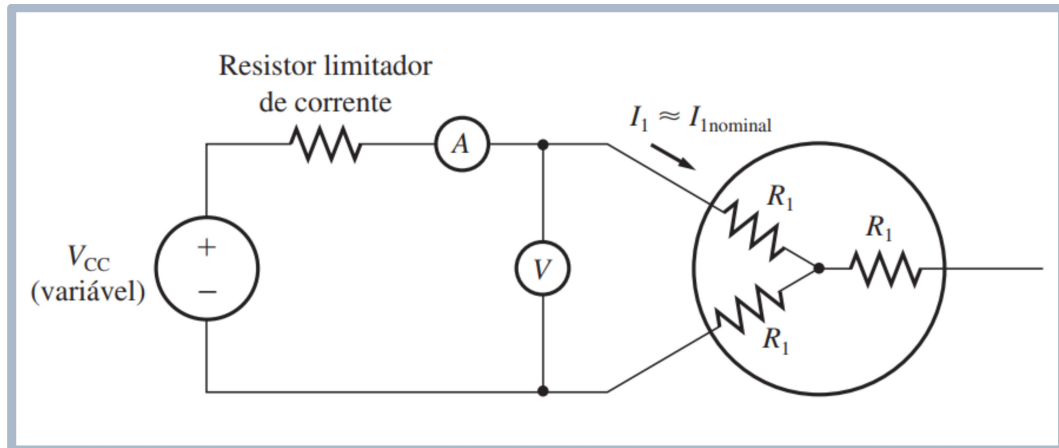
- $R'2/s$: Representa a resistência do rotor refletida ao estator por fase;
- $jX2$: Denominada de reatância de dispersão do rotor por fase, representam a parcela dos fluxos que enlaçam parcialmente e até mesmo totalmente as barras do rotor. Assim como no estator, estes fluxos não contribuem para o fluxo útil do motor.

Parâmetros do Núcleo:

- Xm : Constitui a reatância de magnetização do motor de indução por fase, na qual é responsável pela produção de fluxo útil na máquina. Fluxo útil no motor de indução é compreendido por aquele fluxo mútuo entre o estator e rotor, promovendo a indução nas barras do rotor;
- Rfe : Representa as perdas magnéticas no núcleo do motor por fase, devido as correntes parasitas e fenômenos por histerese.

Os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico (resistências e reatâncias) são determinados através de ensaio de tensão CC, ensaio de rotor bloqueado ou travado e de ensaio a vazio, seguindo metodologias e procedimentos técnicos especificados para cada ensaio Gill (2009 apud REIS, 2010). A resistência do estator é determinada a partir da aplicação de uma fonte de tensão contínua CC, conectada a dois terminais do estator do motor de indução conforme mostrado na figura 7. Após a aplicação desta tensão, a corrente nos enrolamentos é ajustada para o seu valor nominal e logo na sequência a tensão entre os terminais é medida. Neste ensaio, a corrente contínua é utilizada para evitar os efeitos de indução no circuito do rotor, uma vez que com o emprego da corrente contínua o fluxo resultante de corrente no rotor será nulo e a única grandeza a ser medida será a resistência estatórica (CHAPMAN, 2013).

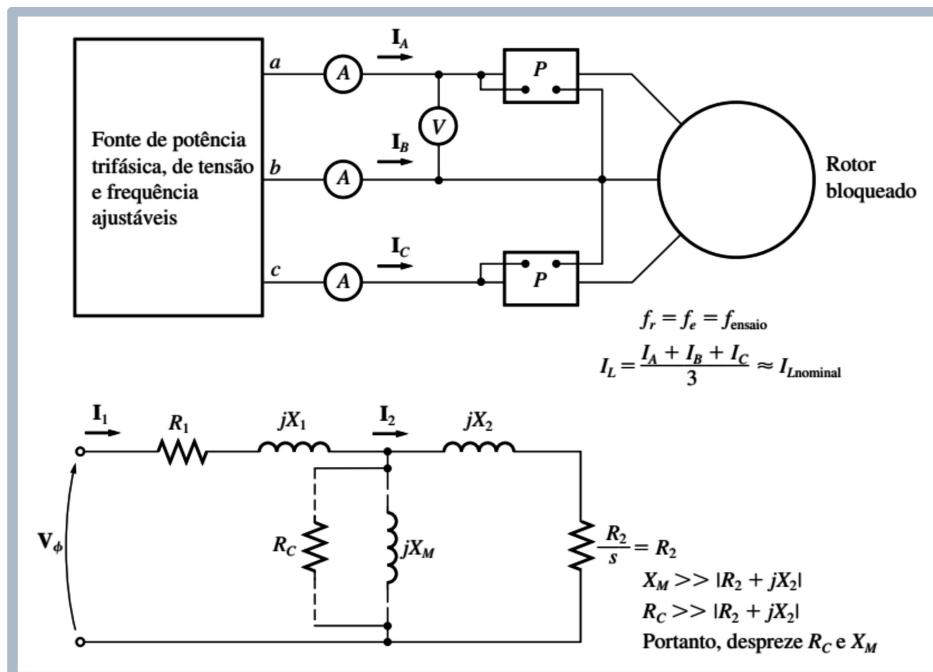
Figura 7 – Circuito utilizado para ensaio CC no MIT



Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 382)

O ensaio de rotor bloqueado ou travado, propicia a obtenção dos parâmetros das reatâncias do estator e do rotor e da resistência do rotor do motor de indução. Neste tipo de ensaio, o rotor é mantido travado, de forma que o mesmo não se mova durante o teste. Posteriormente é aplicado junto aos terminais do estator um conjunto de tensões trifásicas e em seguida o fluxo de corrente ajustado para ser o valor aproximadamente de plena carga (figura 8). Desde modo as medições de corrente, tensão e potência são realizadas e os parâmetros podem ser calculados (CHAPMAN, 2013).

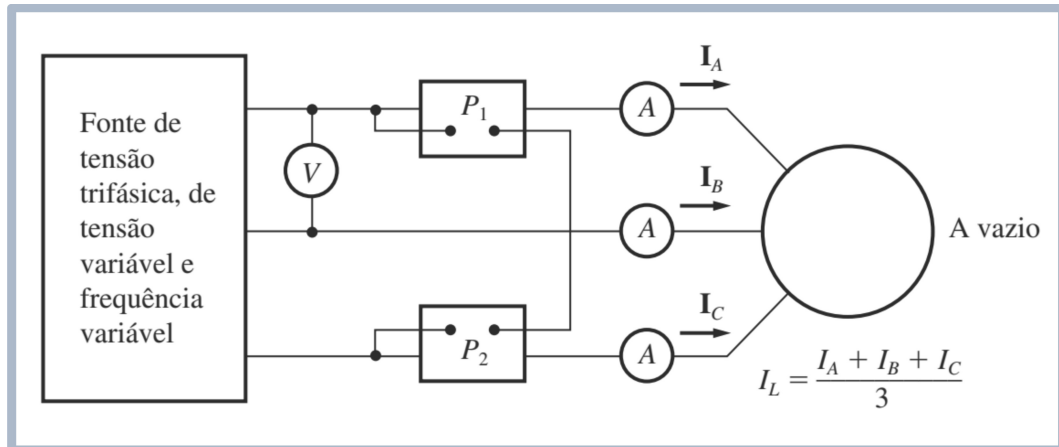
Figura 8 – Circuito utilizado para ensaio de rotor bloqueado no MIT



Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 384)

Por fim e não menos importante, o ensaio a vazio de um motor de indução mede as perdas rotacionais e obtém o valor da reatância de magnetização. Conforme ilustrado na figura 9, wattímetros, um voltímetro e três amperímetros, são conectados em um motor de indução, na qual é deixado girando livremente. Deste modo, a potência de entrada é medida pelos instrumentos e deve ser igual as perdas do motor (CHAPMAN, 2013).

Figura 9 – Circuito utilizado para ensaio a vazio no MIT



Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 381)

Desde modo, após descrever todo funcionamento do motor de indução trifásico, partes integrantes, fluxo de potência e parâmetros de seu circuito equivalente, o comportamento da máquina de indução se torna mais compreensível, diante das simulações e condições de operação as quais serão empregadas neste trabalho.

3 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas algumas técnicas relevantes para detecção de falhas que incidem sobre motores de indução.

3.1 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE DETECÇÃO

Conforme descrito em Pinheiro (2011), muitos procedimentos foram desenvolvidos atualmente com o intuito de detectar as inúmeras falhas que podem se manifestar nos motores de indução. As técnicas que mais se destacam são as seguintes:

- Monitoramento por vibração;
- Monitoramento por emissão acústica;
- Monitoramento do campo magnético;
- Monitoramento por pulso de choque;
- Monitoramento de flutuação de velocidade;
- Monitoramento da assinatura elétrica;
- Monitoramento da emissão de rádio frequência;
- Análise química.

As técnicas de detecção de falhas são divididas em duas categorias, tais como, técnicas não invasivas e invasivas. As técnicas não invasivas são realizadas de modo que as medições das grandezas do motor de indução sejam coletadas sem que necessite interromper seu funcionamento ou realizar sua desmontagem. Esta técnica se sobressai em relação a técnica invasiva devido a sua facilidade de aplicação, bem como seu custo de implementação. Por sua vez a técnicas invasivas, necessitam interromper a operação do motor e realizar sua desmontagem para se obter dados Reis (2010). Segundo Reis (2010), a presença de falhas estatóricas, rotóricas ou até mesmo falhas mecânicas nos motores de indução, produzem alterações na interação dos fluxos magnéticos entre o estator e rotor e conseqüentemente acarretam em alterações nas tensões e correntes do estator, assim como no campo magnético e na vibração do motor. A técnica de detecção que mais se destaca é a de monitoramento da assinatura elétrica, na qual é composta por um conjunto de técnicas que realizam o monitoramento das máquinas elétricas por meio da coleta e análise de sinais elétricos inerentes ao seu funcionamento. Os principais conjuntos de técnicas de Análise da Assinatura Elétrica (ESA) são:

- *Current Signature Analysis (CSA)*;

- *Voltage Signature Analysis (VSA)*;
- *Extended Park's Vector Approach (EPVA)*;
- *Instantaneous Power Signature Analysis (IPSA)*;
- *Current Signature Analysis (MCSA)*.

As técnicas MCSA e EPVA, assim como o cálculo da impedância de sequência negativa, possuem vantagens sobre as demais conforme apresentando em Assunção (2006). Essas técnicas se baseiam no processamento de sinais de corrente e/ou tensão, nos quais podem ser extraídos de painéis de alimentação e até mesmo do centro de controle de motores (CCM), de modo prático e fácil, sem que haja a necessidade de estar em contato com o motor em análise para aplicação das técnicas de detecção de falhas. Na seção a seguir serão apresentadas as particularidades da técnica MCSA (Análise de Assinatura da Corrente no rotor), uma das mais difundidas e estudadas neste contexto, na qual consiste no monitoramento da corrente elétrica do motor (REIS, 2010).

3.1.1 **Análise de Assinatura da Corrente do Motor**

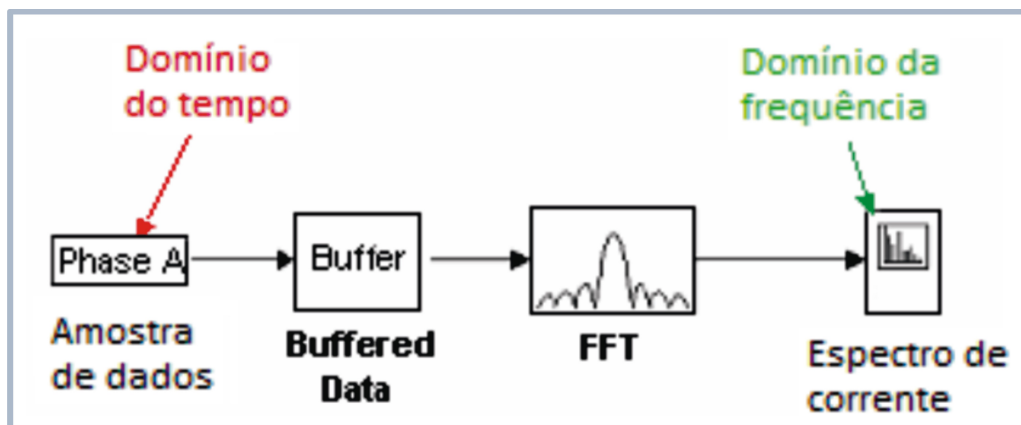
Esta técnica tem sua origem na observação do comportamento da corrente elétrica diante de defeitos elétricos e mecânicos em motores elétricos Assunção (2006). Desenvolvida pelo Oak Ridge National Laboratory (ORNL) e desde o ano de 1989, é submetida a diversos aprimoramentos. Com avanço da tecnologia possui características relevantes quanto à detecção de falha em motores. (REIS, 2010). Tais virtudes desta técnica são:

- Eficácia de monitoramento mesmo distante do equipamento em análise;
- Fornece dados de diagnósticos e degradações comparáveis à equipamentos específicos;
- Possui alta sensibilidade quanto a extensa variedade de condições operacionais, nas quais o motores elétricos estão submetidos;
- Possui aplicação e execução rápida, além de ser executada por qualquer usuário;
- Compatibilidade elevada, ou seja, se aplica em motores de baixa e alta potência, motores assíncronos (indução), síncronos e motores de corrente contínua.

O funcionamento da técnica não invasiva MCSA, conforme explicitado em (PINHEIRO, 2011), é dotada da capacidade de monitoração em tempo real do motor em estudo. Esta consiste na utilização dos resultados de análise espectral do sinal de corrente elétrica extraída junto a uma das fases do estator do motor. A presença de falha acarreta em alterações no espectro da corrente de linha do estator, tornando-o diferente em relação ao padrão do espectro da corrente do motor em condições saudáveis. A aplicação desta técnica utilizando o espectro de corrente do

estator do motor, se justifica devido a presença de frequências de harmônicas girantes sobre as indutâncias próprias, bem como as indutâncias mútuas do motor elétrico. A figura 10, ilustra o procedimento de obtenção do sinal de corrente elétrica de uma das fases do estator no domínio do tempo e posteriormente a transformação deste sinal para o domínio da frequência.

Figura 10 – Determinação do espectro da corrente no domínio da frequência



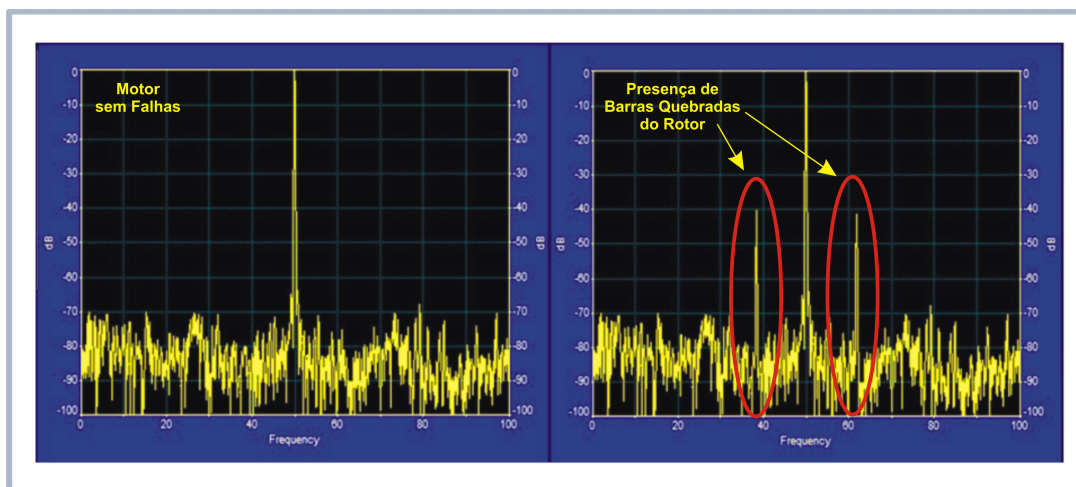
Fonte: Adaptado de Pereira, Gazzana e Pereira (2005 apud PINHEIRO, 2011)

As assimetrias do motor de indução que a técnica MCSA podem detectar de acordo com (PINHEIRO, 2011) são as seguintes:

- Barras quebradas do rotor e rotor desbalanceado;
- Curto-circuito entre as bobinas do estator;
- Avarias nos rolamentos;
- Excentricidade do entreferro.

Conforme dito anteriormente, na ocorrência de uma falha, o espectro da corrente do motor elétrico apresentará um formato diferente do espectro de um motor operando em condições saudáveis. Entretanto, as particularidades espectrais de cada falha analisada são únicas Reis (2010). Por meio da figura 11, é possível observar que na ocorrência de barras quebradas do rotor do motor de indução existirão duas componentes de frequência igualmente espaçadas em torno da frequência fundamental, na qual apresentarão um aumento de suas magnitudes (PINHEIRO, 2011).

Figura 11 – Espectro da corrente de um motor sem falhas e com barras quebradas do rotor



Fonte: Adaptado de Reis (2010)

Desde modo, através da sucinta apresentação de técnicas de monitoração e detecção de falhas de motores elétricos, pode-se destacar conforme descrição realizada anteriormente, que a técnica MCSA pode ser aplicável na detecção diversas falhas, com inúmeras vantagens sobre as demais, sendo esta umas das técnicas mais difundidas e aprimorada ao longo dos anos.

4 TIPOS DE FALHAS DO MOTOR DE INDUÇÃO

Neste capítulo serão descritos os tipos de falhas mais comuns em máquinas elétricas, bem como a classificação e quais os aspectos elétricos, mecânicos e de ambiente que acarretam em diversas avarias, as quais comprometem expressivamente a eficiência dos motores elétricos.

4.1 FALHAS COMUNS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

De acordo com Thorsen e Dalva (1999), uma falha em um componente presente na máquina elétrica representa uma condição de capacidade reduzida, associada aos requisitos mínimos preestabelecidos. Esta condição é decorrente do uso e desgaste normal, especificações e uso irregulares, erros de projeto e instalações ou uma combinação destes.

As falhas mais corriqueiras em motores elétricos são: falha estatórica e rotórica, falha no enrolamento e de excentricidade. As falhas de excentricidade em um motor elétrico pode ter sua origem associadas ao mau posicionamento do mancal durante a montagem do motor, desgaste do rolamento e inclinação do eixo do rotor Ong, Dymond e Findlay (2000 apud SANTOS et al., 2012).

Conforme Vas (1993 apud SANTOS et al., 2012), a excentricidade em um motor consiste na folga desigual existente entre o estator e o rotor na qual pode ser classificada em estática, dinâmica ou mista. A excentricidade estática representa o deslocamento do centro de rotação do eixo a uma distância fixa em relação ao centro original. Já na excentricidade dinâmica, o centro de rotação mantém-se na posição original, contudo, o eixo é deslocado. Na excentricidade mista, o centro e o eixo de rotação são deslocados de suas posições originais. Neste contexto, a falha mais comum nos motores de indução trifásicos correspondem à excentricidade de folga. Devido algumas imperfeições durante o processo de fabricação e de desempenho, a excentricidade permitida corresponde a 10 % (AWADALLAH; MORCOS, 2003 apud SANTOS et al., 2012).

As falhas presentes nos motores elétricos são de características mecânicas. Contudo, a decorrência destas, alteram o comportamento das grandezas elétricas inerentes ao motor Reis (2010). Conforme explicitado em Nandi, Toliyat e Li (2005) e apresentado na tabela 1, as principais falhas ocorridas em motores elétricos em geral podem ser classificadas como:

Tabela 1 – Classificação de falhas comuns em motores de indução

1	Avárias no estator, acarretam na abertura ou curto-circuito de seus enrolamentos que compõem as fases do motor elétrico.
2	Conexões anormais dos enrolamentos do estator.
3	Barras do rotor quebradas ou anéis terminais com rachaduras.
4	Folgas irregulares estáticas e/ou dinâmicas no entreferro.
5	Eixo empenado (desalinhado), podendo resultar em um atrito entre rotor e o estator.
6	Bobina do rotor em curto-circuito.
7	Mancais e engrenagens com falhas.

Fonte: Adaptado de Nandi, Toliyat e Li (2005)

Ainda de acordo com Nandi, Toliyat e Li (2005), os tipos de avarias em motores elétricos situadas no estator ou no rotor possuem sua independência em relação a classificação das falhas comuns. De modo geral, as falhas ocorridas em motores elétricos produzem um ou mais sintomas, alterando os valores de alguns parâmetros característicos dos motores elétricos. Alguns dos parâmetros alterados estão listados abaixo, tais como:

- Tensões desbalanceadas;
- Correntes desbalanceadas;
- Atenuação do torque médio;
- Aumento da vibração;
- Aquecimento excessivo;
- Redução da eficiência.

Com o intuito de detectar sinais relacionados as falhas em máquinas elétricas, muitos métodos de diagnóstico têm sido desenvolvidos. Estes métodos podem detectar avarias, podem incluir diversos campos da ciência e da tecnologia.

Segundo Karmakar et al. (2016), os motores de indução são resistentes, possuem baixo custo, baixa manutenção, dimensões razoavelmente pequenas, alta eficiência e operam por meio de uma fonte de alimentação facilmente disponível. Além disto, os motores de indução são confiáveis em diversas operações, entretanto, estão sujeitos a diversos tipos de defeitos indesejáveis.

Através de estudos da construção e operação de um motor de indução, é possível obter quais são as partes mais vulneráveis à falhas. A tabela 2, apresenta estudos estatísticos realizados através do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), nos quais especificam as avarias mais comuns e quais suas ocorrências em diversos tipos motores em aplicações industriais.

Tabela 2 – Estatísticas sobre falhas de motores elétricos

Falhas	Número de Falhas				
	Motor de Indução	Motor Síncrono	Motor com Rotor Bobinado	Motor de Corrente Contínua	Total de Motores
Rolamento	152	2	10	2	166
Enrolamento	75	16	6	–	97
Rotor	8	1	4	–	13
Eixo	19	–	–	–	19
Escovas ou Anéis deslizantes	–	6	8	2	16
Dispositivo externo	10	7	1	–	18
Outros	40	9	–	2	51

Fonte: Adaptado de Karmakar et al. (2016, p. 12)

A tabela 2 certifica que o motor de indução acumula a maior quantidade de falhas no rolamento, estator, rotor, eixo e dispositivo externo em relação aos motores síncronos, rotor bobinado e corrente contínua analisados estudos estatísticos. De acordo com Karmakar et al. (2016), um estudo conduzido pela General Electric Company e com apoio do EPRI (Electric Power Research Institute), com base no relatório do fabricante do motor, foram apresentadas as principais falhas do motor de indução. A porcentagem das falhas estáticas, rotóricas, de rolamento e outras estão explicitadas na tabela 3.

Tabela 3 – Possibilidade de ocorrência de falha no motor de indução

Fonte de Estudo	Falhas no Rolamento (%)	Falhas no Estator (%)	Falhas no Rotor (%)	Outras (%)
IEEE	42	28	8	22
EPRI	41	36	9	14

Fonte: Adaptado de Karmakar et al. (2016, p. 13)

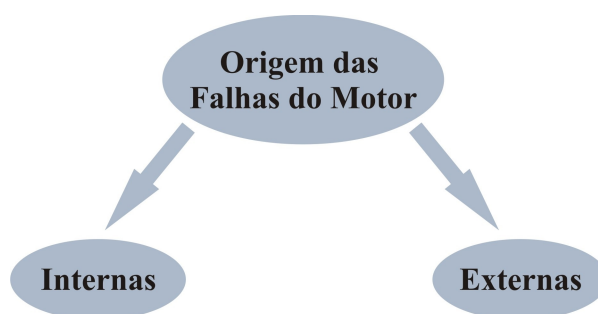
Na tabela 3, os rolamentos apresenta a maior porcentagem de possibilidade de ocorrências de falhas, seguido do estator e do rotor respectivamente. Reis (2010), averiguou que estas falhas ocorridas nos rolamentos, estator e rotor, podem ser ocasionadas por fatores externos, tais como, erros de produção, montagem ou funcionamento incorreto. Entretanto, as avarias podem

decorrer por meio de vários fatores internos e externos. Falhas localizadas no interior do motor elétrico, por exemplo, podem ser justificadas por fatores externos, como excesso de sujeira, na qual, acarreta em um sobreaquecimento. Sharma et al. (2015) afirma que o motor de indução está sujeito a apresentar grandes avarias e falhas secundárias relacionadas. Conforme ilustrado nas figuras 12, 13 e 14, os vários tipos de falhas são categorizados em diferentes classificações, nas quais as origens das falhas de um motor de indução podem ser internas ou externas. Com base nas origens das falhas, pode-se classificá-las em mecânicas ou elétricas.

As figuras 15, 16 e 17 ilustram alguns exemplos de falhas as quais os motor elétricos estão sujeitos. A figura 15 apresenta motores que tiveram suas espiras e bobinas curto-circuitadas e que as origens destas falhas podem ser explicadas devido a contaminação por umidade, pó, vapor, gás e/ou agente químico, arco elétrico, isolamento destruída por atrito, vibração e falha própria do sistema de isolamento do enrolamento. A figura 16 mostra motores que sofreram sobretensão e falta de fase. As avarias sofridas podem ter suas origens devido às anomalias de rede elétrica, descargas atmosféricas, conversor de frequência configurado incorretamente e falha de conexão elétrica na instalação para falta de fase. Na figura 17 é exibido um motor que sofreu sobreaquecimento devido à sobrecargas, ventilação inadequada, temperatura ambiente superior a especificada e partidas consecutivas superior ao tempo especificado. Além disso, apresenta um motor que sofreu avarias por sobrecarga devido a rotor bloqueado, conjugado da carga superior ao especificado, momento de inércia da carga superior ao especificado e longo tempo de operação na região de enfraquecimento de campo Siemens (2016). Por último, a figura 18 ilustra avarias em rolamentos provenientes do excesso da tensão de isolamento da película do lubrificante presente no rolamento na qual produz um arco elétrico acarretando na degradação do lubrificante, que por sua vez, contribui para formação de crateras ou estrias ao longo da superfície deslizante das pistas do rolamento. Ainda na figura 18 é mostrado uma marca característica de passagem de corrente pelo rolamento do motor elétrico (CARDOSO, 1991 apud ARAÚJO, 2015).

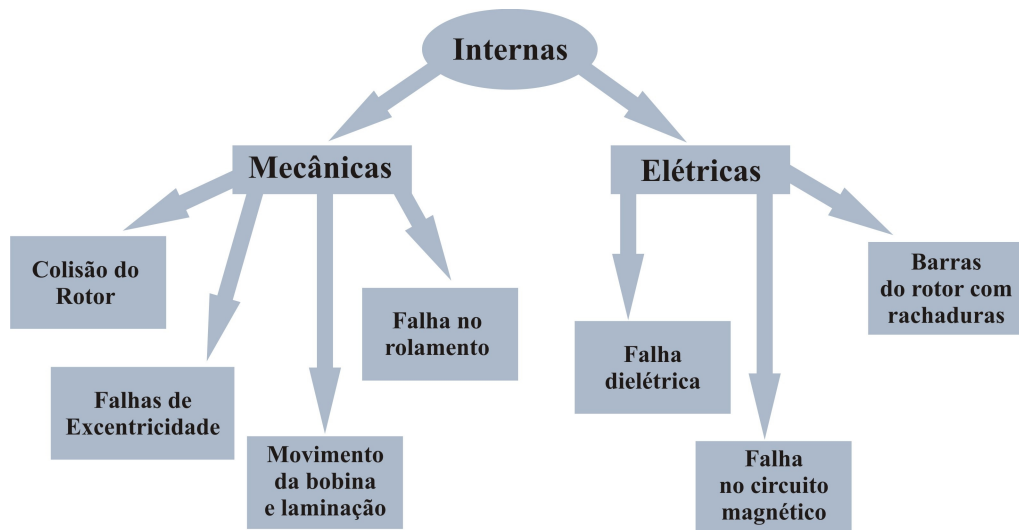
A seguir, serão explanadas as falhas estatóricas, rotóricas e de rolamento mais comuns no motores elétricos e suas particularidades.

Figura 12 – Origens das falhas do motor elétrico



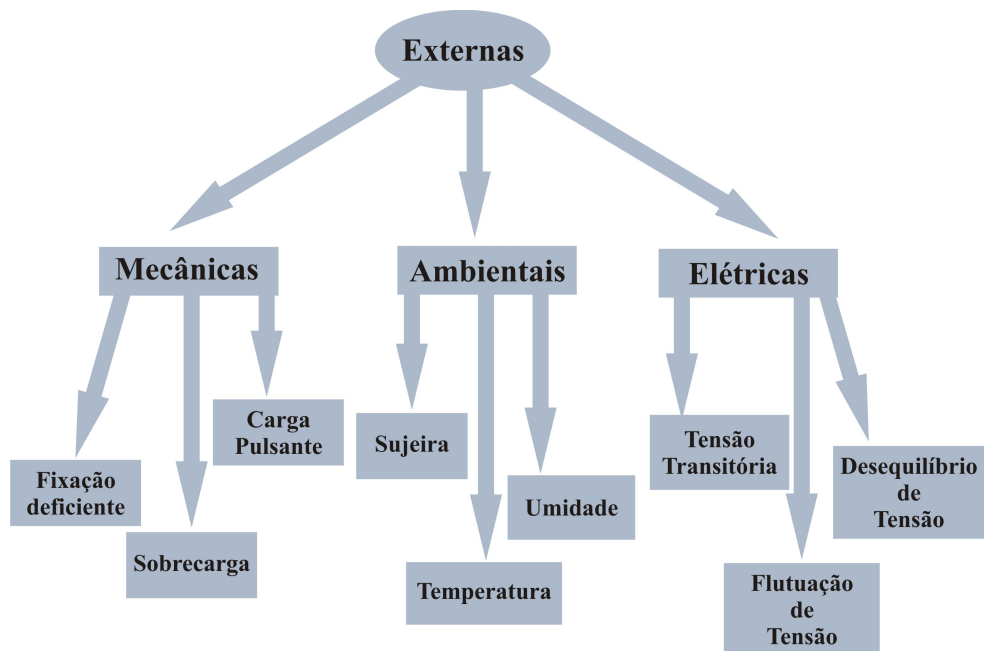
Fonte: Adaptado de Sharma et al. (2015)

Figura 13 – Origens das falhas do motor elétrico



Fonte: Adaptado de Sharma et al. (2015)

Figura 14 – Origens das falhas do motor elétrico



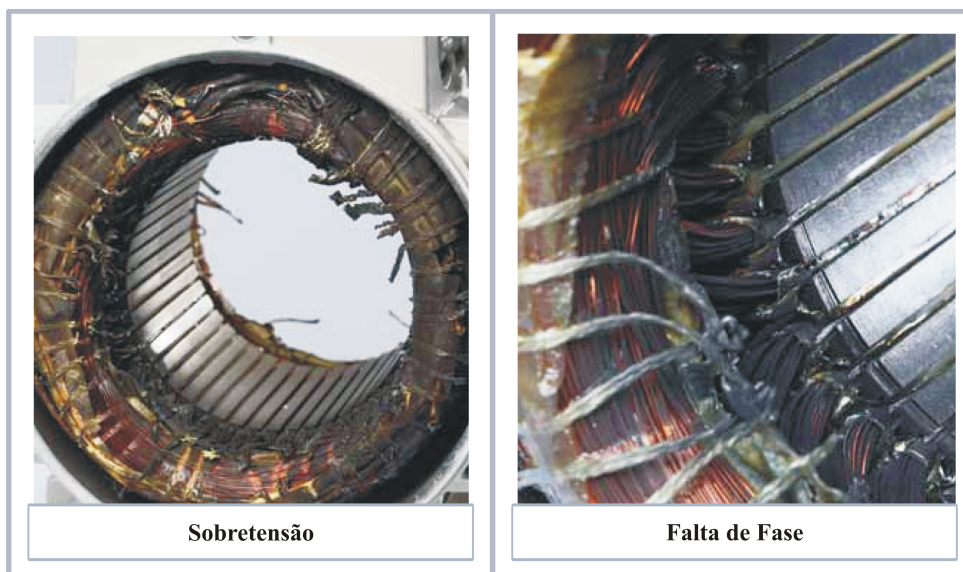
Fonte: Adaptado de Sharma et al. (2015)

Figura 15 – Motores com avarias originadas por curto-circuitos



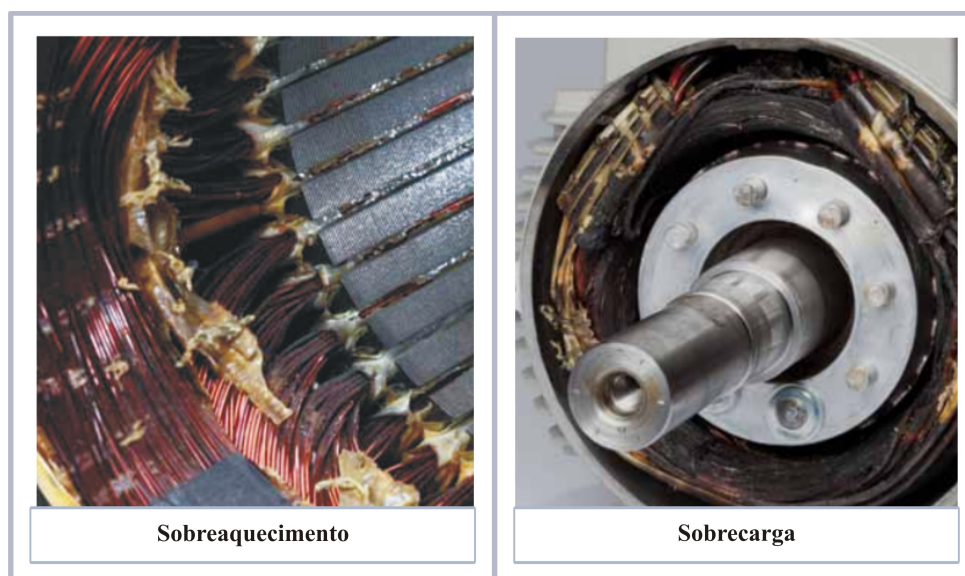
Fonte: Adaptado de Siemens (2016)

Figura 16 – Motores com avarias originadas por sobretensão e falta de fase



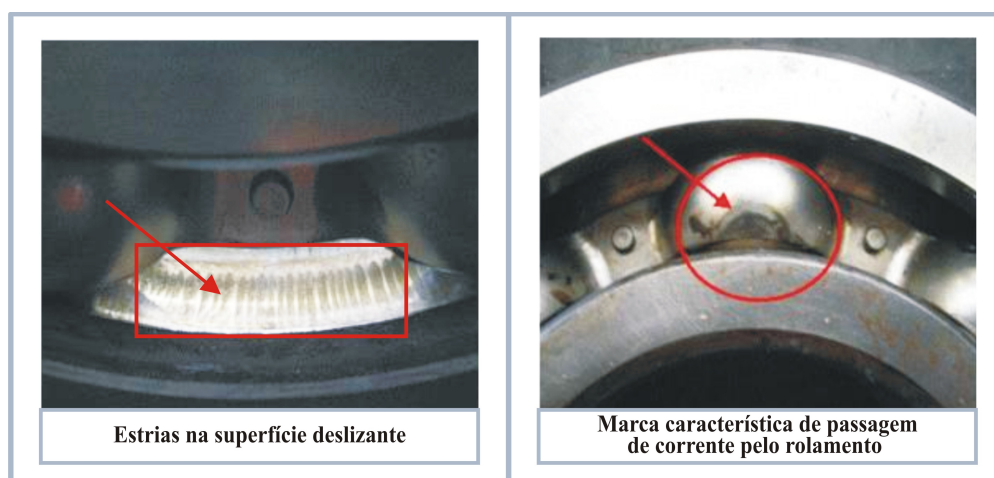
Fonte: Adaptado de Siemens (2016)

Figura 17 – Motores com avarias originadas por sobreaquecimento e sobrecarga



Fonte: Adaptado de Siemens (2016)

Figura 18 – Avarias em rolamentos originadas por disfunção elétrica e passagem de corrente pelo rolamento



Fonte: Adaptado de Cardoso (1991 apud ARAÚJO, 2015)

4.2 FALHAS ESTATÓRICAS

As falhas localizadas no estator dos motores elétricos correspondem entre 30% a 40% das falhas totais, nas quais, estão diretamente associadas à avarias nos enrolamentos que compõem o estator da máquina Siddique, Yadava e Singh (2005). Segundo Stone e Kapler (1998), o rolamento e o rotor são dois dos principais componentes de um motor elétrico. Cerca de 7500 motores foram examinados em um estudo e 37% das falhas avaliadas acarretaram em interrupções forçadas. Estas interrupções foram causadas pelo terceiro componente principal do

motor elétrico, que é o enrolamento do estator. De acordo com Siddique, Yadava e Singh (2005), o estator do motor elétrico é submetido a vários esforços de origem térmicos, elétricos, mecânicos e ambientais, afetando severamente a condição de funcionamento do estator e produzindo falhas.

Siddique, Yadava e Singh (2005) constata que as avarias situadas no estator do motor elétrico podem ser categorizadas da seguinte forma:

- Laminações (ponto quente no núcleo, afrouxamento do núcleo) e carcaça (vibração, correntes de circulação, perda de líquidos refrigerantes, falta à terra).
- Falhas nos enrolamentos do estator: As avarias mais comuns nos enrolamentos do estator estão relacionadas à *porção final de enrolamento*, que consiste em danos locais na isolação, desgaste da isolação, contaminação da isolação por umidade, óleo ou sujeira, danos aos conectores, trinca do isolamento, erosão por descarga da isolação, deslocamento de condutores e curto-circuito entre as espiras, ou à *porção de ranhura*, na qual representa o atrito, o desgaste da isolação e deslocamento dos condutores.

As avarias nos motores elétricos são causadas por uma combinação de vários esforços atuando no estator. Tais esforços podem ser classificados como elétricos, mecânicos, térmicos e ambientais. Nas seções seguintes, serão apresentados quais são os esforços que incidem sobre o estator, podendo ocasionar falhas e comprometer o funcionamento do motor. (SIDDIQUE; YADAVA; SINGH, 2005).

4.2.1 Estresses Elétricos

Os estresses elétricos que acarretam em avarias no enrolamento do estator podem ser classificados de acordo com Siddique, Yadava e Singh (2005) em:

- Dielétricos;
- Seguimento;
- Efeito Corona;
- Tensões Transitórias.

Quanto ao esforço elétrico associado ao dielétrico, pode-se destacar que a relação entre a vida útil dos materiais isolantes em função das tensões de estresse (sobretensões) neles aplicadas são levadas em consideração e são de suma importância para seleção de diversos materiais isolantes e para elaboração de projetos de bobinas para motores elétricos. Tais tensões de estresse podem decorrer de acordo com a seguinte classificação: fase para fase, espira para espira e espira para terra. O esforço elétrico relacionado ao fenômeno conhecido como *seguimento* nos enrolamentos ocorre quando o sistema de isolação de motores que operam com

tensões acima de 600 volts não estão protegidos completamente contra má condições do meio ambiente, acarretando em falhas de aterramento. O *efeito corona* por ser categorizado como um estresse elétrico capaz de provocar avarias nos enrolamentos do estator do motor elétrico, é definido com uma descarga localizada na qual é resultante da ionização gasosa transitória. Considerado um fenômeno severo, as tensões geradas excedem um valor crítico na ordem de 5kV, deteriorando a isolação do enrolamento do motor por meio do aquecimento gerado, erosão ou reação química. As tensões transitórias são provenientes de curtos-circuitos fase-fase, fase-terra e trifásicos. Estas tensões reduzem o tempo de vida útil dos enrolamentos e podem ser geradas por fusíveis limitadores de corrente, transferência rápida de barramentos, abertura e fechamento de disjuntores, comutação de capacitores, oscilações de frequência e falhas do sistema de isolação.

4.2.2 Estresses Mecânicos

Os estresses mecânicos podem ocorrer através dos movimentos das bobinas e dos choques ocorridos entre o rotor e o estator do motor elétrico. As forças magnéticas impostas sobre os enrolamentos do estator durante o processo de partida do motor são máximas. Estas forças produzem vibrações nas direções radial e axial, nas quais possuem o dobro da frequência e podem causar avarias no material isolante das bobinas do estator, como por exemplo, afrouxando o material isolação e causando danos aos condutores constituídos de cobre Siddique, Yadava e Singh (2005). A colisão entre rotor e estator pode ser ocasionada por alguns fatores, como por exemplo:

- Avarias nos mancais;
- Deflexão do eixo;
- Desalinhamento entre o rotor e o estator.

Os efeitos de choque entre rotor e estator de um motor elétrico durante sua partida são drásticos. Essa colisão pode acarretar em laminações no estator, perfurar o isolação das bobinas e por consequência, resultar no contato direto dos enrolamentos com a massa do motor. Contudo, podem ocorrer outras falhas nos enrolamentos do estator, promovendo o aquecimento, falhas no entreferro e quebra dos dentes da laminação devido a fadiga do estator. Estas avarias no estator do motor elétrico, são provenientes dos choques das pás do rotor, porcas e parafusos soltos, partículas estranhas que podem entrar no interior do motor por meio do sistema de ventilação e barras de rotor defeituosas (SIDDIQUE; YADAVA; SINGH, 2005).

4.2.3 Estresses Térmicos

O envelhecimento térmico e as sobrecargas térmicas são esforços que podem ocorrer no motor elétrico. Para ilustrar o quanto os esforços térmicos são prejudiciais para o correto funcionamento do motor elétrico, um aumento de 10°C de temperatura, promove a redução pela

metade da vida útil da isolação devido ao envelhecimento térmico. A tabela 4, apresenta valores de temperaturas ambiente e quais são seus impactos sobre o tempo de vida útil do sistema de isolação do enrolamento. É possível observar que há uma drástica redução do tempo de vida da isolação em função do aumento da temperatura ambiente. Os efeitos do envelhecimento térmico podem ser mitigados através da atenuação da temperatura de operação ou elevando a classe de isolação dos materiais empregados na construção dos motores elétricos (SIDDIQUE; YADAVA; SINGH, 2005).

A sobrecarga térmica, conforme explanado em Siddique, Yadava e Singh (2005), pode ter sua origem, nas variações de tensão, desequilíbrios das tensões de fase, operação do motor em sobrecarga, ventilação obstruída e temperatura ambiente elevada, por exemplo. Neste contexto, tomando os desequilíbrios das tensões de fase como referência, tem-se que a cada 3,5% desta instabilidade da tensão por fase, a temperatura do enrolamento do estator aumenta em 25% na fase, com uma corrente mais elevada. Regimes de operações ininterruptas, na qual o motor é submetido a repetidas partidas dentro de um pequeno intervalo de tempo, produz o efeito enfraquecedor da isolação por expansão e contração. Além disso, cargas com suas particularidades (inércia, peso, velocidade de carga inicial, curva de torque e ciclo de partida) ignoradas, contribuem para o aumento da temperatura no interior do motor elétrico.

Tabela 4 – Efeito da temperatura ambiente sobre o isolamento do enrolamento estatórico

Temperatura Ambiente em Graus Celsius	Tempo de Vida Útil da Isolação em Horas
30	250.000
40	125.000
50	60.000
60	30

Fonte: Adaptado de Karmakar et al. (2016, p. 22)

4.2.4 Estresses Ambientais e Contaminação

A presença de material estranho, segundo Siddique, Yadava e Singh (2005), pode causar vários efeitos indesejáveis em relação ao funcionamento e na dissipação de calor do motor elétrico. Falhas nos rolamentos e no sistema de isolação (curtos-circuitos) diminuem a eficiência e por sua vez reduzem sua vida útil. Atenuar a interação da superfície do motor elétrico com a umidade, produtos químicos e partículas estranhas é de suma importância para manter a eficiência e o funcionamento do motor dentro dos parâmetros nominais.

4.3 FALHAS ROTÓRICAS

O rotor do motor elétrico é o componente menos susceptível a falhas em comparação com o estator e rolamento. Conforme apresentado na tabela 3, o rotor apresenta 8-9% de possibilidade

de ocorrência de falhas. As avarias associadas ao rotor, possuem baixa ocorrência de falhas devido a robustez característica desta peça Toliyat e Kliman (2004 apud REIS, 2010). A maioria das falhas ocorridas são causadas por meio de estresses incididos sobre rotor Bonnett e Soukup (1988). De modo geral, esses estresses podem ser denominados como:

- Térmicos;
- Magnéticos;
- Residuais;
- Dinâmicos;
- Mecânicos;
- Ambientais.

Nas seções seguintes serão explanadas as particularidades dos estresses aplicados sobre o rotor do motor elétrico.

4.3.1 Estresses Térmicos

As falhas causadas por estresses térmicos, são facilmente identificadas, devido a nitidez com que pontos quentes surgem nas extremidades do rotor do motor elétrico Bonnett e Soukup (1988). As possíveis causas desses estresses são:

- Sobrecarga térmica;
- Desequilíbrio térmico;
- Pontos quentes;
- Rotação com sentido incorreto;
- Rotor bloqueado.

4.3.2 Estresses Magnéticos

As falhas magnéticas podem ser óbvias ou extremamente difíceis de serem identificadas. Por acarretar em danos secundários, uma observação cuidadosa para identificar com precisão a causa da falha se faz necessário Bonnett e Soukup (1988). As possíveis causas dos estresses magnéticos são:

- Sobretração do rotor;
- Tração magnética irregular;

- Saturação da laminação;
- Correntes circulantes (parasitas).

A sobretração do rotor, conforme afirmado em Bonnett e Soukup (1988), pode ocorrer acompanhado ou não do contato físico com o estator. Se o contato acontecer, a primeiras evidências são: ruído, vibração ou falha no enrolamento. Caso o contato não ocorra, a evidências se resumem em ruído e vibração. Contudo, a sobretração do rotor implica em uma sobrecarga radial nos enrolamentos que conseqüentemente reduz seu tempo de vida útil. Já a tração magnética irregular (desnivelada) apresenta um atrito de uma pequena área do estator em torno do diâmetro externo do rotor do motor elétrico. A causa da tração magnética desnivelada, pode ser compreendida pelo fato do eixo de rotação ser diferente do eixo magnético do enrolamento. Por fim, a saturação da laminação, bem como as correntes circulantes, reduzem a eficiência do motor. A solução para atenuar esses estresses está diretamente associada ao processo de fabricação (BONNETT; SOUKUP, 1988).

4.3.3 Falhas Dinâmicas e Mecânicas

Segundo Bonnett e Soukup (1988), falhas dinâmicas, com poucas exceções, são originadas principalmente por fatores externos ao motor elétrico. As possíveis causas de falhas dinâmicas são:

- Vibração (externa ou interna) ;
- Barras folgadas do rotor (interna);
- Atrito do rotor (externa ou interna);
- Torque transitório (externo);
- Sobrevelocidade (externo);
- Esforços cíclicos (externo).

Estresses cíclicos, vibração e relacionados ao torque, normalmente resultam em eixos quebrados e/ou rolamentos com falha. As indícios de sobrevelocidade geralmente consistem em pás do ventilador do motor quebradas, núcleo do rotor deslocado, alta vibração, danos ou distorção das peças montadas no eixo (ventoinhas, acoplamentos, etc.). Falhas dinâmicas de modo geral, produzem danos extensos a todo o motor, como por exemplo, falhas dos rolamentos geralmente ocasionam o choque entre rotor e estator com a conseqüente perda do enrolamento e o excesso de velocidade, na qual pode danificar todas as partes do motor (BONNETT; SOUKUP, 1988).

As falhas mecânicas apresentam características semelhantes às falhas térmicas ou dinâmicas, dificultando sua detecção (BONNETT; SOUKUP, 1988). As possíveis causas de problemas mecânicos nos motores elétricos são:

- Variações da carcaça;
- Laminação/barras folgadas;
- Eixo-núcleo com ajuste incorreto;
- Fadiga ou quebra de peças;
- Desvio de peças;
- Geometrias incorretas do rotor e estator;
- Montagem prática e/ou ressonância de eixo inadequadas;
- Projetos e fabricações inadequados.

Para as avarias mecânicas é extremamente importante inspecionar todas as peças do motor elétrico e não apenas o rotor, para determinar a classe de falha. O núcleo do rotor ou fricções do eixo são comuns devido ao eixo de rotação do rotor estar fora do centro magnético ou por partes do motor danificadas e/ou desalinhamento de cargas acopladas. A laminação ou barras folgadas produzem ruído no momento da partida ou durante o funcionamento. A movimentação das peças podem acarretar falhas por fadiga, pontos localizados, flexão do eixo, fricção do rotor, enrolamento ou falha do mancal, etc. A fadiga dos eixos ou componentes devem ser analisadas com intuito de evidenciar falhas cíclicas de longo ou curto prazo. Até mesmo a aparência de componentes externos, como graxa nas unidades de transmissão (rolamentos), pode fornecer uma evidência para a origem da falha.

4.3.4 Falhas Ambientais

Falhas desta natureza estão entre as mais fáceis de diagnosticar, contudo, é de suma importância observar os registros de manutenção, as condições do ambiente e de operação do motor elétrico para obter o histórico completo em torno da falha Bonnett e Soukup (1988). As principais causas das falhas ambientais são:

- Contaminação;
- Materiais abrasivos;
- Partículas estranhas;
- Ventilação restrita;

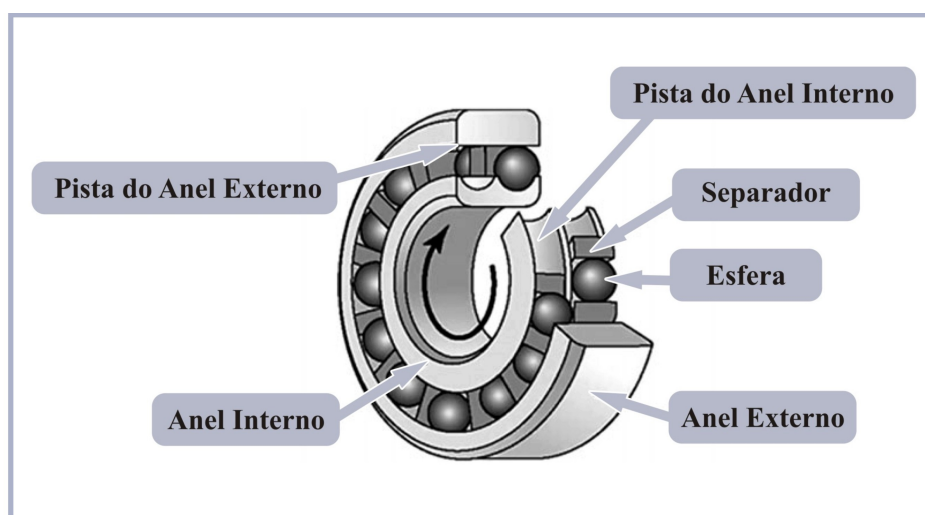
- Temperatura ambiente excessiva;
- Forças externas incomuns.

A ocorrência destas falhas são geralmente o resultado da má utilização do motor ou da manutenção inadequada. Poeira ou outros materiais podem entupir filtros, passagens de ventilação ou dutos de ar, acarretando no superaquecimento geral. Motores fechados podem ser revestidos com uma manta de material impedindo a transferência de calor adequada e/ou o fluxo de ar adequado. Produtos químicos ou água podem entrar no motor e atacar as superfícies do rotor, bem como as pás do ventilador.

4.4 FALHA NOS ROLAMENTOS

De acordo com Karmakar et al. (2016), dois conjuntos de rolamentos são colocados em ambas as extremidades do rotor de um motor de indução para apoiar o eixo de rotação. Estes rolamentos mantêm o rotor na posição adequada e contribui para um perfeito giro do eixo, atenuando a fricção. Cada rolamento é composto por um anel externo e um interno na qual estão localizadas as pistas e um conjunto de elementos rolantes chamados esferas, situadas entre as pistas conforme ilustrado na 19. Normalmente, a pista interna é conectada ao eixo e a carga é transmitida através das esferas giratórias. Por meio da introdução de lubrificantes (óleo ou graxa) entre as pistas é possível mitigar o atrito durante o giro do eixo.

Figura 19 – Partes integrantes do rolamento



Fonte: Adaptado de Karmakar et al. (2016, p. 19)

Submetidos à grandes tensões, os materiais utilizados nos rolamentos dos motores elétricos realizam toda transmissão mecânica sempre com níveis de esforços elevados, aproximando de seus limites e rendimentos nominais. As avarias mais comuns nos rolamentos, são provenientes do desgaste do metal utilizado. As falhas surgem por meio da incorreta seleção, instalação,

utilização, manutenção e no processo de fabricação do rolamentos Hattangadi (2005 apud PINHEIRO, 2011). Frente às diversas avarias que podem ocorrer no motor de indução, o rolamento é o componente mais susceptível a falhas. Conforme apresentado na tabela 3, 41–42% das falhas do motor de indução são originadas a partir do rolamentos (KARMAKAR et al., 2016).

As causas e efeitos das avarias do rolamento são:

- Cargas excessivas e sobrecarga de temperatura: Podem recozer as pistas do rolamento, bem como, os materiais que constituem a esfera.
- Falha por fadiga: É provocada pela utilização de longo prazo dos rolamentos, produzindo fraturas e subsequentemente remoção de pequenas partículas de materiais das superfícies das pistas ou das esferas. Para este tipo de falha, a vibração e o ruído aumentarão.
- Corrosão: Ocorre se os rolamentos estiverem expostos a fluidos corrosivos (ácidos, etc.) ou em atmosferas corrosivas. Caso os lubrificantes se deteriorarem ou os mancais forem instalados de modo incorreto, também poderá ocorrer corrosão dos mancais . Vale destacar que as falhas precoces por fadiga podem ser originadas devido à corrosão.
- A Contaminação é um dos principais fatores de falha do rolamento. Lubrificantes contaminados por sujeira e por outras partículas estranhas que estão mais presentes no ambiente industrial, por exemplo, podem causar falhas indesejáveis. Os efeitos da contaminação podem provocar alta vibração e desgaste.
- Falha de lubrificação: Lubrificação em excesso ou realizada de modo inadequado e temperatura excessiva podem degradar a propriedade do lubrificante e provocar o desgaste excessivo das esferas e pistas, resultando no sobreaquecimento. Caso a temperatura do rolamento se exceda, o lubrificante se derrete, saindo das pistas para fora do rolamento.
- Desalinhamento dos rolamentos: Ocorre desgastes nas superfícies das esferas e nas pistas do rolamento resultando no aumento da temperatura dos mancais.

Conforme descrito em Karmakar et al. (2016), as avarias ocorridas nos rolamentos, produzem o aumento do atrito, elevação da temperatura dos rolamentos e aumento da vibração do motor elétrico. Portanto, a temperatura e a vibração dos mancais podem fornecer informações sobre a condição do rolamento e a saúde do motor elétrico. Além das avarias e seus respectivos efeitos mencionados anteriormente, o desgaste nos rolamentos também pode ocorrer por meio dos acionamentos dos inversores de frequência.

Durante o acionamento deste dispositivo, correntes de modo comum circulam pelos rolamentos em conformidade com a carga eletrostática submetida ao eixo do rotor. Além disso, oscilações de conjugado também ocorrem devido a presença de harmônicos de corrente de baixa ordem ou barras quebradas do rotor. As cargas impostas ao eixo do motor elétrico em

decorrência do chaveamento dos inversores de frequência, acarreta no rompimento da rigidez dielétrica da graxa isolante e conseqüentemente, por meio do rolamento produz uma corrente de descarga para a carcaça aterrada do motor Shancheng e Zhengguo (2006 apud ARAÚJO, 2011). A ocorrência desta descarga danifica as pistas, bem como as esferas do rolamento, no qual terá sua vida útil reduzida gradativamente, por meio do acúmulo dos efeitos negativos das descargas Paula et al. (2008 apud ARAÚJO, 2011).

Segundo Kasmierkowski e Tunia (1994 apud ARAÚJO, 2011), as barras quebradas no rotor, podem ocasionar perturbações do fluxo magnético e por conseqüência, flutuar a frequência do rotor, a corrente, a rotação e produzir flutuações de conjugado, deteriorando o rolamento do motor elétrico. Ainda neste contexto de fatores que provocam falhas nos rolamentos, pode-se ressaltar também, o funcionamento de motores utilizando inversores de frequência na região de sobremodulação e com velocidades de operação próximas a nominal. Neste processo, devido à presença de harmônicos de baixa ordem na corrente introduzida no motor, o conjugado absorve os efeitos com pulsações e reduções de seu valor e falhas podem ocorrer no sistema mecânico de acionamento, bem como na instabilidade do sistema de controle de torque no motor elétrico (TROVÃO et al., 2002 apud ARAÚJO, 2011).

5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR DE INDUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as equações elétricas estáticas e rotóricas, bem como as equações mecânicas que modelam o funcionamento dinâmico do motor de indução trifásico. Estas equações serão explanadas no modelo matricial trifásico ABC, assim como no modelo dq0.

5.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

De acordo com Reis (2010), um conjunto de equações não lineares pode exprimir o funcionamento de um motor de indução. O emprego dessas equações se justifica pela existência do acoplamento entre as fases do estator e do rotor no qual este depende da posição angular do rotor em relação ao estator. O efeito do acoplamento transforma os coeficientes das equações diferenciais que modelam o motor de indução em variáveis. Pode-se modelar matematicamente um motor de indução por meio de vários modelos matemáticos que se diferem através da notação matemática aplicada a cada modelo. A modelagem do motor de indução pode ser realizada por meio dos seguintes procedimentos matemáticos:

- Notação matricial trifásica;
- Notação Vetorial (dq);
- Notação matricial ortogonal ($\alpha\beta 0$).

A aplicação da modelagem matemática em um motor de indução, tem o propósito de representar seu comportamento dinâmico e conseqüentemente obter grandezas internas. O modelo dinâmico do motor de indução, conforme afirmado em Cad (2000), pode ser adquirido por meio das seguintes equações:

- Tensão;
- Corrente;
- Fluxo concatenado;
- Conjugado eletromagnético;
- Movimento e posição angular.

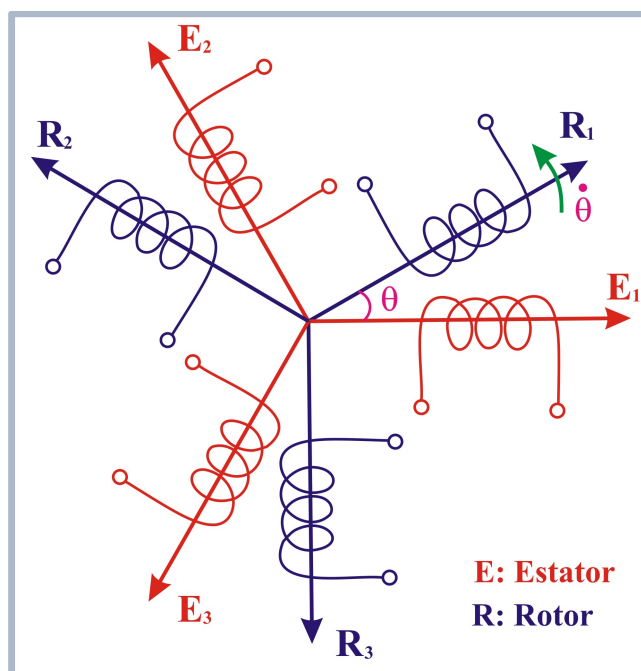
O comportamento dinâmico do motor de indução é adquirido com base nas suas características construtivas, sendo possível realizar sua representação através do circuito equivalente, bem como fenômenos eletromagnéticos e mecânicos inerentes ao seu funcionamento (REIS, 2010). De acordo com Barbi (1985), algumas hipóteses em relação aos parâmetros do motor de

indução são adotadas com intuito de simplificar matematicamente o processo de modelagem do motor de indução. Conforme relacionado em Pinheiro (2011), tais hipóteses simplificativas são:

- Os três enrolamentos estatóricos são iguais entre si;
- Os três enrolamentos rotóricos são iguais entre si;
- Os ângulos elétricos entre os enrolamentos são iguais tanto no rotor, quanto no estator;
- Efeito pelicular e perdas no entreferro não serão consideradas;
- O circuito magnético é considerado ideal. A saturação não existe;
- A distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é radial e senoidal;
- Não serão consideradas perdas magnéticas.

Por meio das considerações acima mencionadas, é possível esboçar a disposição dos enrolamentos estatóricos e rotóricos do motor de indução trifásico conforme ilustrado na figura 20. As indutâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e do rotor são funções senoidais dos deslocamento angular θ (REIS, 2010).

Figura 20 – Disposição do enrolamentos estatóricos e rotóricos

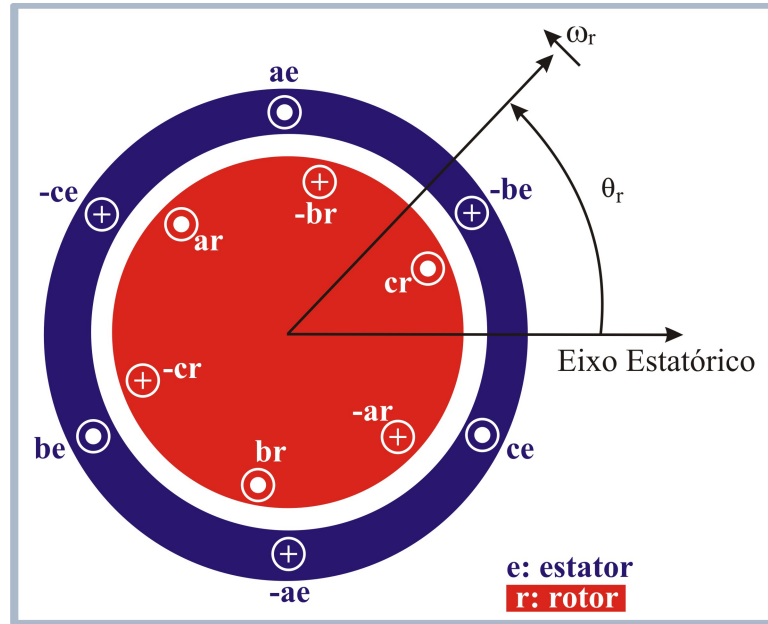


Fonte: Adaptado de Reis (2010)

5.2 NOTAÇÃO MATRICIAL TRIFÁSICA DO MOTOR DE INDUÇÃO - MODELO ABC

De acordo com Cad (2000) e ilustrado através da figura 21, um motor de indução convencional possui enrolamentos trifásicos na qual são constituídos por três bobinas denominadas de ABC. Tais bobinas se encontram defasadas entre si em 120° elétricos. Além disso, segundo Reis (2010), os circuitos em um motor de indução, são acoplados magneticamente.

Figura 21 – Modelo de circuito idealizado de um motor de indução trifásico



Fonte: Adaptado de Ong (1998, p. 170)

Deste modo, as equações diferenciais de tensão do estator e do rotor que modelam o comportamento dinâmico das grandezas por fase do motor de indução, podem ser apresentadas Cad (2000). Tais equações, conforme apresentado por Ong (1998), são:

$$\begin{aligned}
 v_{as} &= r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \text{ V} \\
 v_{bs} &= r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \text{ V} \\
 v_{cs} &= r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \text{ V}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}
 v_{ar} &= r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \text{ V} \\
 v_{br} &= r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \text{ V} \\
 v_{cr} &= r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \text{ V}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

A presença dos duplos índices nas equações 5.1 e 5.2 representam as gradezas fluxo e corrente do estator referida ao estator e fluxo e corrente do rotor referida ao rotor do motor de indução. Por meio destas equações elétricas, é possível extrair todo comportamento elétrico em um circuito resistivo-indutivo acoplado magneticamente Cad (2000). O fluxo total concatenado é originado a partir da contribuição de três fluxos. Tais fluxos são representados por meio das indutâncias próprias e as indutâncias de dispersão do estator e do rotor, bem como as indutâncias mútuas entre os enrolamentos estatóricos e rotóricos do motor de indução. Frente a hipótese na qual têm-se os enrolamentos estatóricos e rotóricos simétricos, pode-se afirmar que as indutâncias próprias do estator e do rotor são iguais, assim como as indutâncias mútuas Reis (2010). A equação 5.3 apresenta as indutâncias próprias e as indutâncias mútuas do motor de indução, bem como suas relações.

$$\begin{aligned}
 L_s &= L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} \\
 L_r &= L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} \\
 L_{sm} &= L_{smab} = L_{smbc} = L_{smca} \\
 L_{rm} &= L_{rmab} = L_{rmcb} = L_{rmca}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

A equação 5.4 apresenta a notação matricial das indutâncias entre as fases do estator e do rotor. Tais indutâncias são dependentes do ângulo rotórico θ_r do motor de indução (ONG, 1998).

$$L_{sr}^{abc} = \left[L_{rs}^{abc} \right]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \left(\cos \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \left(\cos \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \left(\cos \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \left(\cos \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \left(\cos \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \left(\cos \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} H \tag{5.4}$$

Conforme apresentado em Ong (1998), as submatrizes das indutâncias próprias do enrolamento do estator e do rotor podem ser escritas de acordo com a equações 5.5 e 5.6.

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} H \tag{5.5}$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} H \tag{5.6}$$

Com base nas equações apresentadas e por meio da notação matricial, o fluxo total concatenado nos enrolamentos do estator e do rotor podem finalmente ser obtidos em termos das indutâncias e correntes dos enrolamentos estatóricos e rotóricos conforme equação 5.7. Em suma, o motor de indução trifásico, tem seu comportamento dinâmico modelado por seis equações diferenciais de primeira ordem para cada enrolamento estatórico e rotórico. Tais equações são

acopladas entre si por meio das indutâncias mútuas entre os enrolamentos existentes. Os termos do acoplamento entre estator e rotor são em função do ângulo rotórico. Assim, quando o motor realiza seu giro, esses termos de acoplamento variam com o tempo (ONG, 1998).

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad \text{Wb} \quad (5.7)$$

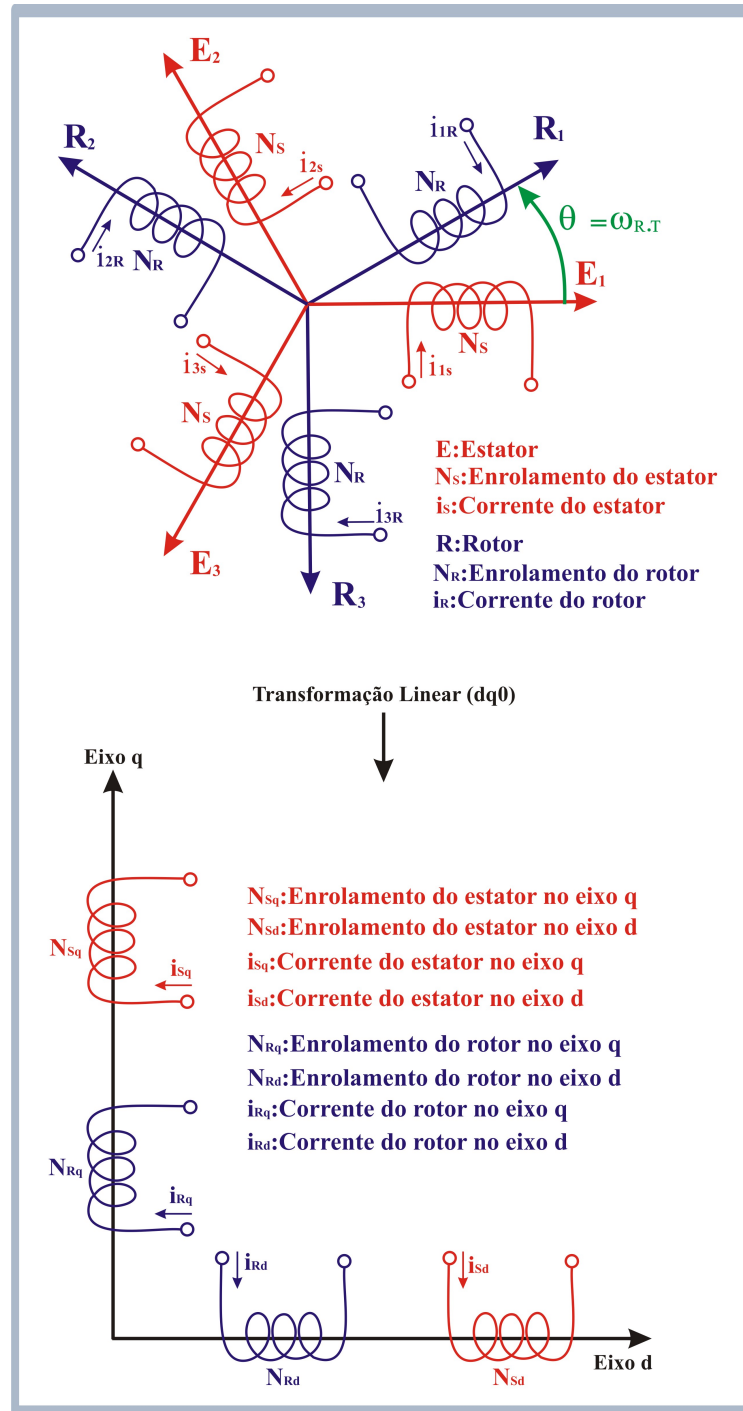
onde:

$$\begin{aligned} \lambda_s^{abc} &= (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^t \\ \lambda_r^{abc} &= (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^t \\ i_s^{abc} &= (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^t \\ i_r^{abc} &= (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^t \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.3 NOTAÇÃO MATRICIAL TRIFÁSICA DO MOTOR DE INDUÇÃO - MODELO dq0

A simplificação do conjunto de equações que representam o motor de indução trifásico através da transformação linear consiste matematicamente em diagonalizar as matrizes circulares simétricas pertinentes as fórmulas que modelam seu comportamento dinâmico introduzindo um conjunto de variáveis hipotéticas. Conforme ilustrado na figura 22, a transformação do conjunto de equações do modelo matricial ABC para o modelo dq0, basicamente transforma a máquina simétrica trifásica em uma máquina simétrica bifásica, na qual os enrolamentos estatóricos são fixos, ao passo que os enrolamentos rotóricos são pseudos-estacionários. Pode-se ressaltar, que a máquina bifásica obtida por meio do modelo dq0, apresenta potência mecânica, torque, velocidade e número de polos equivalente à máquina trifásica (NETO; MENEZES et al., 2004). Conforme afirmado em Ong (1998), transformações matemáticas como o modelo dq0, contribui para a simplificação computacional da solução transitória do modelo do motor de indução em estudo, transformando equações diferenciais com indutâncias variáveis no tempo para equações diferenciais com indutâncias constantes. Para implementar esta transformação do modelo matricial trifásico ABC para o modelo dq0, o entreferro é considerado simétrico.

Figura 22 – Representação do enrolamento trifásico em eixos dq



Fonte: Adaptado de Neto, Menezes et al. (2004)

No sistema dq0, o modelo matricial ABC é convertido em dois eixos q e d, na qual o eixo dq0 se movimenta com velocidade ω em relação ao eixo ABC, frente a adoção de uma referência arbitrária Ong (1998). A transformação das equações do modelo ABC para o modelo

dq0 é representada pela equação 5.9.

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

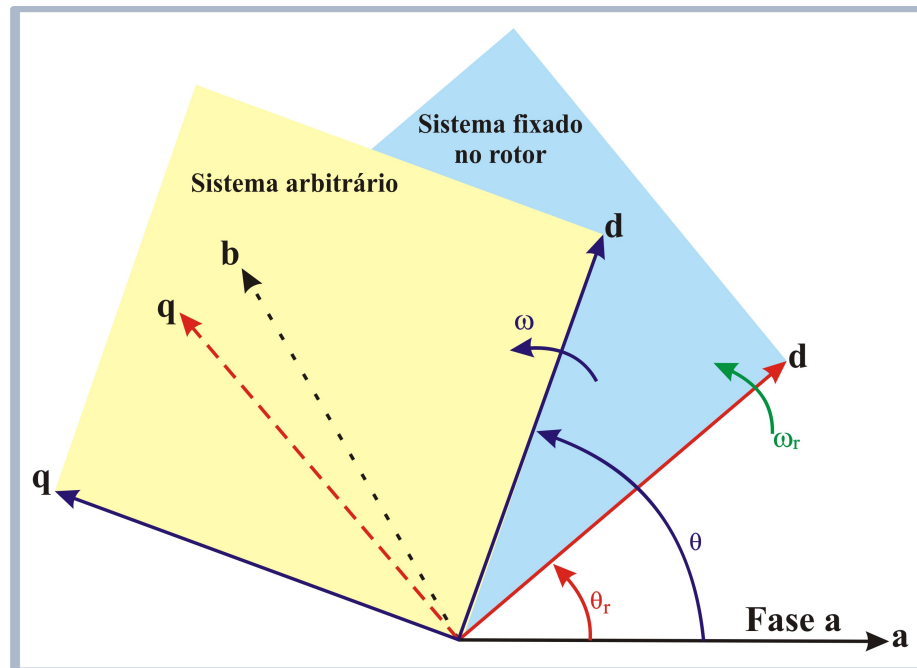
Na equação 5.9 as variáveis f são representadas pelas tensões, correntes e fluxos concatenados no motor de indução trifásico. O termo $T_{qd0}(\theta)$ representa a matriz de transformação denominada Transformada de Park, conforme mostrado na equação 5.10. Para a realização da transformação de variáveis do modelo dq0 para o modelo ABC, tem-se a matriz de transformação titulada de Transformada Inversa de Park, exibida na equação 5.11.

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{sen} \theta & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$[T_{qd0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

A partir da ilustração da figura 23, é possível compreender o sistema de referência arbitrário na utilização do modelo dq0.

Figura 23 – Sistema de referência arbitrário em relação a fase a do motor de indução



Fonte: Adaptado de Puma (2010)

Segundo Puma (2010), sistema de referência arbitrário (eixo real) na qual serão representados vetores espaciais de tensão, corrente e fluxo magnético, forma um ângulo θ com o eixo magnético a do enrolamento do estator. Tomando como hipótese que o referencial arbitrário gira à uma velocidade ω , então o ângulo θ pode ser calculado integrando esta velocidade Ong (1998). A equação 5.12 apresenta este cálculo.

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad (5.12)$$

- $\theta(0)$ representa valores do ângulo nas condições iniciais.

O sistema de referência no eixo real fixado no rotor ($\theta - \theta_r$), forma um ângulo com o eixo real do sistema de referência arbitrário, na qual ω representa a velocidade do sistema arbitrário e ω_r é a velocidade do sistema de referência fixado no rotor. Logo o ângulo $\theta - \theta_r$ pode ser calculado por meio da integração das diferenças das velocidades $\omega - \omega_r$. A equação 5.13 exibe este cálculo.

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (5.13)$$

- $\theta_r(0)$ representa valores do ângulo nas condições iniciais.

Conforme afirmado por Puma (2010), o valor da velocidade ω define o sistema de referência. As definições do sistema de referência em função da velocidade ω são:

- Para $\omega = \omega_s$, o sistema de referência será síncrono;
- Para $\omega = \omega_r$, o sistema de referência será fixado no rotor do motor de indução;
- Para $\omega = 0$, o sistema de referência será estacionário. Este sistema de referência será aplicado no motor de indução durante a realização deste trabalho.

Após aplicação do modelo dq0 sobre as equações estáticas e rotóricas de tensão e de fluxo concatenado no modelo ABC, as equações de tensão podem ser reescritas conforme apresentado nas equações 5.14 e 5.15.

$$\begin{aligned} v_{qs} &= r_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \\ v_{ds} &= r_s \cdot i_{ds} - \omega \cdot \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \\ v_{0s} &= r_s \cdot i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned}
v'_{qr} &= r'_r \cdot i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{dr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \\
v'_{dr} &= r'_r \cdot i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{qr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \\
v'_{0r} &= r'_r \cdot i'_{0r} + \frac{d\lambda'_{0r}}{dt}
\end{aligned} \tag{5.15}$$

As equações de fluxo concatenado do modelo ABC, dão lugar a equação 5.16, após a aplicação do modelo dq0.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls}+L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr}+L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr}+L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

A partida equação de fluxos concatenados (5.16) do rotor e do estator do motor de indução, pode-se verificar a relação dos fluxos com as correntes da máquina de indução Puma (2010). As correntes do estator e do rotor são obtidas a partir dos fluxos e da matriz inversa de indutâncias, de acordo com a equações 5.17 e 5.18.

$$\lambda = L \cdot i \tag{5.17}$$

$$i = L^{-1} \tag{5.18}$$

A última, mas não menos importante equação do modelo dq0 a ser definida é o torque eletromagnético produzido pelo eixo do rotor do motor de indução. Este torque retrata toda energia convertida em trabalho mecânico dividida pela velocidade mecânica da máquina de indução. A equação 5.19, extraída de Ong (1998), representa o torque eletromagnético.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{ds} \cdot i_{qs} - \lambda_{qs} \cdot i_{ds}) \text{ N} \cdot \text{m} \tag{5.19}$$

5.4 EQUAÇÕES DO SISTEMA MECÂNICO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Conforme descrito em Correia (2014), os parâmetros mecânicos inerentes ao motor de indução são:

- Coeficiente de atrito com o ar;
- Constante de atrito estático ou de Coulomb;

- Coeficiente de atrito viscoso;
- Inércia.

Tais parâmetros citados acima, são responsáveis pelo desenvolvimento do denominado torque ou binário de atrito com o ar, de atrito viscoso, de atrito estático ou de Coulomb e de inércia. Os torques desenvolvidos e associados ao torque de inércia da carga, contribuem para decréscimo da velocidade do motor de indução. A equação 5.20 descrita por Krause et al. (2013) descreve o comportamento dinâmico do motor de indução trifásico. De acordo com Correia (2014), esta equação é fundamentada na lei da dinâmica para um sistema rotativo.

$$T_{em} = J \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + T_L + T_R \quad (5.20)$$

A equação 5.20 é constituída pelas seguintes variáveis: Torque eletromagnético (T_{em}), momento de inércia (J), número de polos do motor de indução (P), torque de carga do motor (T_L) e torque resistente (T_R).

O torque resistente (T_R) é um fator que pode ser produzido de acordo com o tipo de carga a ser lidada. Vale ressaltar que os atritos existentes no motores de indução (viscoso, ar e estático) possuem alta complexidade quanto aos seus tratamentos analíticos, uma vez que suas origens são provenientes de fenômenos causados por vibração, posição, temperatura, natureza dos materiais em contato e velocidade Correia (2014). Na seção a seguir, serão contempladas sucintas abordagens sobre o momento de inércia e atrito viscoso. Estes servirão de base neste trabalho para a produção do binário resistente, no qual será utilizado na equação 5.20, juntamente com o torque eletromagnético, o momento de inércia, números de polos e o torque de carga, para obtenção da velocidade mecânica rotórica do motor de indução trifásico.

5.4.1 Momento de Inércia e Atrito Viscoso do Motor de Indução:

Segundo Correia (2014), o momento de inércia de um corpo de massa m em torno de um eixo, consiste no parâmetro referente ao movimento de rotação, na qual correspondente a massa de inércia no movimento linear. O atrito viscoso é proveniente de fluídos lubrificantes em escoamento laminar. O atrito produzido pela existência destes fluídos lubrificantes, é proporcional a velocidade mecânica do rotor do motor de indução, conforme apresentado na equação 5.21, Palma (2008 apud CORREIA, 2014).

$$T_r = K_v \cdot \omega_r \quad (5.21)$$

- K_v representa o fator de fricção ou coeficiente de atrito viscoso dado em $N \cdot m \cdot s/rad$;
- ω_r representa a velocidade mecânica do rotor do motor de indução.

Desde modo, as equações 5.14, 5.15, 5.16, 5.19 e 5.20 descrevem todo comportamento dinâmico das grandezas elétricas (estatóricas e rotóricas) e mecânicas que compõem o motor elétrico de indução trifásico.

6 INFLUÊNCIA DAS FALHAS SOBRE OS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO

Frente as inúmeras falhas estatóricas, rotóricas e de rolamentos, as quais os motores elétricos de indução estão sujeitos devido à fatores internos (mecânicos e elétricos) e externos (mecânicos, elétricos e ambientais), neste capítulo, serão abordadas, quais são as influências / efeitos destas falhas sobre os parâmetros internos do motor elétrico durante a ocorrência de avarias. As falhas que terão seus efeitos analisados são:

- Curto-circuito localizado nos enrolamentos do estator;
- Barras quebradas no rotor;
- Falhas nos rolamentos.

A ocorrência de avarias segundo Kliman et al. (1996 apud REIS, 2010) acarreta em alterações nas grandezas internas do motor elétrico. Estas grandezas podem ter seus respectivos valores elevados ou decrescidos em torno de seus valores nominais. De modo geral, as grandezas do motor elétrico que sofrem distúrbios na presença de falhas são:

- Indutâncias estatóricas e rotóricas;
- Resistências estatóricas e rotóricas;
- Velocidade.

6.1 EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO SOBRE OS PARÂMETROS DO ESTATOR

A modificação dos parâmetros, tais como, resistência e indutância do motor de indução mediante a curto-circuito nos enrolamentos do estator, ocasiona na diminuição do valor da resistência assim como no valor da indutância Kliman et al. (1996 apud REIS, 2010). As equações 6.1 e 6.2 elucidam as relações entre comprimento do fio e área da seção transversal do mesmo, uma vez que a ocorrência de curto-circuito no enrolamentos do estator acarreta na redução do tamanho do bobinado (PINHEIRO, 2011).

$$\Delta r = \rho \cdot \frac{\Delta l}{A} \quad (6.1)$$

$$\Delta l = \frac{\Delta l_b}{\mu \cdot A_b} \quad (6.2)$$

Sendo:

- Δr a variação da resistência;

- ρ a resistividade do material da bobina;
- Δl a variação do comprimento do fio;
- A a área da seção transversal do fio;
- Δl_b a variação do comprimento da bobina;
- μ a permeabilidade do material do entreferro;
- A_b a área de seção transversal da bobina.

6.1.1 Efeitos de Barras Quebradas sobre os Parâmetros do Rotor

Conforme afirmado por Filippetti, Franceschini e Tassoni (2000 apud REIS, 2010), a contribuição dos campos magnéticos produzidos pelos enrolamentos estatóricos e rotóricos do motor de indução são considerados pela teoria do campo girante. E por meio desta, é possível obter as falhas associadas a resistência rotórica. Ainda neste contexto, a teoria do campo girante certifica que uma assimetria rotórica acarreta em uma superposição de dois campos contrarrotacionais, o que equivale na reação rotórica para o campo girante estatórico de frequência f , promovendo o surgimento de componentes de frequência $\pm sf$ (frequência de assimetria do rotor).

Ainda de acordo com Filippetti, Franceschini e Tassoni (2000 apud REIS, 2010), a intensidade dos efeitos das barras quebradas no rotor do motor de indução pode ser obtida a partir da consideração de que o rotor é trifásico, composto por N barras e a resistência de uma barra do rotor é expressa por r_b , conforme exibido na equação 6.3. Deste modo, o incremento do valor da resistência é dado pela equação 6.4.

$$r_r \propto \frac{r_b}{N} \quad (6.3)$$

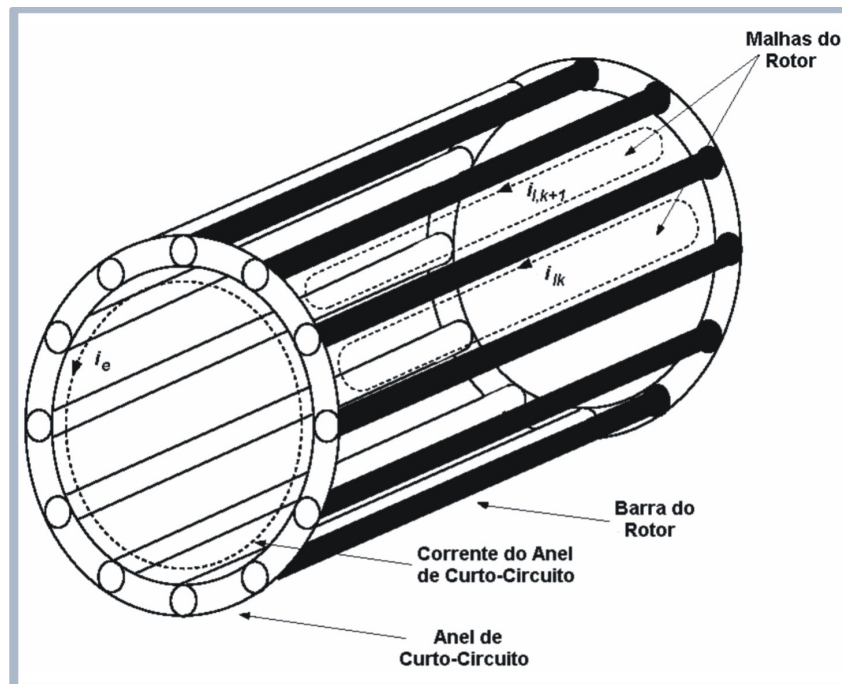
$$\Delta R = 3 \cdot r_r \cdot \frac{n}{N - 3 \cdot n} \quad (6.4)$$

Sendo:

- ΔR incremento de resistência do rotor;
- n o número de barras quebradas;
- N o número total de barras;
- r_b a resistência de uma barra;
- r_r a resistência do rotor.

Para identificar barras quebradas no rotor do motor de indução, basta que ΔR presente na equação 6.4 apresente valores entre 10% e 30% da resistência r_r . A figura 24 apresentada por Cunha (2006), ilustra uma gaiola simétrica de um motor de indução, na qual possui $n + 1$ malhas, situadas entre as barras do rotor. Estas malhas são semelhantes umas as outras e possuem distanciamento igual entre si. Além disso, existe também a malha associada ao anel de curto-circuito. Deste modo, a malha K é constituída pelas barras K e $K - 1$, além das porções dos anéis de curto-circuito.

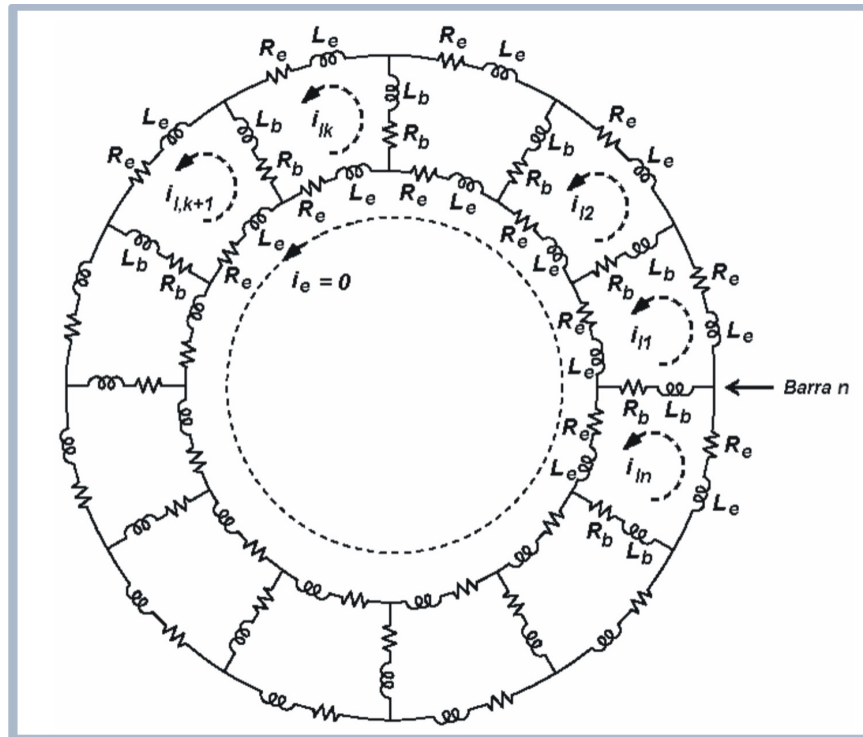
Figura 24 – Gaiola simétrica do rotor e suas malhas



Fonte: Adaptado de Cunha (2006)

Com intuito de simplificar a compreensão sobre o circuito do rotor do motor indução, na figura 25 é ilustrado o circuito contendo detalhes das distribuições em paralelo das barras ao longo do rotor e suas interligações com os anéis de curto-circuito. Além disso, na figura 25, são apresentados os seguintes parâmetros que compõem o rotor: R_e , L_e , R_b , L_b , i_l e i_e os quais representam a resistência e a indutância dos anéis de curto-circuito, a resistência e a indutância das barras, as correntes das malhas do rotor, bem como a corrente do anel de curto-circuito respectivamente.

Figura 25 – Gaiola simétrica do rotor e suas malhas



Fonte: Adaptado de Cunha (2006)

Frente as particularidades do circuito do rotor apresentadas, é possível concluir que, na ocorrência de barras quebradas, cada barra e segmento de anel de curto-circuito serão posicionados em série em um circuito RL. As correntes das malhas, na qual está situada a barra quebrada, sofrerão alterações, ao passo que a corrente na barra danificada terá valor zero. Baccarini (2005). Assim, na presença de barras quebradas do rotor, um dos ramos do circuito ficará em aberto, acarretando no aumento do valor da resistência e da indutância rotórica. (PINHEIRO, 2011)

6.1.2 Efeitos das Falhas no Rolamento sobre a Velocidade do Motor de Indução

Conforme apresentado na tabela 3, o rolamento do motor elétrico é o componente mais susceptível a ocorrência de falhas. As diversas origens destas falhas acarretam no aumento do atrito, vibração e elevam a temperatura do rolamento. Contudo, estas falhas comprometem a transmissão mecânica de potência, na qual, a máquina de indução terá que produzir um valor de torque eletromagnético superior ao seu nominal para suprir a elevação do atrito entre o eixo e os rolamentos Reis (2010). Por meio da equação 5.21 é possível compreender que a partir da presença de falhas no rolamento, há um aumento do fator de fricção ou coeficiente de atrito viscoso K_v e conseqüentemente o binário resistente T_r aumenta.

7 SIMULAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SIMÉTRICO

Neste Capítulo serão apresentados os procedimentos de simulação do motor de indução trifásico em estudo, contemplando as equações e softwares utilizados. Será descrito também, os parâmetros do motor indução trifásico adotado neste trabalho e gráficos de algumas grandezas extraídas das simulações serão plotados com intuito de elucidar todo comportamento dinâmico de um motor de indução em funcionamento diante de algumas situações operacionais aqui consideradas.

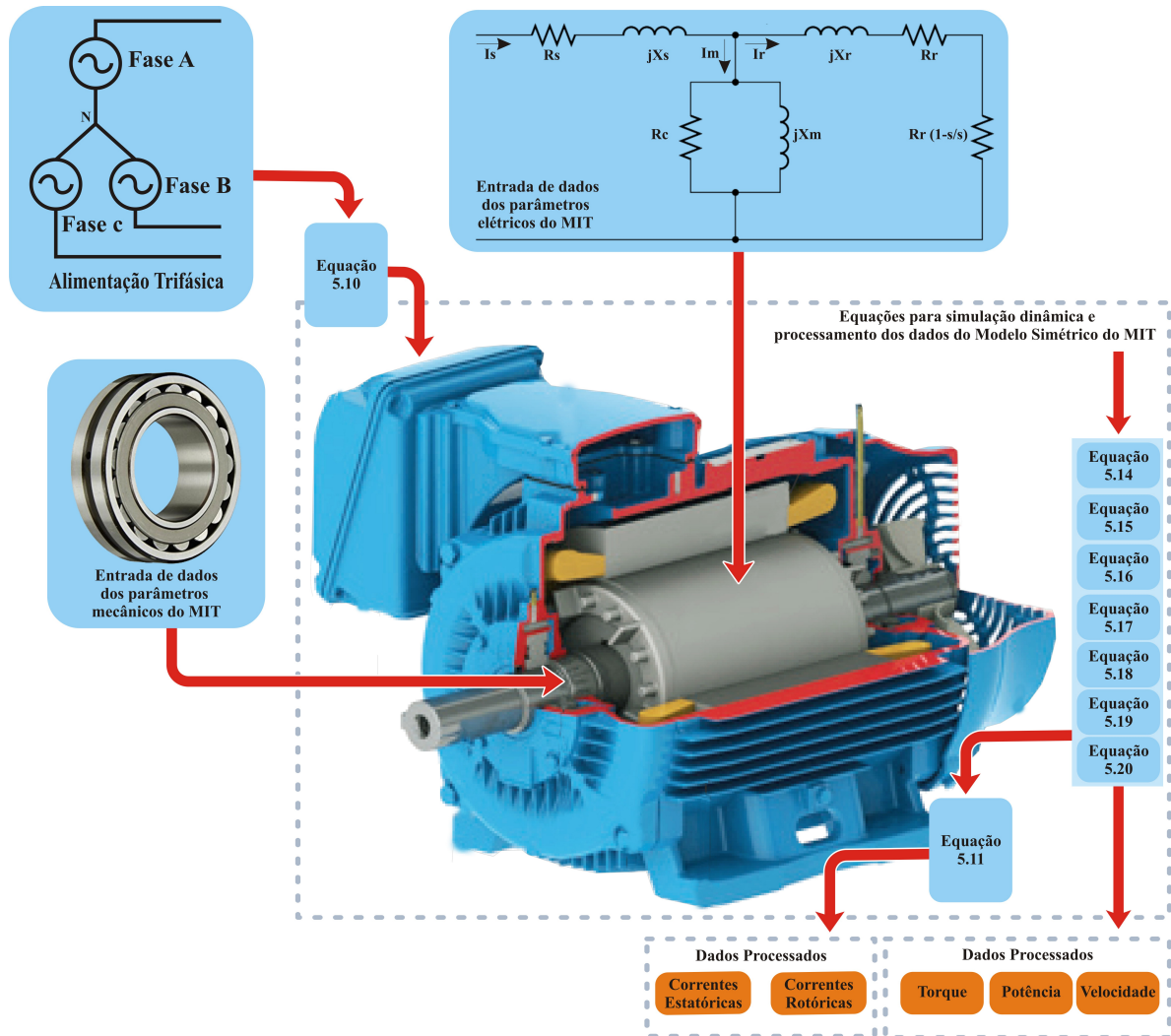
7.1 PRÉ-SIMULAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO

As simulações do comportamento dinâmico do motor de indução trifásico, tanto para o modelo simétrico (sem falhas) e para os modelos com assimetrias estatóricas, rotóricas e de rolamentos, foram desenvolvidas com o auxílio de ferramentas de modelagem matemática computacional, tais como, MATLAB[®] ¹ e SIMULINK[®] ², nas quais, as equações descritas no capítulo 5 foram implementadas. O fluxograma apresentado na figura 26, ilustra a sequência dos procedimentos adotados, bem a como as equações utilizadas nas simulações.

¹O software MATLAB[®] integra computação, visualização e ambiente de programação, contendo diversas ferramentas de edição e depuração incorporadas, tornando-se uma excelente ferramenta para ensino e pesquisa (HOUCQUE, 2005).

²O MATLAB[®] e o SIMULINK[®], são integrados em um único software, na qual pode-se simular e revisar os modelos elaborados em qualquer ambiente e a qualquer momento (KARRIS, 2007).

Figura 26 – Fluxograma de simulação do modelo simétrico do motor de indução



Fonte: Adaptado de WEG (2016)

Por meio do fluxograma esboçado na figura 26, é possível verificar a necessidade do conhecimento prévio de algumas especificações referentes a alimentação do motor de indução trifásico, assim como seus parâmetros elétricos e mecânicos inerentes a sua construção. Tais parâmetros e seus respectivos valores nominais estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros elétricos e mecânicos do motor de indução

Parâmetros Elétricos	Potência (HP)	2250
	Tensão de Operação (V)	2300
	Número de Fases	3
	Frequência de Operação (Hz)	60
	Tipo de Ligação	Estrela
	Pares de Pólos	2
	Resistência Estatórica (Ohm)	0,029
	Reatância Estatórica (Ohm)	0,226
	Resistência Rotórica (Ohm)	0,022
	Reatância Rotórica (Ohm)	0,226
	Reatância de Magnetização (Ohm)	13,08
Parâmetros Mecânicos	Momento de Inércia (Kg.m ²)	63,87
	Fator de Fricção (N.m.s/rad)	1,607
	Velocidade de Rotação (rad/s)	187,0294

Fonte: Adaptado de Cathey, Cavin e Ayoub (1973)

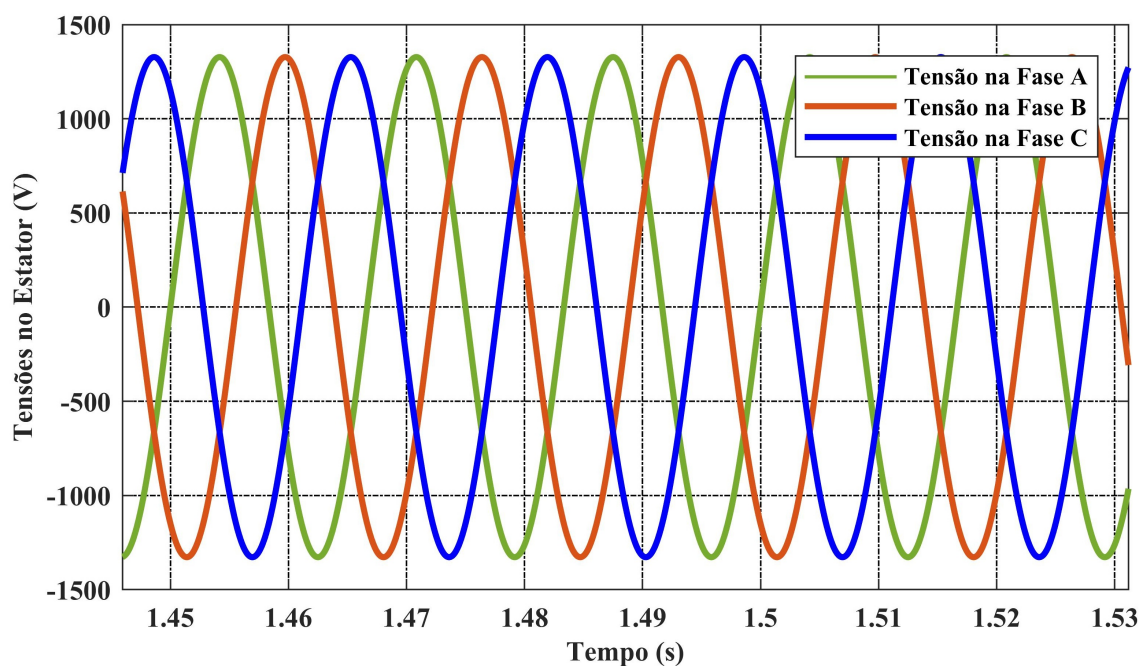
Conforme descrito por Pinheiro (2011), os sinais de entrada trifásico (ABC), nos quais alimentam os enrolamentos do estator, são transformados para o sistema dq0 por meio da aplicação da Transformada de Park apresentada na equação 5.10. Na sequência, juntamente com os sinais de alimentação convertidos do modelo ABC para o modelo dq0, os parâmetros elétricos relativos ao circuito equivalente do motor de indução (resistência estatórica e rotórica, reatância estatórica, rotórica e de magnetização), assim como os parâmetros mecânicos (momento de inércia, coeficiente de fricção), são manipulados e processados pelas equações 5.11, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 5.18, 5.19 e 5.20.

Deste modo, após a simulação, dados pertinentes às correntes estatóricas e rotóricas, velocidade na ponta do eixo, torque eletromagnético e fluxos magnéticos são gerados e podem ser coletados e analisados de acordo com os objetivos em estudo, proporcionando uma ampla análise das condições dinâmicas de operação, bem como a eficiência do motor de indução trifásico. Ainda neste contexto, é válido ressaltar, que os dados produzidos das correntes estatóricas e rotóricas, são originados através da Transformada Inversa de Park apresentada na equação 5.11 e ilustrado na figura 26.

7.1.1 Simulação Dinâmica do Motor de Indução Simétrico

O motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, cujo seus respectivos parâmetros elétricos e mecânicos apresentados na tabela 5 foi simulado por um tempo de dez segundos, inicialmente sem defeitos (modelo simétrico), sem torque de carga aplicado ao seu eixo e conectado em estrela. Vale mencionar que a escolha do motor de indução trifásico adotado neste trabalho para as simulações foi realizada de forma arbitrária e que a única premissa adotada foi analisar seu comportamento dinâmico diante de situações que serão aplicadas e detalhadas a diante. De posse dos dados das primeiras simulações do motor de indução em estudo, foram obtidas e plotadas as tensões trifásicas de alimentação (Fases A,B e C) aplicadas junto ao estator do motor, defasadas simetricamente entre si 120° elétricos na frequência de 60Hz, conforme ilustrado na figura 27.

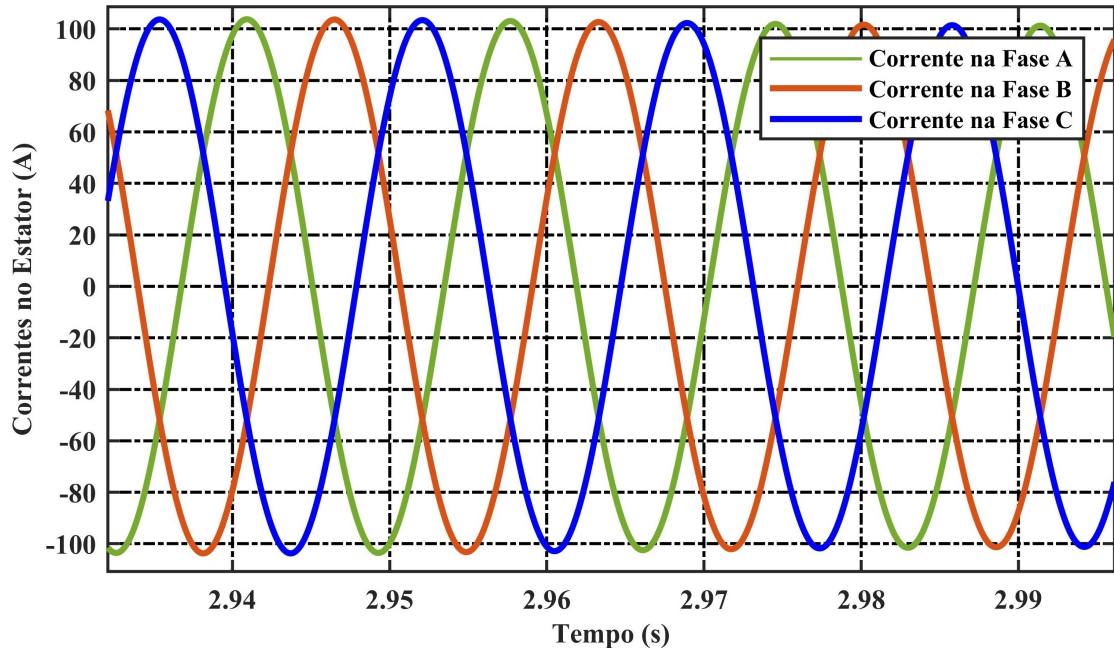
Figura 27 – Tensões no estator do MIT nas Fases ABC



Fonte: Próprio autor

Na figura 28 foram plotadas as correntes nas fases A,B e C do estator do motor de indução, simulado com as condições citadas inicialmente.

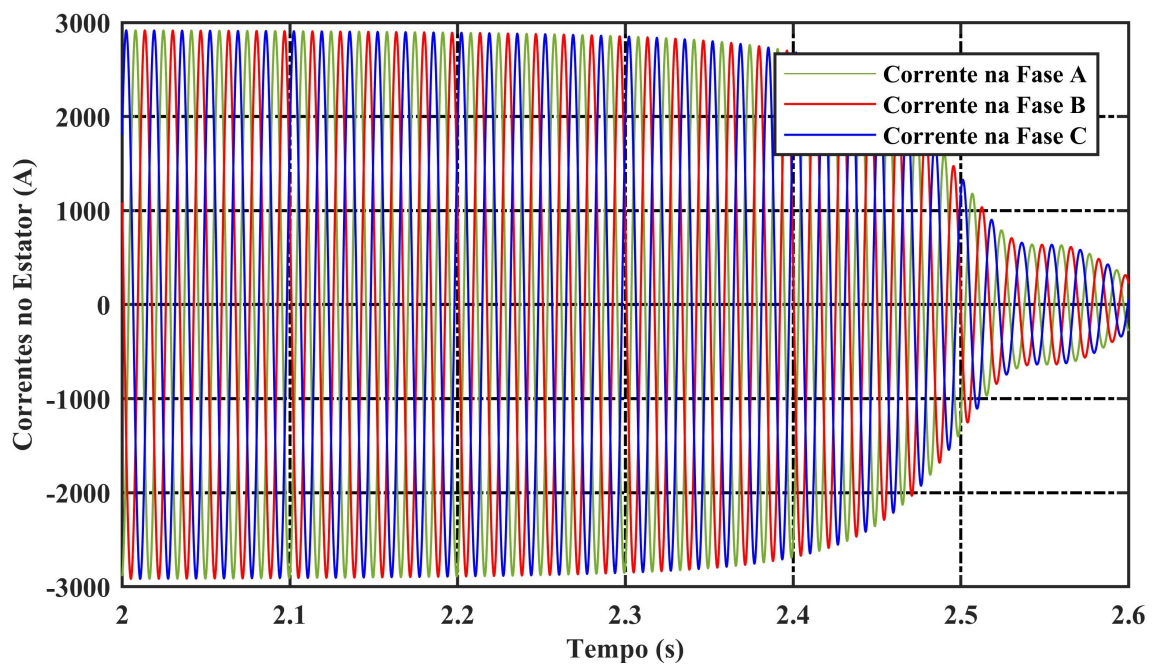
Figura 28 – Correntes no estator do MIT nas Fases ABC sem torque de carga aplicado



Fonte: Próprio autor

Com o intuito de observar todo o comportamento dinâmico do motor de indução trifásico em estudo, foram plotadas as reações das correntes nas fases A, B e C do estator no regime transitório conforme esboçado na figura 29. Este comportamento pode ser visto segundos após ser dada a partida do motor.

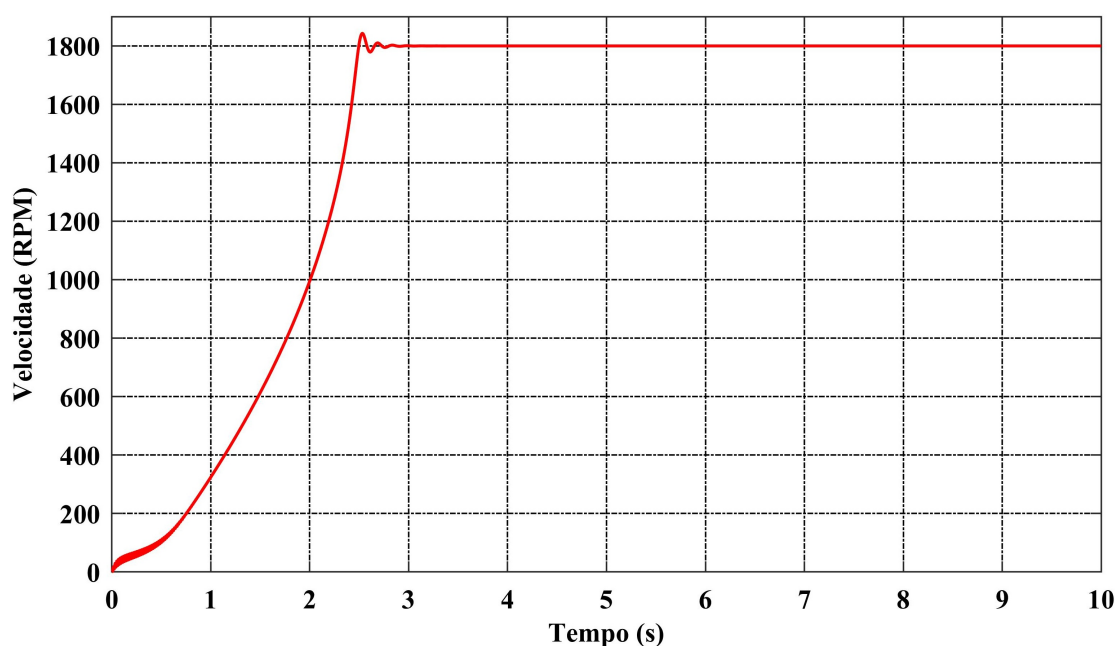
Figura 29 – Correntes no estator do MIT durante o regime transitório nas Fases ABC



Fonte: Próprio autor

A velocidade do motor de indução em estudo, operando a vazio, ou seja, sem torque de carga aplicado ao seu eixo, pode ser examinada por meio da figura 30. É notável que nesta condição, o motor acelera para valores próximos da velocidade síncrona (1800 RPM). Esta situação pode ser justificada devido ausência de carga no eixo do motor de indução, na qual o escorregamento da máquina é baixo e o movimento relativo entre o campo magnético girante do rotor e do estator é pequeno nesta condição Chapman (2013). A estabilização da velocidade ocorre próximo de três segundos de simulação.

Figura 30 – Velocidade do MIT sem torque de carga aplicado

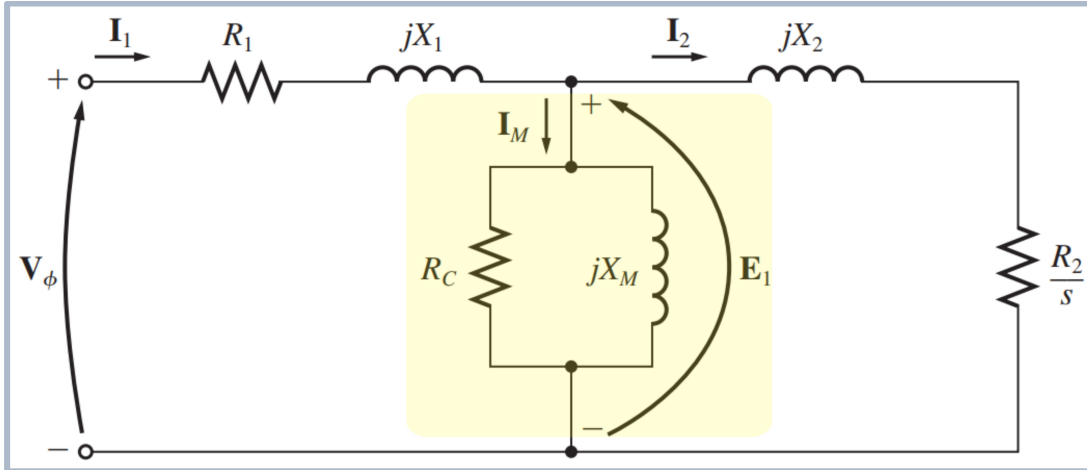


Fonte: Próprio autor

Segundo descrito em Goedtel (2003 apud SILVA, 2007), a medida em que o campo magnético girante percorre sua trajetória ao longo do estator, induzindo tensões junto ao rotor do motor de indução. As correntes elevadas produzidas que circulam pelo circuito do rotor produzem um campo magnético resultante, na qual se opõem ao campo magnético do estator, gerando o torque eletromagnético. Contudo na condição de operação a vazio de acordo com Chapman (2013), a tensão induzida nas barras do rotor, a corrente e a frequência são muito baixas, assim como a reatância rotórica que possui valor próximo de zero. Já a corrente do estator é bem elevada nestas condições pois ela deve fornecer a maior parte do campo magnético líquido. O campo magnético líquido B_{liq} é produzido pela corrente de magnetização I_M que flui no ramo da reatância de magnetização do circuito equivalente do motor de indução apresentado na figura 31. Em situações reais, mesmo com variações de carga, as quedas de tensão no estator são pequenas e conseqüentemente a tensão interna primária do estator E_1 , o B_{liq} e I_M são constantes frente estas variações (CHAPMAN, 2013). A disposição dos campos magnéticos do estator e do rotor do motor de indução a vazio estão ilustrados na figura 32.

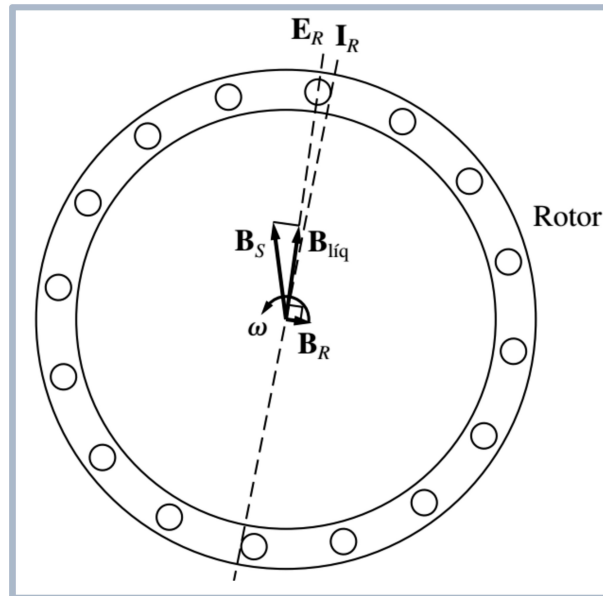
O campo magnético do rotor a vazio é pequeno assim como o torque eletromagnético, na qual é desenvolvido apenas para suprir as perdas rotacionais do motor, garantindo seu o movimento rotacional de seu eixo.

Figura 31 – Circuito equivalente do MIT com destaque do ramo da corrente de magnetização



Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 321)

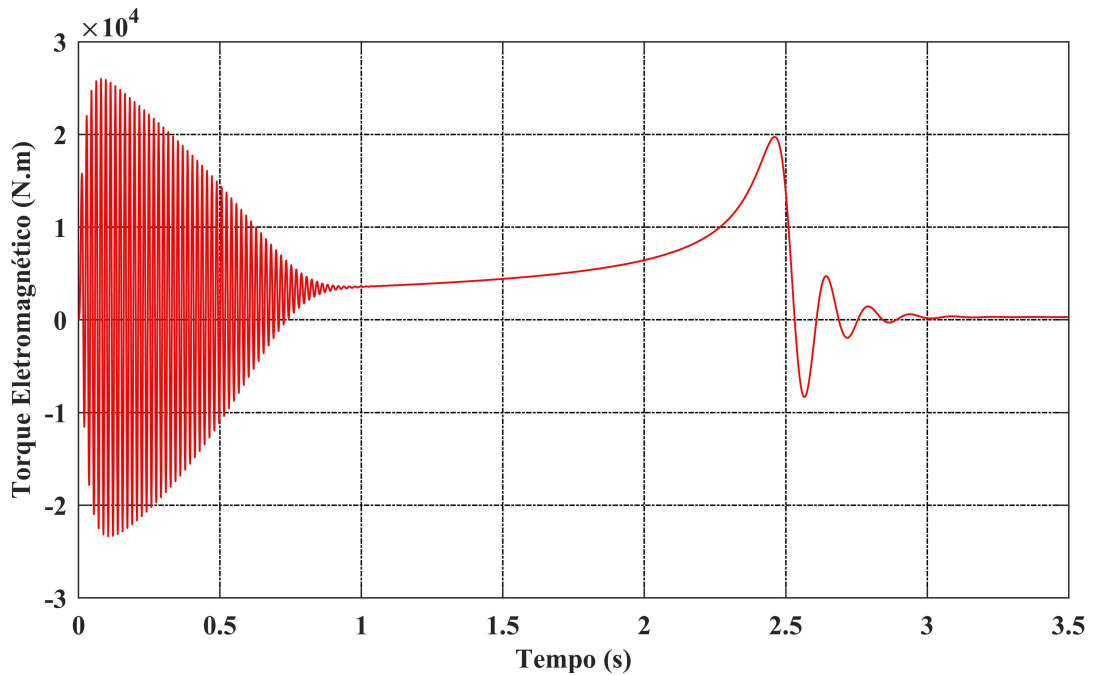
Figura 32 – Campos magnéticos do MIT sob a condição a vazio



Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 322)

Na figura 33 é possível observar o comportamento do torque eletromagnético do motor operando a vazio desde seu regime transitório até sua estabilização, que ocorre após três segundos de simulação.

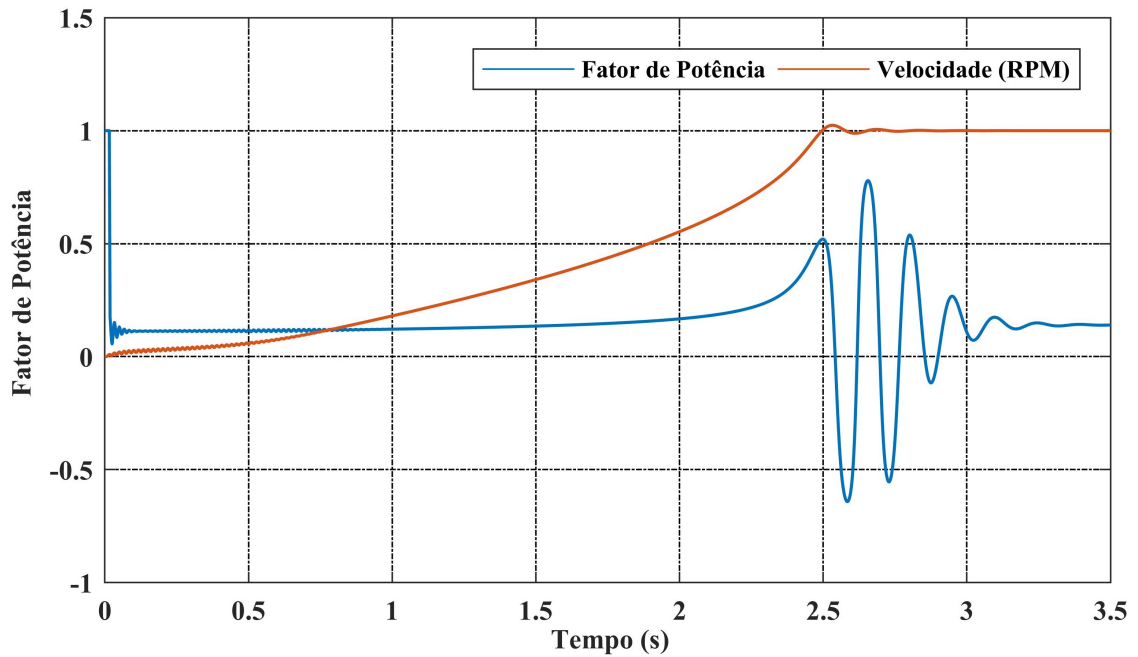
Figura 33 – Torque eletromagnético produzido pelo MIT de indução sem torque de carga aplicado



Fonte: Próprio autor

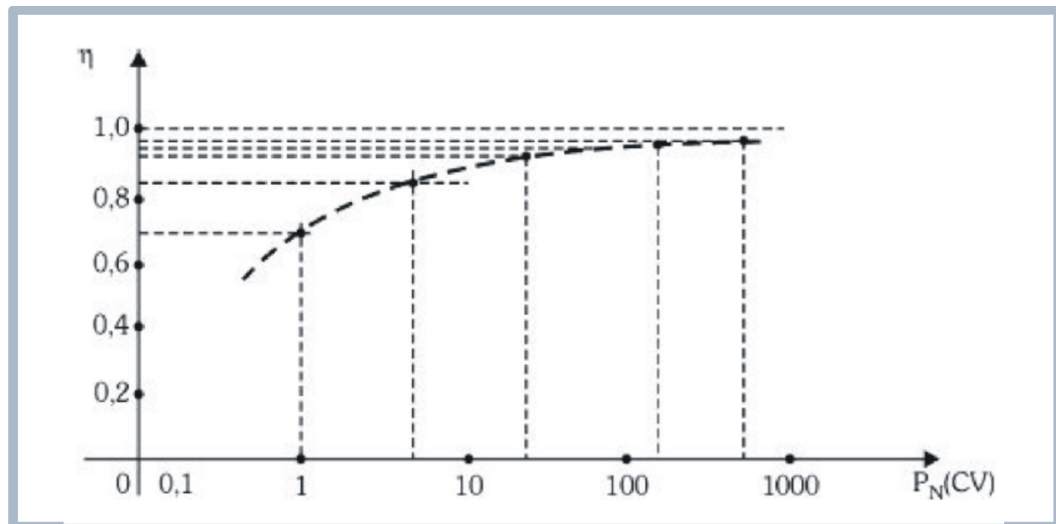
A figura 34 apresenta a curva referente ao fator de potência do motor de indução, bem como sua curva de velocidade. O objetivo foi traçar o comportamento do fator de potência frente a livre aceleração da máquina para valores próximos da velocidade síncrona na condição a vazio. O baixo fator de potência do motor de indução operando em vazio, se justifica pelo fato do rotor possuir baixo escorregamento, na qual as correntes do rotor possuem baixas magnitudes e conseqüentemente baixas perdas em seu circuito. Nesta condição, as perdas existentes são pertencentes ao estator (enrolamentos e núcleo de ferro). Conforme descrito em Franchi (2008), o motor de indução tem seu rendimento comprometido a medida em que potência nominal do motor diminui e as perdas aumentam. A figura 35 esboça este comportamento

Figura 34 – Fator de potência do MIT sem torque de carga aplicado



Fonte: Próprio autor

Figura 35 – Rendimento do motor em função da sua potência nominal



Fonte: Adaptado de Franchi (2008, p. 57)

Após simular o motor de indução trifásico sem carga acoplada ao seu eixo, foram realizadas novas simulações, nas quais os mesmos parâmetros observados anteriormente foram analisados, porém, foi aplicado ao eixo do motor um torque de carga. Inicialmente o motor foi acionado sem carga e no tempo de quatro segundos o torque de carga foi aplicado. O torque de carga aplicado ao eixo do motor neste trabalho foi calculado de acordo com a equação 7.1

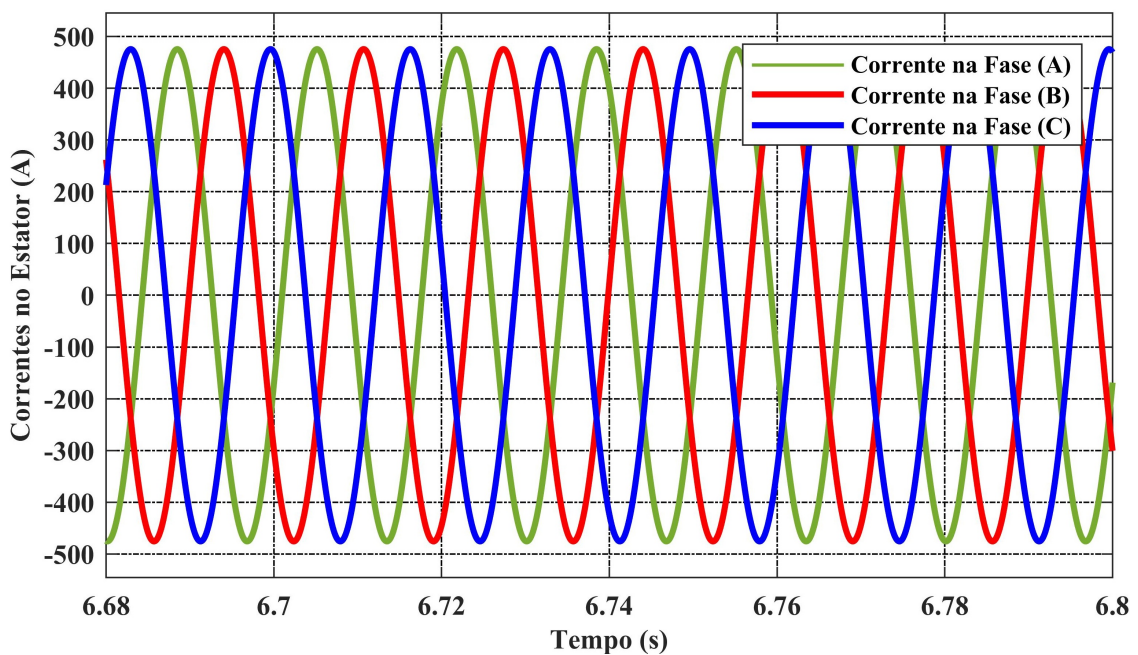
descrita em (CHAPMAN, 2013).

$$\tau_{carga} = \frac{P_{out}}{\omega_m} [N.m] \quad (7.1)$$

- P_{out} representa a potência de saída do motor de indução em watts;
- ω_m representa velocidade mecânica do eixo do motor em rad/s.

Com a inserção do torque de carga ao eixo do motor, foi percebido que o conjunto de tensões aplicadas ao estator não alteram seu valor e seu defasamento angular se manteve inalterado. Na sequência foram observadas e plotadas as correntes nas fases A,B e C. Por meio da figura 36 é possível perceber o aumento da magnitude das correntes estatóricas após a aplicação do torque de carga.

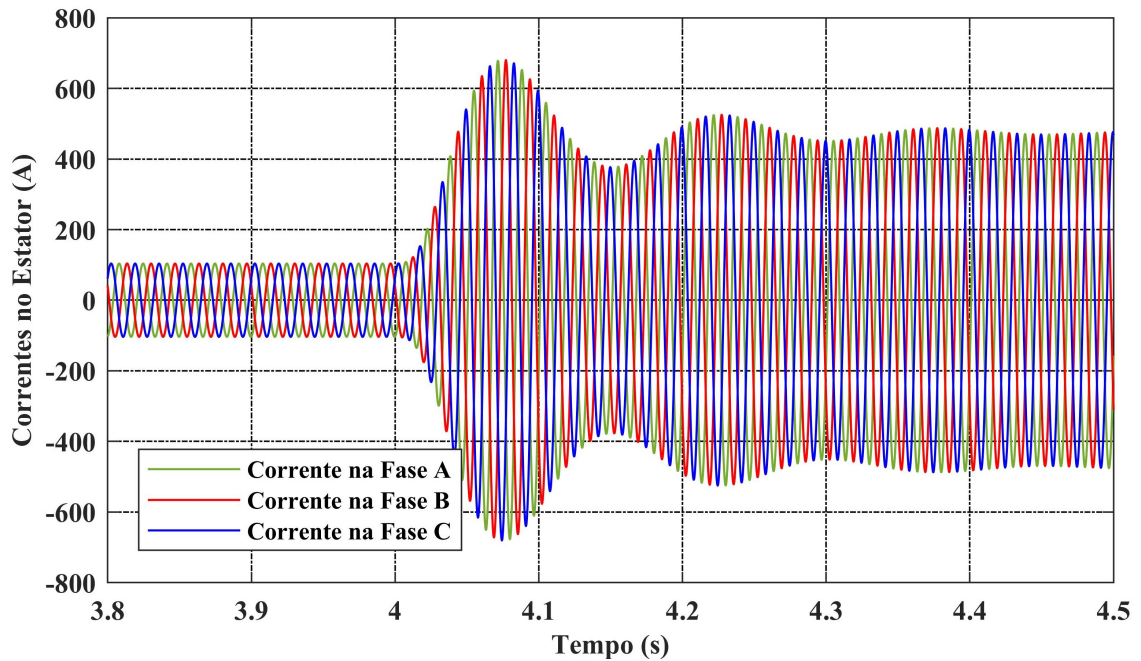
Figura 36 – Correntes no estator do MIT nas Fases ABC com torque de carga aplicado



Fonte: Próprio autor

Com a finalidade de observar o comportamento dinâmico do motor de indução trifásico em estudo, foram plotadas as reações das correntes nas fases A,B e C do estator no momento da aplicação do torque de carga. A figura 37 retrata as oscilações e o aumento da magnitude das correntes estatóricas mediante a aplicação do torque de carga.

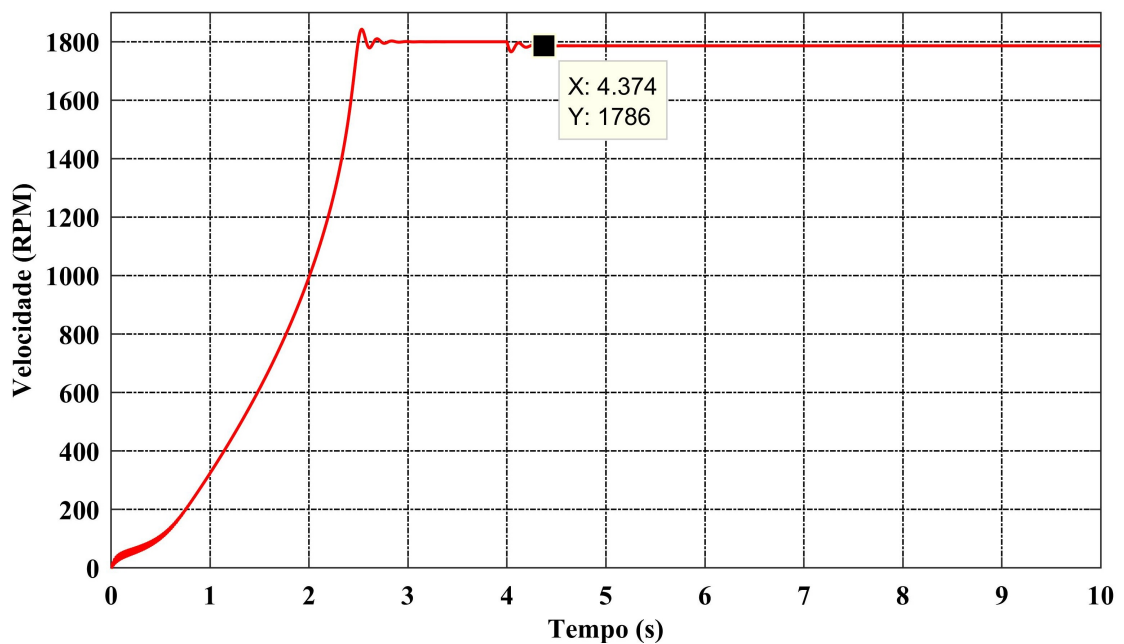
Figura 37 – Correntes no estator do MIT nas Fases ABC durante aplicação do torque de carga



Fonte: Próprio autor

O comportamento da velocidade do motor de indução em estudo, operando a vazio e com torque de carga em seu eixo pode ser examinado por meio da figura 38. É perceptível a oscilação da velocidade no instante da aplicação do torque (4 segundos).

Figura 38 – Velocidade do MIT com torque de carga aplicado

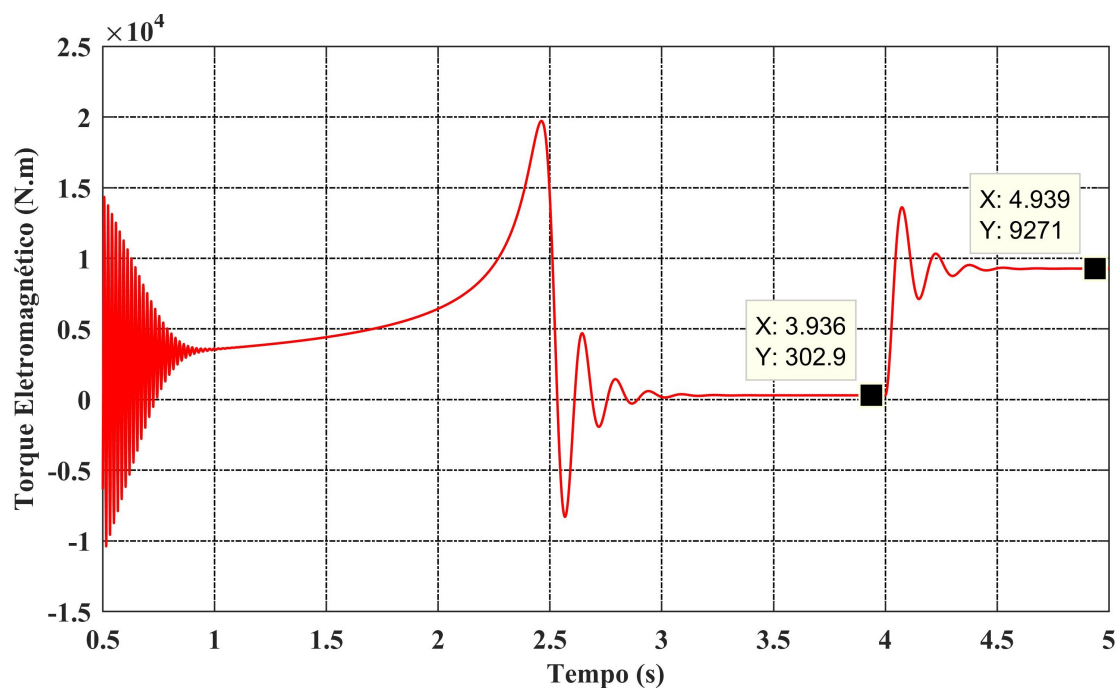


Fonte: Próprio autor

Na figura 39 é possível observar o comportamento do torque eletromagnético do motor

operando a vazio em seu regime transitório, no instante da aplicação do torque de carga e até sua estabilização, que ocorre próximo ao cinco segundos de simulação. Diferentemente da primeira simulação, na qual o motor em estudo operava a vazio, o toque eletromagnético após ser inserido o torque de carga, passa a suprir as perdas rotacionais, bem como a demanda de carga aplicada. Desde modo, se torna notório, o aumento do torque eletromagnético produzido pelo motor diante da inserção de carga ao seu eixo.

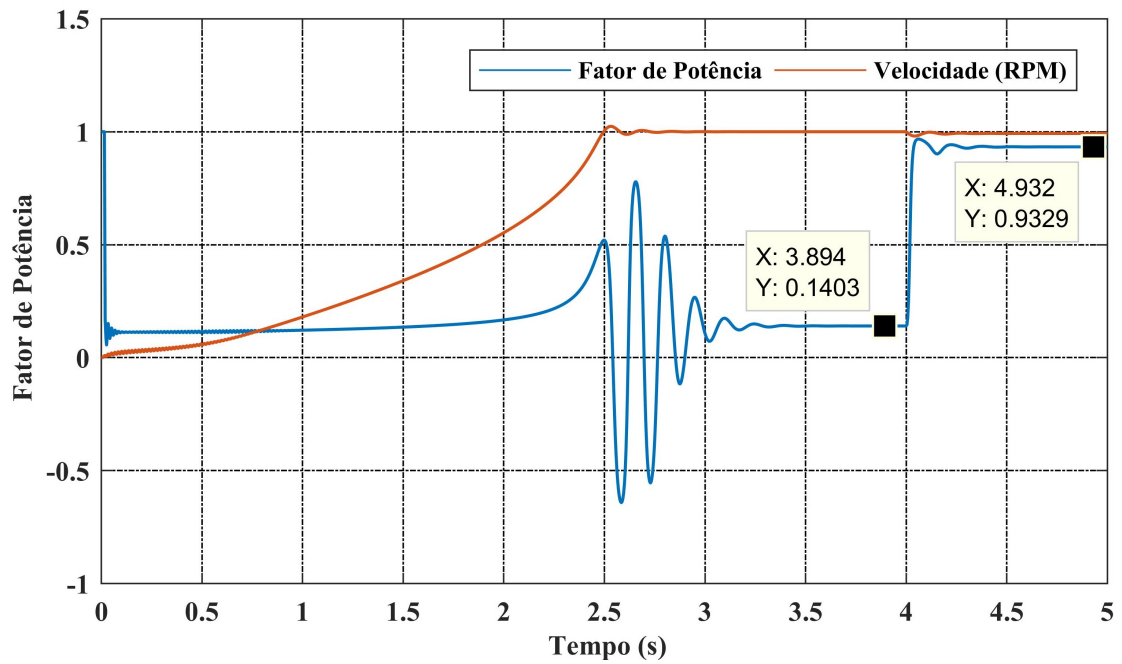
Figura 39 – Torque eletromagnético produzido pelo MIT de indução com torque de carga aplicado



Fonte: Próprio autor

Já a figura 40 retrata a curva referente ao fator de potência do motor de indução, bem como sua curva de velocidade, diante da aplicação do torque de carga após quatro segundos de simulação. É perceptível que após a inserção do torque de carga, o escorregamento do motor aumenta, assim como o fator de potência, melhorando o seu rendimento.

Figura 40 – Fator de potência do MIT com torque de carga aplicado



Fonte: Próprio autor

Desse modo, após todas as simulações serem realizadas com o motor de indução trifásico, as reações dinâmicas do motor frente as situações de operação se tornam mais compreensíveis.

8 DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTOR DE INDUÇÃO POR MEIO DE DIAGRAMAS FASORIAIS

Neste capítulo será apresentado o sistema de detecção de falhas em motores de indução a partir da observação de diagramas fasoriais das tensões e correntes de linha do estator, assim como a análise da velocidade final do motor. Por meio dos diagramas fasoriais e gráficos, serão analisados os comportamentos destas grandezas mediante a inserção de falhas estatóricas, rotóricas e de rolamentos.

8.1 SISTEMA PROPOSTO

Conforme descrito em (PINHEIRO, 2011), a utilização de diagramas fasoriais dos sinais das tensões e correntes do estator, bem como a plotagem de gráficos da velocidade para detectar falhas em motores de indução, se justifica pelo fato de que estas grandezas mencionadas são adquiridas através de métodos não invasivos. As avarias incididas sobre os motores de indução produzem perturbações em seus sinais elétricos, nas quais se tornam mais visíveis a interpretação das falhas ocorridas, mediante o perfil da falha esboçado em diagramas fasoriais e em gráficos. As falhas inseridas nas simulações computacionais do motor de indução trifásico em estudo neste trabalho, serão as seguintes:

- Falha Estatórica: Curto-circuito nas espiras;
- Falha Rotórica: Barras quebradas;
- Falha Mecânica: Defeito no rolamento (aumento do coeficiente de fricção do motor).

Vale ressaltar que o curto-circuito nas espiras mencionado acima, não leva em consideração se a ocorrência desta falha se localiza entre espiras de uma mesma bobina ou espiras de bobinas diferentes. A consideração acerca deste tipo de falha está explicitada no capítulo 6. As mesmas considerações se aplicam para falhas rotóricas e de rolamentos. As falhas utilizadas neste trabalho apenas consideram as influências que estas causam sobre os parâmetros construtivos do motor.

8.1.1 Diagramas Fasoriais

Segundo Alexander e Sadiku (2008 apud PINHEIRO, 2011), os sinais de tensão e corrente no domínio do tempo podem ser representados por meio fasores, uma vez que estes são expressos por funções senoidais. Para tal representação, é fundamental expressar tais funções na forma de cosseno e posteriormente extrair seu respectivos ângulos. A equação 8.1 retrata

essa transformação fasorial mencionada. Vale ressaltar que a análise dos fasores plotados nos diagramas se aplica somente quando a frequência dos sinais monitorados são equivalentes.

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi) \Leftrightarrow V = V_m \angle \phi \quad (8.1)$$

8.1.2 Procedimentos de simulação e inserção de falhas no motor de indução

O motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, cujo seus respectivos parâmetros elétricos e mecânicos apresentados na tabela 5 foi simulado por um tempo de dez segundos e teve o torque de carga aplicado ao seu eixo a partir de 4 segundos de simulação. Esta condição de operação, será adotada para todas as análises das falhas neste sistema proposto. Após seis segundos de operação do motor de indução trifásico, as falhas de curto-circuito, barras quebradas e de rolamentos serão aplicadas computacionalmente e ao final do tempo de simulação terão seus efeitos representados por meio de diagramas fasoriais e gráficos. As grandezas analisadas são as seguintes:

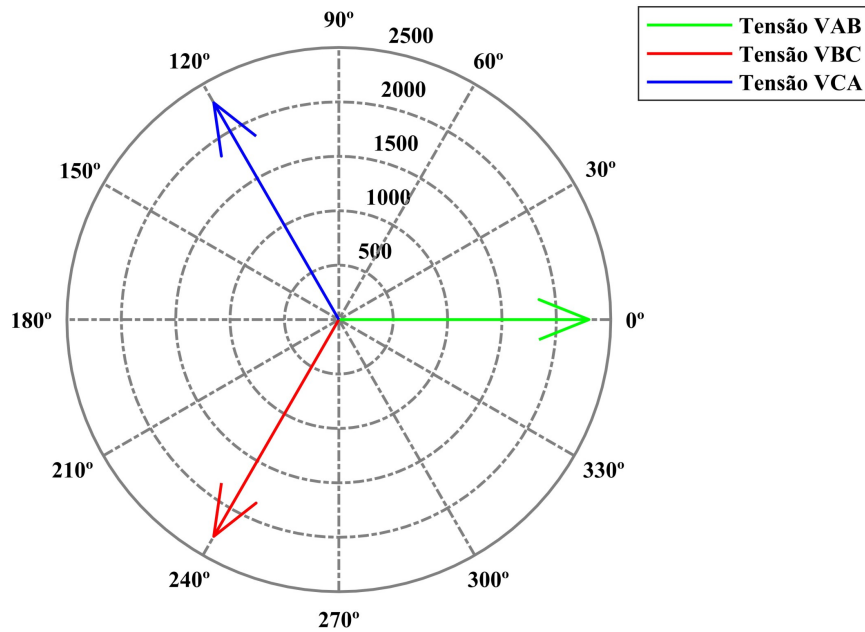
- Módulo das tensões de linha do estator (Diagrama Fasorial);
- Módulo das corrente de linha do estator (Diagrama Fasorial);
- Defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente (Diagrama Fasorial);
- Velocidade na ponta do eixo do motor (Gráfico).

Os procedimentos adotados para inserção de falhas no motor de indução serão descritos e apresentados juntamente com seus respectivos efeitos ilustrados nos fasores e gráficos para cada falha separadamente nas seções a seguir.

8.2 DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO SEM FALHAS

Inicialmente, o motor de indução trifásico foi simulado com seu parâmetros estatóricos, rotóricos e mecânicos nominais, ou seja, sem falhas. Os fasores das tensões de linha foram plotados conforme mostra a figura 41. Estes fasores estão defasados entre si 120° elétricos, mantendo a sequência positiva de fases ABC.

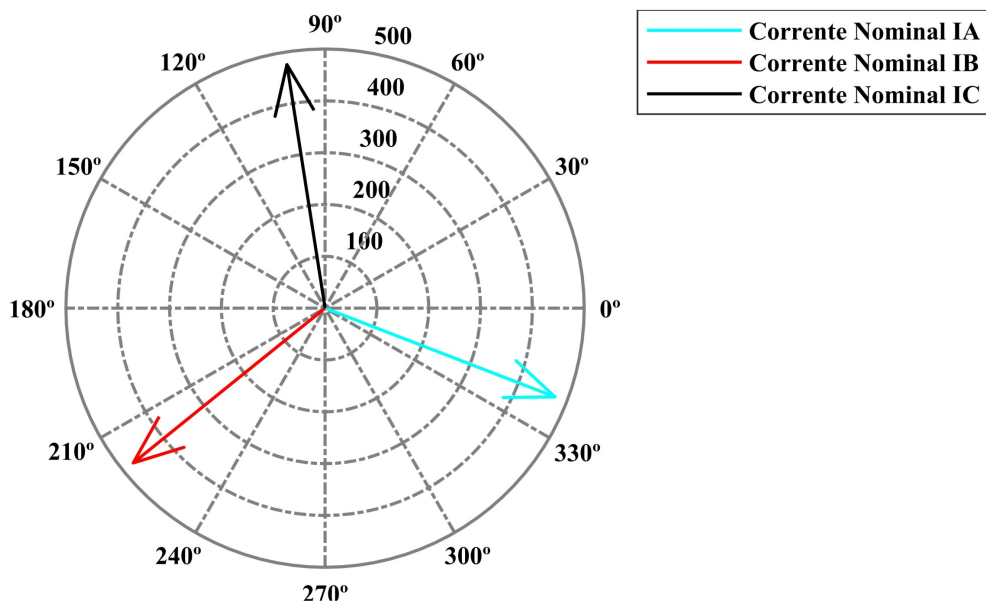
Figura 41 – Diagrama fasorial das tensões de linha do MIT simétrico



Fonte: Próprio autor

Posteriormente foi esboçado o diagrama fasorial das correntes de linha do estator do motor de indução, na qual estão defasadas entre si 120° elétricos, mantendo a sequência positiva de fases ABC conforme mostrado na figura 42.

Figura 42 – Diagrama fasorial das correntes de linha do estator do MIT simétrico

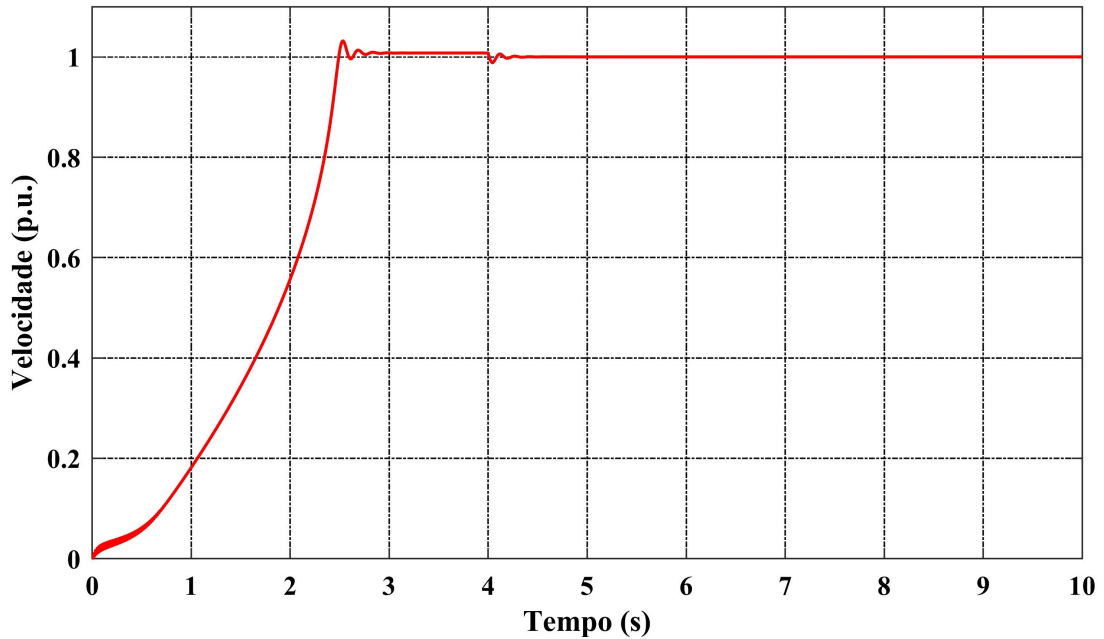


Fonte: Próprio autor

A terceira plotagem foi do gráfico da velocidade nominal do motor em condições saudáveis de operação, mostrado na figura 43. As velocidades foram representadas no sistema

P.U. para uma melhor visualização de seu comportamento diante das falhas.

Figura 43 – Velocidade do MIT nominal sem falhas



Fonte: Próprio autor

Na tabela 6 estão apresentados o valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha do estator, bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor em condições normais de operação.

Tabela 6 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT simétrico

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
475,593	475,568	475,587
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-21,104	-141,103	98,899
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
21,103		
Velocidade (RPM)		
1786,001		

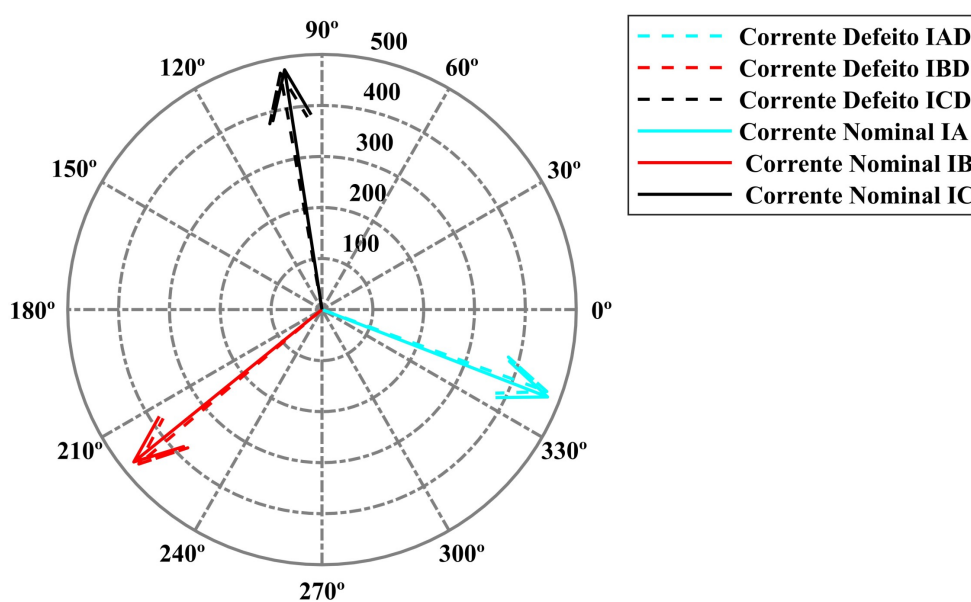
Fonte: Próprio autor

8.3 DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO MEDIANTE FALHAS ESTATORÍCAS

Para simular as falhas no estator do motor de indução ocasionadas por curto-circuito nas espiras, o motor foi simulado com inúmeros valores reduzidos de resistência e reatância estatórica em relação ao seus valores nominais, conforme proposto em Pinheiro (2011). Diante do exposto, se faz necessário enfatizar que os valores decrescidos da impedância estatórica foram escolhidos empiricamente e não consideram os limites térmicos e mecânicos dos materiais inerentes a construção do motor. As reduções da impedância estatórica que acarretaram nos menores efeitos sobre as grandezas analisadas nos diagramas fasoriais e no gráfico de velocidade do motor de indução ocorreram quando a impedância nominal do estator foi reduzida em 30%. Ao passo que a redução de impedância estatórica que promoveu maior efeito sobre as grandezas analisadas ocorreram em torno de 99,99%. Vale ressaltar que os fasores das tensões de linha do estator não apresentaram modificações em relação ao seus valores nominais, frente as falhas inseridas.

As correntes de linha do estator do motor de indução mantiveram sua sequência de fases positiva ABC e permaneceram defasadas entre si 120° elétricos com a redução de 30% da impedância estatórica. Entretanto, as correntes sofreram uma pequena redução em seus módulos e a defasagem angular entre o fasores de tensão e corrente diminuíram conforme ilustrado na figura 44.

Figura 44 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com decremento de 30% do valor da impedância estatórica

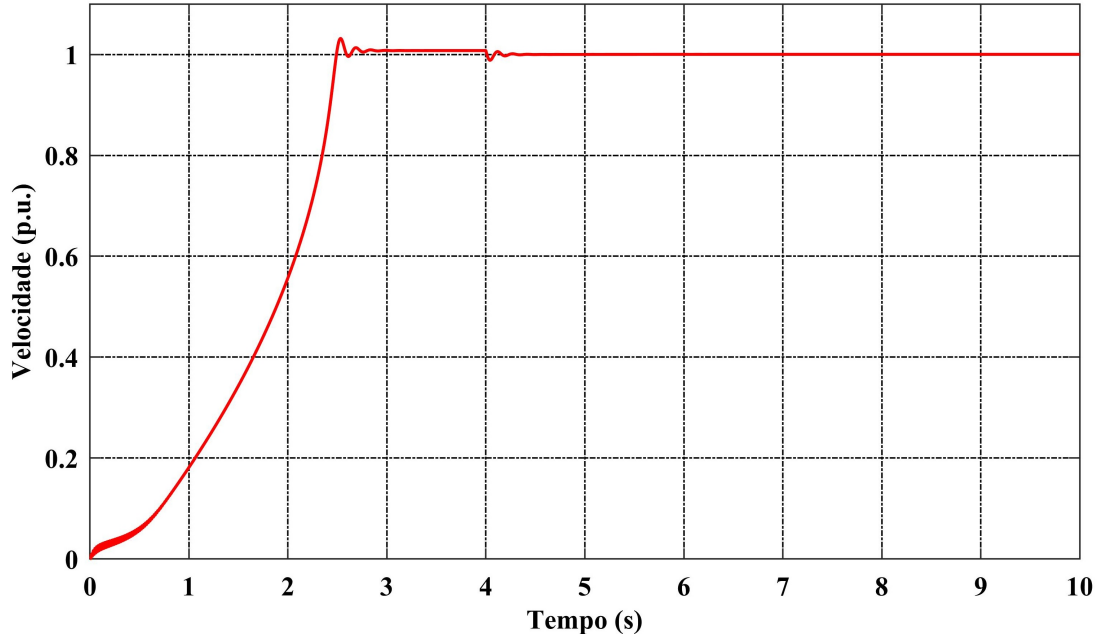


Fonte: Próprio autor

A figura 45, esboça a reação da velocidade do motor frente a redução de 30% do valor

da impedância estatórica. A velocidade nesta condição de defeito, apresentou um ligeiro e pouco expressivo aumento em seu valor quando comparado ao valor da velocidade nominal.

Figura 45 – Velocidade do MIT com decremento de 30% do valor da impedância estatórica



Fonte: Próprio autor

Na tabela 7, estão apresentados o valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha do estator, bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor nas condições de curto-circuito nas espiras do estator ocasionadas pela redução de 30% do valor da impedância estatórica.

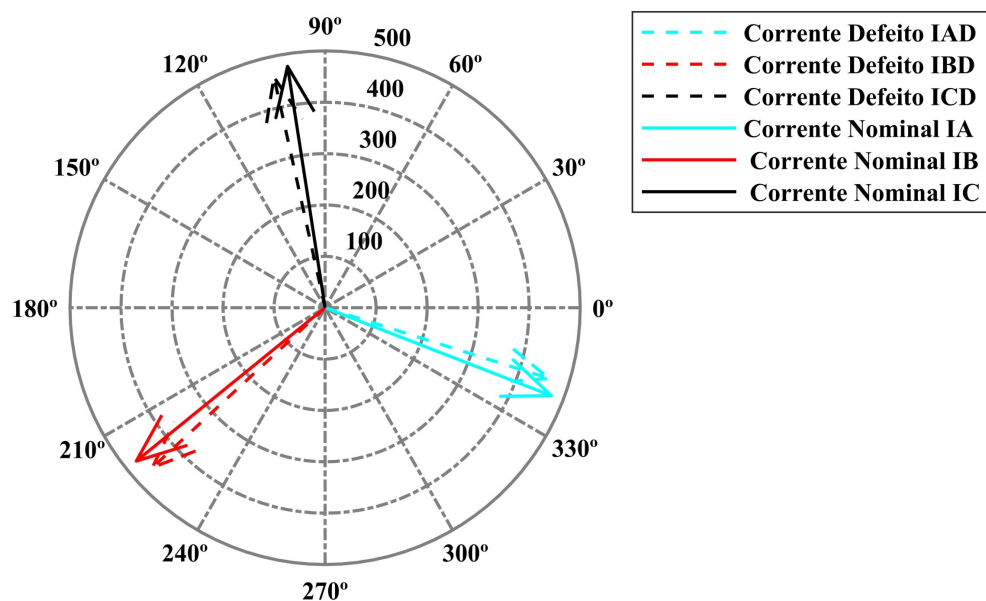
Tabela 7 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com decremento de 30% do valor da impedância estatórica

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
470,408	470,383	470,402
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-19,964	-139,963	100,039
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
19,963		
Velocidade (RPM)		
1786,339		

Fonte: Próprio autor

As correntes de linha do estator do motor de indução mantiveram sua sequência de fases positiva ABC e permaneceram defasadas entre si 120° elétricos com a redução de 99,99% da impedância estatórica. Entretanto, as correntes sofreram uma redução em seus módulos e a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente diminuíram conforme ilustrado na figura 46.

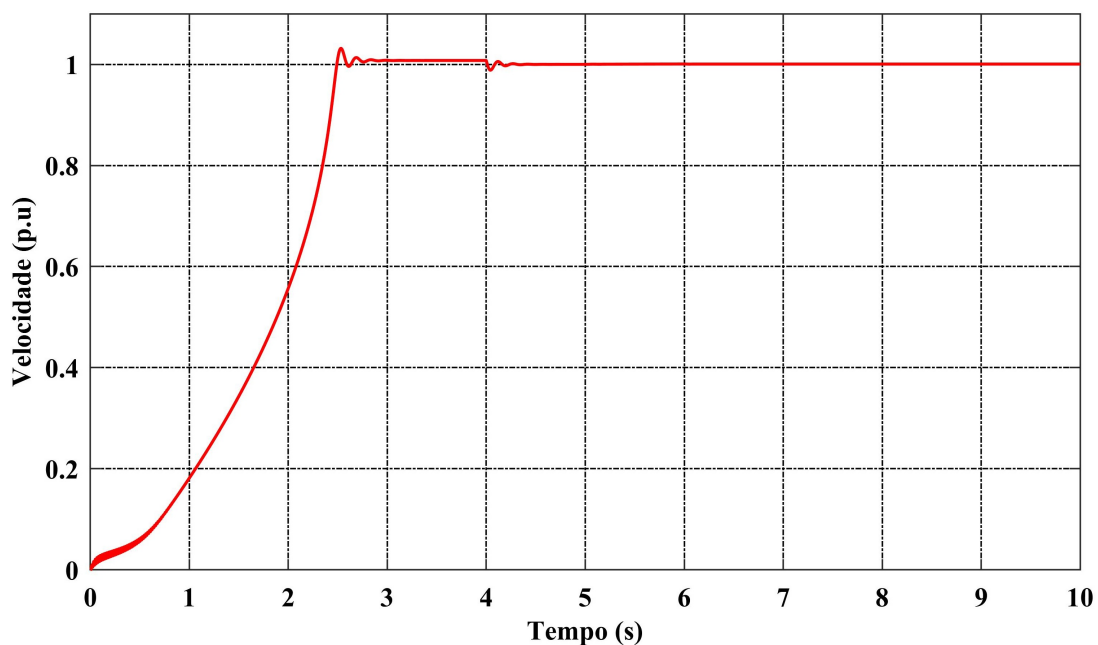
Figura 46 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com decremento de 99,99% do valor da impedância estatórica



Fonte: Próprio autor

Já na figura 47, é ilustrado a reação da velocidade do motor frente a redução de 99,99% do valor da impedância estatórica. A velocidade nesta condição de defeito, também apresentou um aumento em seu valor.

Figura 47 – Velocidade do MIT com decremento de 99,99% do valor da impedância estatórica



Fonte: Próprio autor

Na tabela 8 estão apresentados o valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha, bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor nas condições de curto-circuito nas espiras do estator ocasionadas pela redução de 99,99% do valor da impedância estatórica.

Tabela 8 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com decremento de 99,99% do valor da impedância estatórica

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
459,844	459,820	459,841
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-17,417	-137,416	102,586
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
17,416		
Velocidade (RPM)		
1787,021		

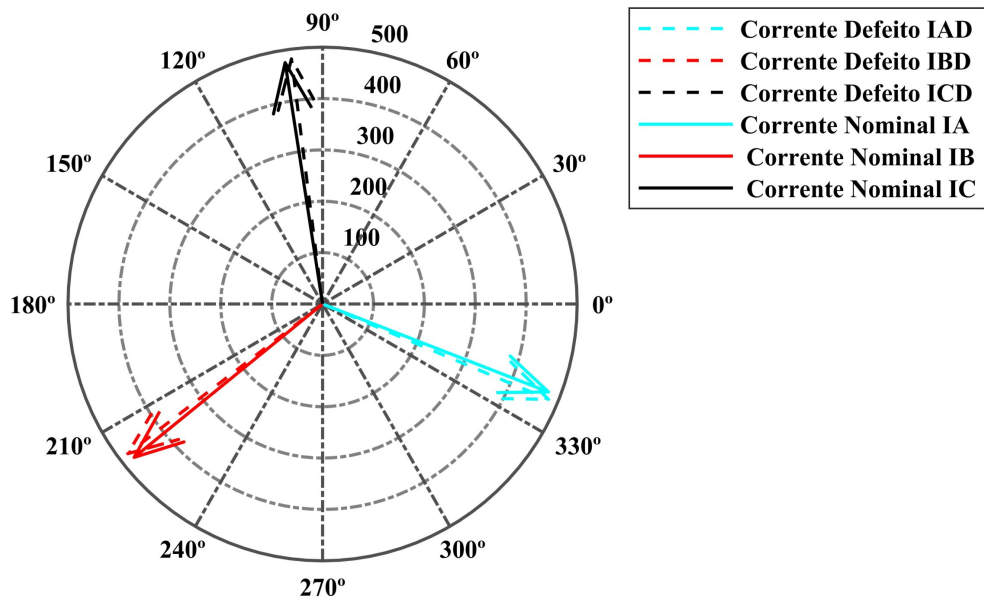
Fonte: Próprio autor

8.4 DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO MEDIANTE FALHAS ROTÓRICAS

Para simular as falhas no rotor do motor de indução ocasionadas por barras quebradas, o motor foi simulado com inúmeros valores acrescidos de resistência e reatância rotórica em relação aos valores nominais, conforme proposto em Pinheiro (2011). Vale ressaltar que os valores acrescidos da impedância rotórica, foram escolhidos empiricamente e não consideram os limites térmicos e mecânicos dos materiais inerentes à construção do motor. Os incrementos de impedância rotórica que acarretaram nos menores efeitos sobre as grandezas analisadas nos diagramas fasoriais e no gráfico de velocidade do motor de indução, ocorreram quando a impedância nominal do rotor foi aumentada em 40%. Ao passo que o incremento de impedância rotórica que promoveu maior efeito sobre as grandezas analisadas ocorreram em torno de 400%. Vale ressaltar que os fasores das tensões de linha do estator, não apresentaram modificações em relação aos seus valores nominais, frente às assimetrias inseridas junto ao rotor do motor.

As correntes de linha do estator do motor de indução mantiveram sua sequência de fases positiva ABC e permaneceram defasadas entre si 120° elétricos com o aumento de 40% da impedância rotórica. Entretanto, as correntes sofreram um aumento em seus módulos e a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente aumentaram, conforme ilustrado na figura 48.

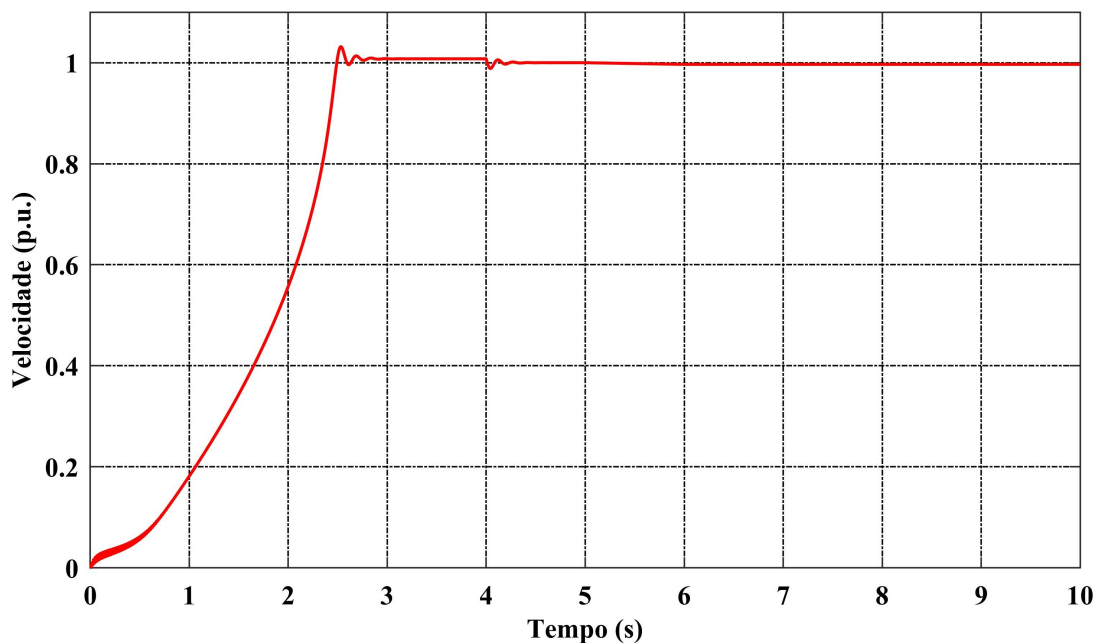
Figura 48 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 40% do valor de impedância rotórica



Fonte: Próprio autor

A figura 49, exibe a reação da velocidade do motor frente ao aumento de 40% do valor da impedância rotórica. A velocidade nesta condição de defeito, apresentou redução em torno de seu valor nominal.

Figura 49 – Velocidade do MIT com incremento de 40% do valor de impedância rotórica



Fonte: Próprio autor

A tabela 9, apresenta os valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha,

bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor para condição de barras quebradas no rotor provenientes do aumento de 40% do valor da impedância rotórica.

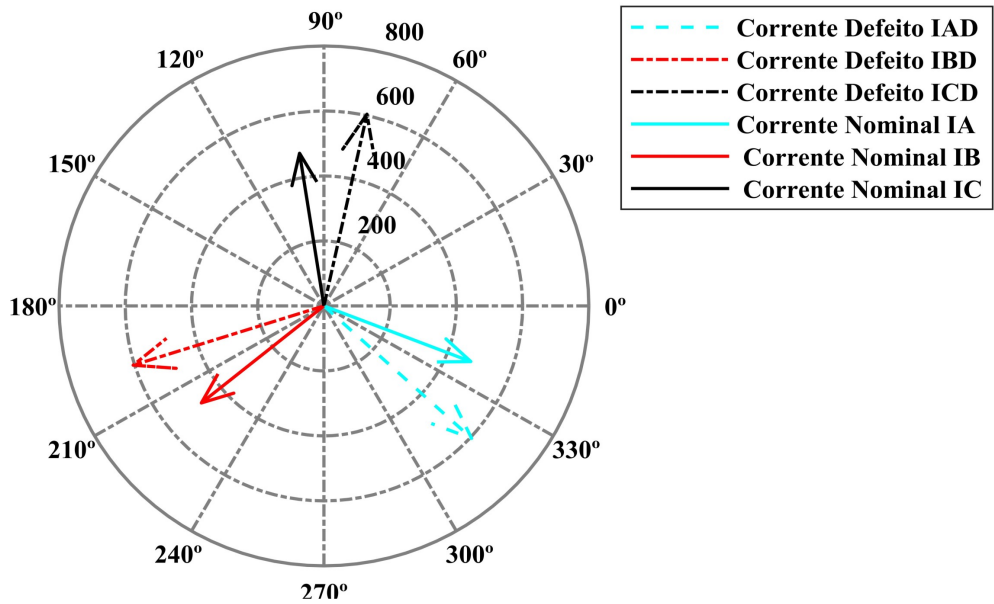
Tabela 9 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 40% do valor de impedância rotórica

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
481,033	481,007	481,025
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-22,703	-142,702	97,300
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
22,702		
Velocidade (RPM)		
1780,093		

Fonte: Próprio autor

As correntes de linha do estator do motor de indução mantiveram sua sequência de fases positiva ABC e permaneceram defasadas entre si 120° elétricos com o aumento de 400% da impedância rotórica. Entretanto, as correntes sofreram um aumento relevante em seus módulos e a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente aumentaram conforme ilustrado na figura 50.

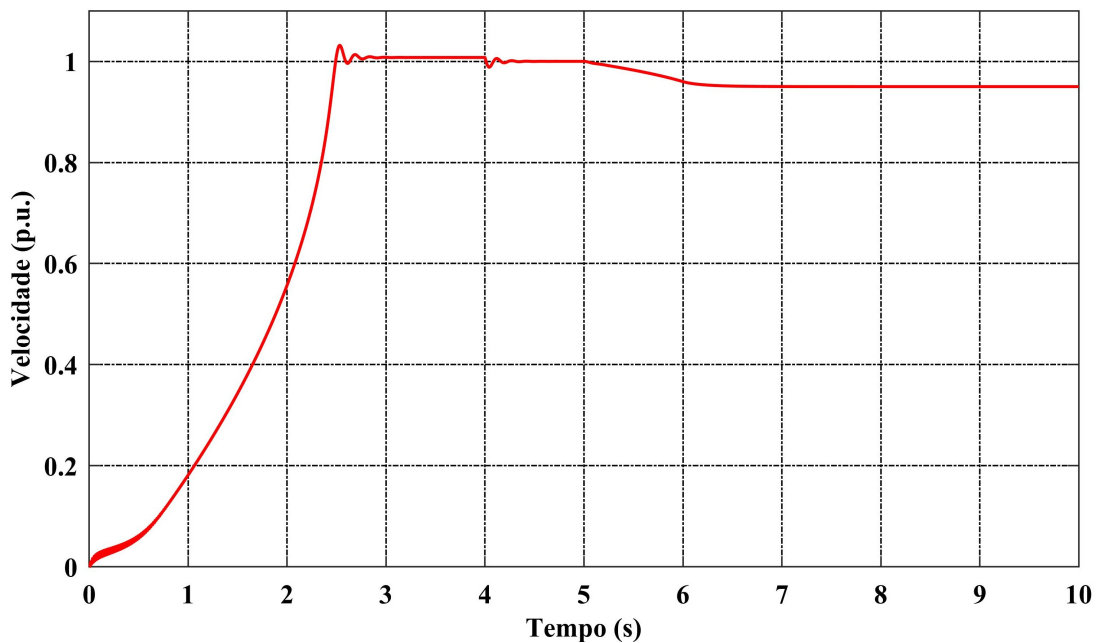
Figura 50 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 400% do valor de impedância rotórica



Fonte: Próprio autor

A figura 51, exibe a reação da velocidade do motor frente ao aumento de 400% do valor da impedância rotórica. A velocidade nesta condição de defeito apresentou uma redução expressiva em torno de seu valor nominal.

Figura 51 – Velocidade do MIT com incremento de 400% do valor de impedância rotórica



Fonte: Próprio autor

A tabela 10, apresenta os valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha,

bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor para condição de barras quebradas no rotor provenientes do aumento de 400% do valor da impedância rotórica.

Tabela 10 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 400% do valor de impedância rotórica

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
604,267	604,236	604,239
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-42,426	-162,428	77,576
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
42,426		
Velocidade (RPM)		
1696,839		

Fonte: Próprio autor

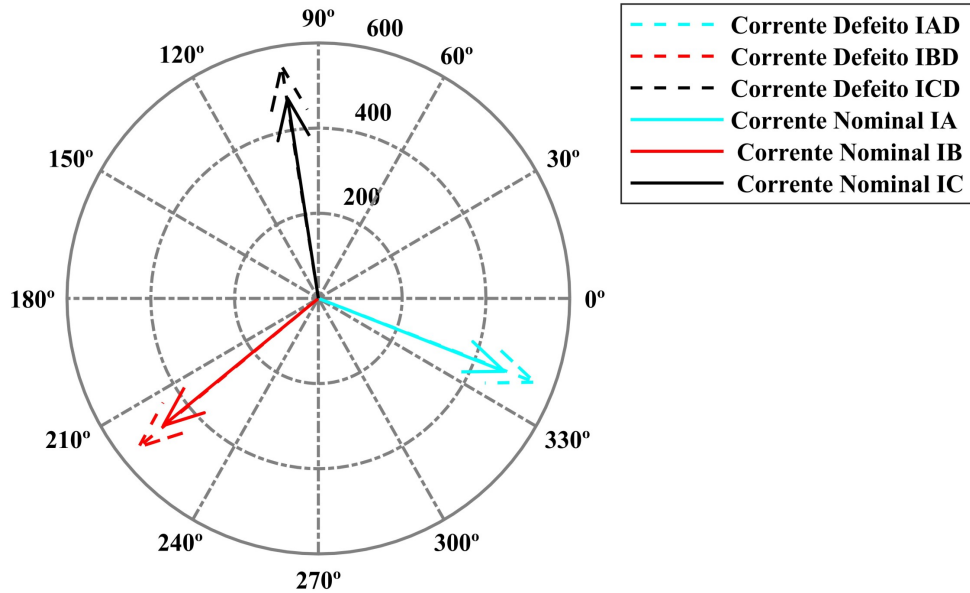
8.5 DIAGRAMAS FASORIAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO MEDIANTE FALHAS NOS ROLAMENTOS

Para simular as falhas nos rolamentos do motor de indução ocasionadas pelo aumento do coeficiente de fricção, o motor foi simulado com inúmeros valores acrescidos desde coeficiente em relação ao valores nominais, conforme proposto em Pinheiro (2011). Vale ressaltar que os valores acrescidos do coeficiente de atrito foram escolhidos empiricamente e não consideram os limites térmicos e mecânicos dos materiais inerentes a construção do motor. Os incrementos do coeficiente de atrito que acarretaram nos menores efeitos sobre as grandezas analisadas nos diagramas fasoriais e no gráfico de velocidade do motor de indução, ocorreram quando este foi aumentado em 35%. O incremento do fator de fricção que promoveu um efeito intermediário sobre as grandezas analisadas ocorreram em torno de 500% e aqueles que promoveram efeitos expressivos ocorreram com o aumento de 2000%. Da mesmo modo observado nas outras falhas, os fasores das tensões de linha do estator não apresentaram modificações em relação ao seus valores nominais, frente aos defeitos inseridos nos rolamentos do motor.

As correntes de linha do estator do motor de indução mantiveram sua sequência de fases positiva ABC e permaneceram defasadas entre si 120° elétricos com o aumento de 35% do coeficiente de fricção. Entretanto, as correntes sofreram uma elevação em seus módulos e a

defasagem angular entre o fasores de tensão e corrente apresentaram uma ligeira diminuição conforme ilustrado na figura 52.

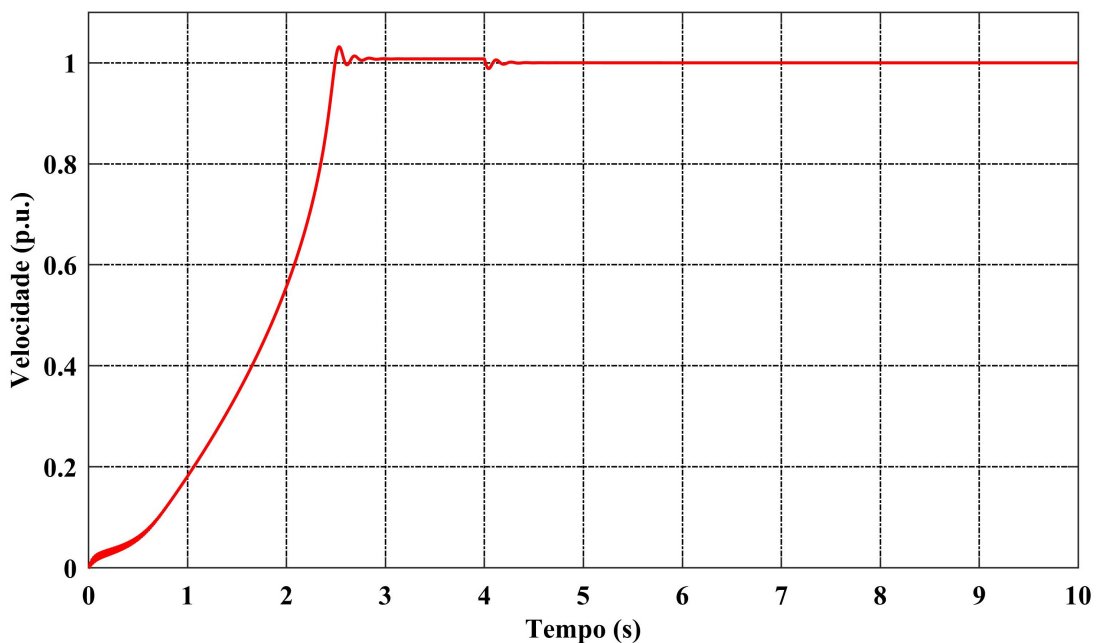
Figura 52 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 35% do valor do coeficiente de atrito



Fonte: Próprio autor

A figura 53, exibe a reação da velocidade do motor frente ao aumento de 35% do valor do coeficiente de fricção. A velocidade nesta condição de defeito apresentou uma pequena redução em torno de seu valor nominal.

Figura 53 – Velocidade do MIT com incremento de 35% do valor do valor do coeficiente de atrito



Fonte: Próprio autor

A tabela 11 apresenta os valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha, bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor para condição de defeito nos rolamentos provenientes do aumento de 35% do valor do coeficiente de fricção.

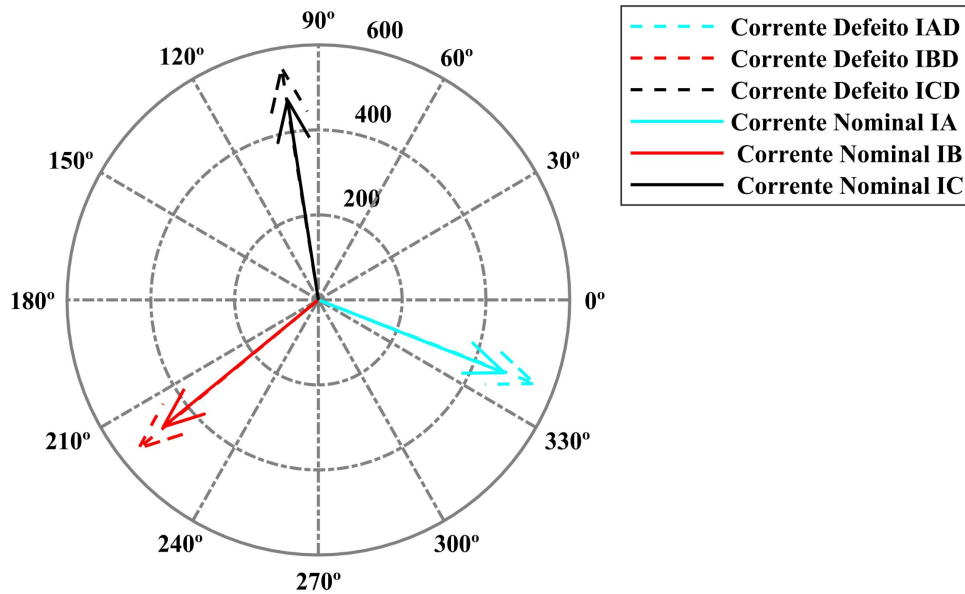
Tabela 11 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 35% do valor do coeficiente de atrito

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
480,931	480,906	480,925
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-21,069	-141,068	98,935
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
21,067		
Velocidade (RPM)		
1785,828		

Fonte: Próprio autor

As correntes de linha do estator do motor de indução mantiveram sua sequência de fases positiva ABC e permaneceram defasadas entre si 120° elétricos com o aumento de 500% do coeficiente de fricção. Entretanto, as correntes sofreram um grande incremento em seus módulos e a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente diminuíram conforme ilustrado na figura 54.

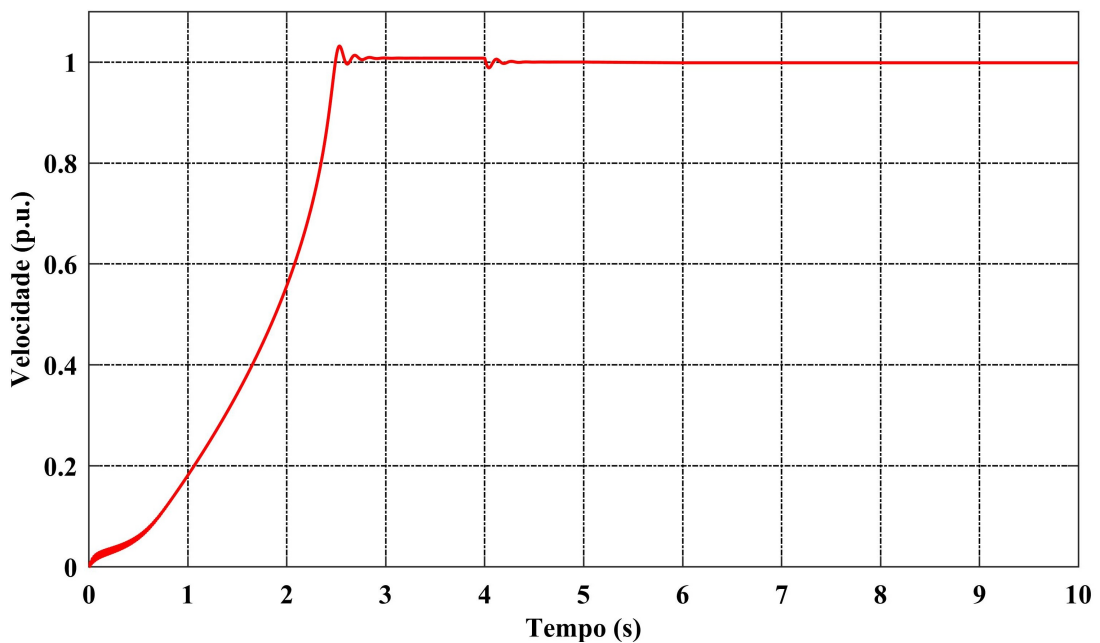
Figura 54 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 500% do valor do coeficiente de atrito



Fonte: Próprio autor

A figura 55, exibe a reação da velocidade do motor frente ao aumento de 500% do valor do coeficiente de fricção. A velocidade nesta condição de defeito, reduziu em torno de seu valor nominal.

Figura 55 – Velocidade do MIT com incremento de 500% do valor do valor do coeficiente de atrito



Fonte: Próprio autor

A tabela 12, apresenta os valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha,

bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor para condição de defeito nos rolamentos provenientes do aumento de 500% do valor do coeficiente de fricção.

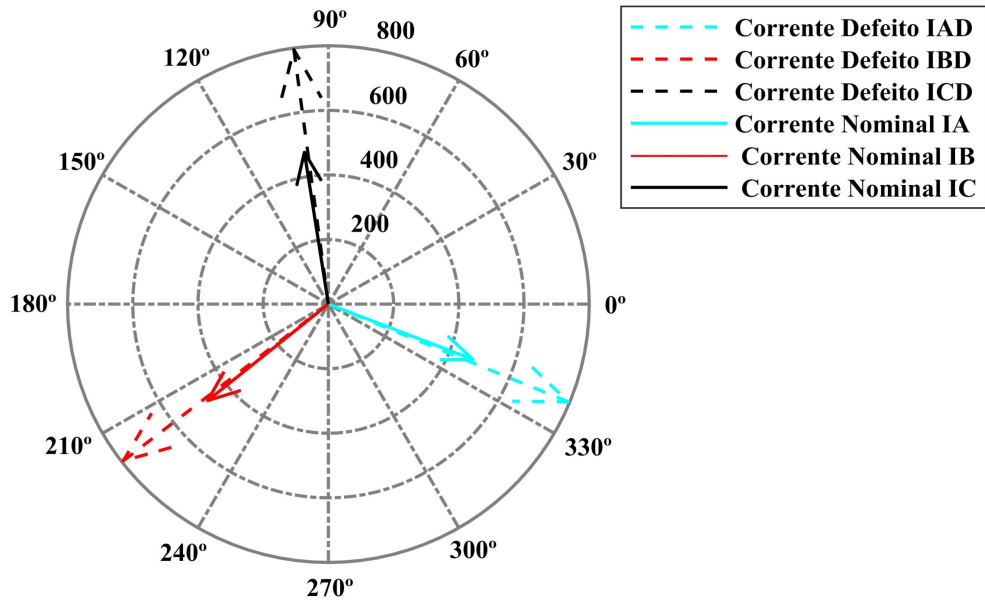
Tabela 12 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 500% do valor do coeficiente de atrito

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
552,636	552,607	552,629
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-20,858	-140,857	99,145
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
20,857		
Velocidade (RPM)		
1783,492		

Fonte: Próprio autor

As correntes de linha do estator do motor de indução mantiveram sua sequência de fases positiva ABC e permaneceram defasadas entre si 120° elétricos com o aumento de 2000% do coeficiente de fricção. Entretanto, as correntes sofreram um expressivo aumento em seus módulos e a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente, diferentemente dos casos anteriores, aumentaram conforme ilustrado na figura 56.

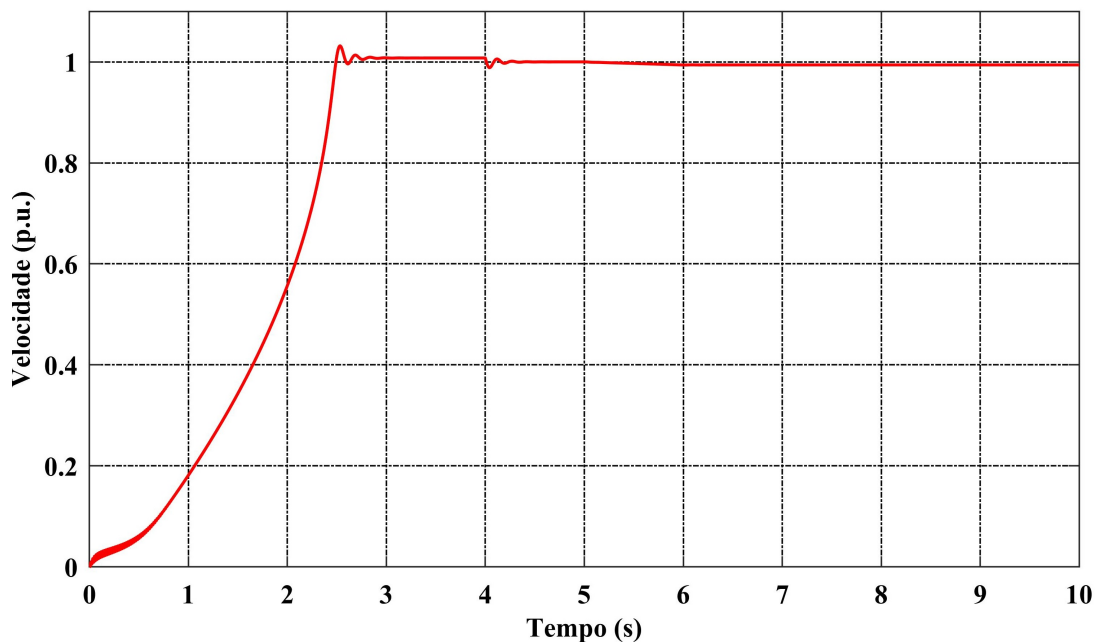
Figura 56 – Diagrama fasorial das correntes nominais de linha do estator do MIT e correntes com incremento de 2000% do valor do coeficiente de atrito



Fonte: Próprio autor

A figura 57, exibe a reação da velocidade do motor frente ao aumento de 2000% do valor do coeficiente de fricção. A velocidade nesta condição de defeito também apresentou uma redução em torno de seu valor nominal.

Figura 57 – Velocidade do MIT com incremento de 2000% do valor do valor do coeficiente de atrito



Fonte: Próprio autor

A tabela 13, apresenta os valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes de linha,

bem como a defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente e o valor da velocidade do motor para condição de defeito nos rolamentos provenientes do aumento de 2000% do valor do coeficiente de fricção.

Tabela 13 – Valores de tensões, correntes, ângulos e velocidade do MIT com incremento de 2000% do valor do coeficiente de atrito

Módulo da Tensão Nominal VAB (V)	Módulo da Tensão Nominal VBC (V)	Módulo da Tensão Nominal VCA (V)
2299,999	2299,9388	2300,0622
Ângulo da Tensão VAB (Graus)	Ângulo da Tensão VBC (Graus)	Ângulo da Tensão VCA (Graus)
-0,002	-119,999	120,001
Módulo da Corrente IA (A)	Módulo da Corrente IB (A)	Módulo da Corrente IC (A)
794,975	794,933	794,963
Ângulo da Corrente IA (Graus)	Ângulo da Corrente IB (Graus)	Ângulo da Corrente IC (Graus)
-22,353	-142,353	97,650
Defasagem Angular entre Tensão e Corrente (Graus)		
22,352		
Velocidade (RPM)		
1775,328		

Fonte: Próprio autor

Desde modo, após a inserção de falhas no motor de indução trifásico em estudo, por meio da alteração de seus parâmetros elétricos e mecânicos, é possível esboçar diagramas fasoriais e gráficos das grandezas estudadas, permitindo observar o comportamento destas mediante a falhas simuladas, uma vez que na ocorrência de avarias, os sinais elétricos extraídos do motor de indução sofrem variações em torno de seus valores nominais.

9 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas no capítulo 8, na qual foram inseridas falhas no motor de indução trifásico, cujo dados estão expostos na tabela 5. Conforme mencionado no capítulo 8, tais falhas foram emuladas por meio da alteração de valores dos parâmetros nominais do motor.

9.1 CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

Após serem realizadas todas as simulações para as falhas de curto-circuito nas espiras do estator, barras quebradas do rotor e defeitos no rolamentos do motor de indução, é observado que os fasores das tensões de linha do estator (módulos, ângulos e sequência de fases) não modificaram frente a inserção de falhas de pequenas e grandes magnitudes. O módulo da corrente estatórica para as três falhas emuladas no motor de indução foi a grandeza analisada que mais apresentou alterações em torno de seu valor nominal, seguido da defasagem angular entre a tensão e corrente. Por fim, a velocidade do motor de indução trifásico utilizado nas simulações, foi a grandeza que teve seu valor nominal menos alterado, independentemente do tipo de falha aplicada ao motor. A tabela 14 apresenta de forma resumida os comportamento das grandezas avaliadas durante a aplicação das falhas nas simulações dinâmicas do motor de indução.

Tabela 14 – Resumos do comportamento das grandezas analisadas mediante as falhas simuladas MIT

FALHAS	MÓDULO E ÂNGULO DA TENSÃO DE LINHA	DEFASAGEM ENTRE OS FASORES DE TENSÃO	SEQ. FASES	MÓDULO DA CORRENTE DE LINHA	DEFASAGEM ENTRE OS FASORES DE CORRENTE	SEQ. FASES	DEFASAGEM ANGULAR ENTRE O FASOR DE TENSÃO E CORRENTE	VELOC. DO MOTOR
Sem defeito	Nominal	120°	ABC	Nominal	120°	ABC	Nominal	Nominal
Curto-circuito nas bobinas do estator	Nominal	120°	ABC	Diminui	120°	ABC	Diminui	Aumenta
Barras quebradas do rotor	Nominal	120°	ABC	Aumenta	120°	ABC	Aumenta	Diminui
Avarias no rolamentos	Nominal	120°	ABC	Aumenta	120°	ABC	Diminui / Aumenta	Diminui

Fonte: Próprio autor

As tabelas 15, 16, 17 e 18 presentes no apêndice A apresentam os percentuais de variação da média dos módulos das correntes nas fases ABC do estator, a média da defasagem angular entre os fasores de tensão e corrente nas fases ABC, assim como a variação da velocidade na

ponta do eixo do motor em torno de seus valores nominais, para as falhas de curto-circuito nas bobinas do estator, barras quebradas do rotor e avarias no rolamento. Apresentam também os percentuais de incrementos e decrementos das impedâncias e do coeficiente de atrito, nos quais foram utilizado na simulações.

Através das tabelas contidas no apêndice A deste documento, também é possível observar quais são os comportamentos das grandezas analisadas mediante cada decremento de impedância estatórica (falha de curto-circuito), incremento de impedância rotórica (barras quebradas do rotor) e incremento do coeficiente de atrito (falhas no rolamento), para cada percentual adotado.

Os comportamentos extraídos das simulações dinâmicas do motor de indução trifásico através do esboço de diagramas fasoriais e dos gráficos das grandezas escolhidas, após a inserção falhas de curto-circuito, barras quebradas e de rolamentos, são particulares a este motor, embora comportamentos semelhantes de outros motores de indução submetidos a esta ferramenta, podem ocorrer. Contudo, os motores apresentam diferentes aspectos e parâmetros construtivos, como por exemplo, reatâncias e resistências de seu circuito equivalente se modificam de motor para motor e conseqüentemente a impedância equivalente total também se altera. Portanto, vale ressaltar que a ferramenta de detecção de falhas a partir da análise dos diagramas fasoriais de tensão e corrente do estator, assim como dos gráficos de velocidade, pode ser estendida a qualquer máquina elétrica, desde que haja uma avaliação individual do comportamento da máquina submetida ao estudo.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os motores de indução trifásicos estão presentes nos mais diversos setores industriais em grande quantidade e são os principais elementos de transformação de energia elétrica em mecânica. Contudo, os motores de indução estão sujeitos a fatores elétricos, mecânicos e de ambiente que acarretam em diversas avarias que comprometem sua eficiência e podem tirá-los de operação, causando danos aos sistemas produtivos e conseqüentemente promover custos elevados com manutenção. Frente a este cenário, a necessidade de desenvolver e aprimorar sistemas com características não invasivas, que detectam falhas em tempo real nos motores de indução, se tornam cada vez mais relevantes.

O estudo e a compreensão das equações diferenciais que modelam todo comportamento dinâmico do motor de indução, bem como a realização de simulações através de softwares como MATLAB[®] e SIMULINK[®], se tornam significativas a medida que todo o comportamento do motor, representado pelas grandezas de análise (tensão, corrente e velocidade), diante das falhas de curto-circuito nas bobinas do estator, barras quebradas do rotor e avarias no rolamento é conhecido com riqueza de detalhes.

O uso de diagramas fasoriais para representar o comportamento das tensões e correntes do estator e os gráficos de velocidade do motor, se tornam excelentes ferramentas, na qual, propiciam a visualização dos efeitos das falhas de grandes e baixas magnitudes sobre essas grandezas. A aplicação desta técnica, por meio da plotagem de diagramas fasoriais e gráficos das tensões, correntes e velocidade, se mostrou eficaz frente ao problema proposto, com grande sensibilidade perante as falhas incididas sobre o motor de indução e diferentemente de outras técnicas, esta não necessita da conversão da corrente extraída do motor de indução no domínio do tempo para o domínio da frequência.

11 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram abordados conteúdos relacionados ao funcionamento e as características do motor de indução trifásico, passando por técnicas de monitoração e detecção de falhas, apresentando tipos de falhas as quais incidem sobre os motores elétricos, bem como suas origens e seus efeitos sobre os parâmetros do motor. Também foram explicitados todo equacionamento que modela o comportamento dinâmico do motor de indução, assim como os procedimentos adotados para a realização das simulações computacionais. Por fim, foram inseridas computacionalmente, falhas estatóricas, rotóricas e de rolamentos nas simulações, com a finalidade de elaborar um sistema de detecção de falhas, na qual é possível traçar seus perfis, através de diagramas fasoriais e gráficos de velocidade, observando o comportamento de grandezas, tais como, tensão e corrente estatórica e velocidade do motor diante das avarias aplicadas. Entretanto, como forma de aperfeiçoamento deste trabalho, na sequência serão apresentadas algumas propostas complementares para realização de trabalhos futuros a partir deste.

- Aprimorar as técnicas de simulações computacionais, com intuito de agilizar a obtenção de resultados e garantir sua precisão;
- Incluir novas variáveis na modelagem matemática do motor de indução trifásico, promovendo a inserção de novas falhas, como por exemplo, as causadas por efeito térmico;
- Aplicar esse sistema de detecção de falhas em motores síncronos e de corrente contínua;
- Desenvolver uma interface homem-máquina (IHM) acoplada ao software de modelagem do motor, para uma melhor visualização do comportamento das grandezas do motor de indução com e sem falhas;
- Acrescentar técnicas de diagnósticos, tais como, lógica fuzzy e redes neurais, junto ao sistema de detecção de falhas a fim de classificá-las;
- Realizar testes de cunho prático com motores de indução trifásicos e monofásicos, com objetivo de testar e aprimorar o sistema proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. **Fundamentos de Circuitos Eléctricos**. 3. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2008.
- ALVES, D. A. **Técnicas de Detecção de Falhas em Barras do Rotor nos Motores de Indução Trifásicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São del-Rei, São João del-Rei, 2017.
- ARAÚJO, R. de S. **Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Alimentados por Inversores: Análise e Proposta de Solução**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- ARAÚJO, R. G. C. **Desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- ASSUNÇÃO, F. de O. **Técnicas de análise preditiva para falhas elétricas em motores de indução trifásicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- AWADALLAH, M. A.; MORCOS, M. M. Application of ai tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview. **IEEE Transactions on energy conversion**, IEEE, v. 18, n. 2, p. 245–251, 2003.
- BACCARINI, L. M. R. **Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- BARBI, I. **Teoria fundamental do motor de indução**. [S.l.]: Editora da UFSC Florianopolis, 1985.
- BONNETT, A. H.; SOUKUP, G. C. Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 24, n. 6, p. 1124–1130, 1988.
- CAD, M. M. **Estratégias de modelagem dinâmica e simulação computacional do motor de indução trifásico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- CARDOSO, A. J. M. **Diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos**. Coimbra: Coimbra Editora, 1991.
- CATHEY, J. J.; CAVIN, R. K.; AYOUB, A. Transient load model of an induction motor. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 4, p. 1399–1406, 1973.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Eléctricas**. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013. 684 p.
- CORREIA, A. J. L. **Estimação de parâmetros mecânicos de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2014.
- CUNHA, C. C. M. **Assimetrias de Rotor em Máquinas de Indução**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

FILIPPETTI, F.; FRANCESCHINI, G.; TASSONI, C. Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using ai techniques. **IEEE transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 47, n. 5, p. 994–1004, 2000.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 3. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2008.

GILL, P. **Electrical Power Equipment Maintenance and Testing**. 2. ed. [S.l.]: CRC press, 2009.

GOEDEL, A. **Estimativa de conjugado de carga aplicado em eixos de motores de indução trifásico através de redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista., Bauru, 2003.

GOEDEL, A. **Estimador neural de velocidade para motores de indução trifásicos**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

HATTANGADI, A. a. **Failure Prevention of Plant and Machinery**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2005.

HOUCQUE, D. **Introduction to MATLAB for Engineering Students, northwestern University, version-1.2**. [S.l.]: Aug, 2005.

KARMAKAR, S. et al. **Induction Motor Fault Diagnosis: Approach through Current Signature Analysis (Power Systems)**. [S.l.]: Springer, 2016. ISBN 9789811006234.

KARRIS, S. T. **Numerical Analysis Using MATLAB and Excel (Third Edition)**. United States of America: Orchard Publications, 2007.

KASMIERKOWSKI, M.; TUNIA, H. Automatic control of converter fed drives. **ELECTRONIC ENGINEERING**, v. 4, p. 6, 1994.

KLIMAN, G. et al. A new approach to on-line turn fault detection in ac motors. In: **IEEE. Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS'96., Conference Record of the 1996 IEEE**. [S.l.], 1996. v. 1, p. 687–693.

KRAUSE, P. et al. **Analysis of electric machinery and drive systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. v. 75.

NANDI, S.; TOLIYAT, H. A.; LI, X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review. **IEEE transactions on energy conversion**, IEEE, v. 20, n. 4, p. 719–729, 2005.

NETO, T. R. F.; MENEZES, L. M. et al. Modelagem e simulação do motor de indução trifásico nas notações trifásica e coordenadas dqo. **Revista Tecnologia**, v. 25, n. 2, 2004.

ONG, C.-M. **Dynamic Simulations of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 626 p.

ONG, R.; DYMOND, J. H.; FINDLAY, R. D. Bearing damage analysis in a large oil-ring-lubricated induction machine. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 47, n. 5, p. 1085–1091, 2000.

PALMA, J. C. **Accionamentos electromecânicos de velocidade variável**. [S.l.]: Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian - Serviços de Educação Bolsas, 2008.

- PAULA, H. D. et al. Methodology for cable modeling and simulation for high-frequency phenomena studies in pwm motor drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 23, n. 2, p. 744–752, 2008.
- PEREIRA, L. A.; GAZZANA, D. da S.; PEREIRA, L. F. Motor current signature analysis and fuzzy logic applied to the diagnosis of short-circuit faults in induction motors. In: IEEE. **Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE**. [S.l.], 2005. p. 6–pp.
- PINHEIRO, H. H. C. **Sistema para detecção e diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução utilizando lógica fuzzy**. 84 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- PUMA, J. L. A. **Controle direto de torque do motor de indução trifásico usando controlador Fuzzy tipo PI autoajustável**. 167 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- REIS, A. J. S. **Reconhecimento de padrões de falhas em motores trifásicos utilizando redes neurais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- SANTOS, F. M. d. C. et al. Sobre a aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de falhas em máquinas de indução-uma visão geral. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, Sociedade Brasileira de Automática, v. 23, n. 5, p. 553–569, 2012.
- SHANCHENG, X.; ZHENG GUO, W. Characteristic research of bearing currents in inverter-motor drive systems. In: IEEE. **Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International**. [S.l.], 2006. v. 2, p. 1–4.
- SHARMA, A. et al. A review of fault diagnostic and monitoring schemes of induction motors. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)**, v. 3, n. 4, 2015.
- SHINDO, R. **Cálculo de parâmetros de Motor de Indução Trifásico utilizando o método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado), 2003.
- SIDDIQUE, A.; YADAVA, G.; SINGH, B. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. **IEEE transactions on energy conversion**, IEEE, v. 20, n. 1, p. 106–114, 2005.
- SIEMENS. **Falhas elétricas em motores trifásicos**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.kvm.com.br/attachments/article/37/Poster%20Falhas%20de%20Motores%20El%C3%83%C2%A9tricos%20Siemens.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2018.
- SILVA, J. L.; CARDOSO, A. M. Diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos. **Universidade de Coimbra**, 2005.
- SILVA, S. F. da. **Identificação de torque de carga em motores de indução usando abordagem baseada em sistemas fuzzy**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- STONE, G.; KAPLER, J. Stator winding monitoring. **IEEE Industry Applications Magazine**, IEEE, v. 4, n. 5, p. 15–20, 1998.

SUETAKE, M. **Sistemas inteligentes para monitoramento e diagnósticos de falhas em motores de indução trifásicos**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SUETAKE, M. et al. Sistema fuzzy compacto embarcado em dsp e sua aplicação para controle v/f de motores de indução. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 21, n. 3, p. 245–259, 2010.

THORSEN, O. V.; DALVA, M. Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 35, n. 4, p. 810–818, 1999.

TOLIYAT, H. A.; KLIMAN, G. B. **Handbook of electric motors**. [S.l.]: CRC press, 2004.

TROVÃO, J. et al. Efeitos da frequência de comutação de um inversor pwm no binário de um motor de indução trifásico. In: **Actas da Conferência Científica e Tecnológica em Engenharia no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa**. [S.l.: s.n.], 2002.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2014. 708 p.

VAS, P. **Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines (Monographs in Electrical and Electronic Engineering)**. [S.l.]: Clarendon Press, 1993. ISBN 0198593759.

WEG. **Motores Elétricos - Guia de Especificação**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

XIE, Y. Investigation of broken rotor bar faults in three-phase squirrel-cage induction motors. In: **Finite Element Analysis-From Biomedical Applications to Industrial Developments**. China: InTech, 2012.

APÊNDICE A – Resultados das Simulações do Motor de Indução Trifásico

Tabela 15 – Resultados das Simulações do MIT sem e com falhas estatóricas

Decremento Impedância Estatórica (%)	Média dos Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC (%)	Varição Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Média da Defasagem Ângular entre os Fasores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC (%)	Varição da Defasagem Ângular entre os Fasores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Velocidade P.U.	Varição da Velocidade em torno do valor Nominal (%)
Nominal	1,0000	0,0000000000000000	1,000021	0,00000000000000000000	1,00000049607	0,0000000000000000
1%	0,9996	0,03788374093088	0,998194	0,1826805046591890000000	1,00000710906	0,00066129926601
5%	0,9981	0,18831175314624	0,990906	0,9115161433570480000000	1,00003334841	0,00328523471300
10%	0,9963	0,37389593003651	0,981837	1,8183928153690500000000	1,00006567749	0,00651814240803
15%	0,9944	0,55681711018312	0,972814	2,7207546123606900000000	1,00009749670	0,00970006351803
20%	0,9926	0,73713745577200	0,963834	3,6187221877248600000000	1,00012881893	0,01283228637301
25%	0,9909	0,91491682971565	0,954897	4,5124124424179800000000	1,00015965656	0,01591604981802
30%	0,9891	1,09021290660678	0,946002	5,4019387042549900000000	1,00019002152	0,01895254566801
35%	0,9874	1,26308127671481	0,937147	6,2874108957645200000000	1,00021992528	0,02194292100701
40%	0,9857	1,43357554350158	0,928332	7,1689356929595800000000	1,00024937887	0,02488828035601
45%	0,9840	1,60174741626544	0,919555	8,0466166758972000000000	1,00027839294	0,02778968770401
50%	0,9823	1,76764679617752	0,910816	8,9205544695355900000000	1,00030697775	0,03064816841901
55%	0,9812	1,87643503750377	0,906515	9,3505668488506000000000	1,00032246444	0,03219683761901
60%	0,9791	2,09281912942332	0,893445	10,6575890116240000000000	1,00036289876	0,03624026900403
65%	0,9775	2,2521835855738	0,884812	11,5208734047108000000000	1,00039025369	0,03897576218402
70%	0,9759	2,40945858795301	0,876213	12,3807901314802000000000	1,000441721685	0,04167207845300
75%	0,9744	2,56468621663640	0,867647	13,2374269113698000000000	1,00044379682	0,04433007507900
80%	0,9728	2,71790706216559	0,859112	14,0908692134801000000000	1,00047000187	0,04695058007000
85%	0,9713	2,86916041853325	0,850609	14,9412003506728000000000	1,00049584000	0,04953439345101
90%	0,9698	3,01848431093865	0,842136	15,7885015729768000000000	1,00052131895	0,05208228845602
95%	0,9683	3,16591553835255	0,833693	16,6328521229580000000000	1,00054644616	0,05459500986601
99%	0,9672	3,28252192585505	0,826959	17,3062452220737000000000	1,00056631447	0,05658184052402
99,999%	0,9669	3,31120039510878	0,825295	17,4726495757897000000000	1,00057142296	0,05709268894002

Fonte: Próprio autor

Tabela 16 – Resultados das Simulações do MIT sem e com falhas rotóricas

Incremento Impedância Rotórica (%)	Média dos Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC (%)	Varição Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Média da Defasagem Angular entre os Fatores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC (%)	Varição da Defasagem Angular entre os Fatores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Velocidade P.U.	Varição da Velocidade em torno do valor Nominal (%)
Nominal	1,0000	0,0000000000000000	1,000021	0,000000000000000000	1,00000050	0,00000000
1%	1,0003	0,02653705473575	1,0019	0,184143215658139000	0,99991899	0,00815050
5%	1,0013	0,13378953526143	1,0093	0,924051810017474000	0,99959241	0,04080811
10%	1,0027	0,27029179359010	1,0186	1,855912002862480000	0,99918291	0,08175846
15%	1,0041	0,40944133010909	1,0280	2,794815182983830000	0,99877193	0,12285655
20%	1,0055	0,55119026444810	1,0374	3,740140044332150000	0,99835942	0,16410801
25%	1,0070	0,69550503875774	1,0469	4,691381045640140000	0,99794531	0,20551860
30%	1,0084	0,84236394201709	1,0565	5,648126638127140000	0,99752955	0,24709424
35%	1,0099	0,99175520293940	1,0661	6,610042348765800000	0,99711209	0,28884098
40%	1,0114	1,14367551037176	1,0758	7,576857513798470000	0,99669285	0,33076503
45%	1,0130	1,29812885598912	1,0853	8,548354777550140000	0,99627177	0,37287279
50%	1,0146	1,45512562676610	1,0953	9,524361718538800000	0,99584879	0,41517081
55%	1,0161	1,61468189185409	1,1051	10,504744126704800000	0,99542384	0,45766582
60%	1,0178	1,77681883950243	1,1149	11,489400566129100000	0,99499685	0,50036477
65%	1,0194	1,94156233770474	1,1248	12,478257961226500000	0,99456775	0,54327480
70%	1,0211	2,10894259003477	1,1347	13,471267991676100000	0,99413646	0,58640325
75%	1,0228	2,27899387170275	1,1447	14,468404140877500000	0,99370292	0,62975771
80%	1,0245	2,45175433095277	1,1547	15,469659271854500000	0,99326704	0,67334598
85%	1,0263	2,62726584390309	1,1648	16,475043632229800000	0,99282873	0,71717615
90%	1,0281	2,80557391649542	1,1749	17,484583215551500000	0,99238793	0,76125653
95%	1,0299	2,98672762488975	1,1850	18,498318414276800000	0,99194454	0,80559575
100%	1,0317	3,1707959143576	1,1952	19,516302919193800000	0,99149847	0,85020270
150%	1,0518	5,18490506294744	1,2995	29,949848225061000000	0,98686844	1,31320517
200%	1,0758	7,57648843050843	1,4095	40,948559289961000000	0,98184253	1,81579655
300%	1,1415	14,15106001299680	1,6581	65,805706154891500000	0,96974182	3,02586786
400%	1,2705	27,05415108778980	2,0105	101,047501501770000000	0,95007777	4,99227244
450%	1,9949	99,48522904940510	-2,0253	-302,536023837163000000	0,64013590	35,98645971
500%	1,9155	91,55294345032680	-1,5936	-259,361791999113000000	-0,72535384	172,53543404

Fonte: Próprio autor

Tabela 17 – Resultados das Simulações do MIT sem e com falhas dos rolamentos

Incremento Coef. Atrito (%)	Média dos Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC (%)	Varição Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Média da Defasagem Ângular entre os Fasores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC (%)	Varição da Defasagem Ângular entre os Fasores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Velocidade P.U.	Varição da Velocidade em torno do valor Nominal (%)
Nominal	1,0000	0,0000000000000000	1,000021	0,000000000000000000	1,000000496	0,0000000000
1%	1,0003	0,03204646931475	1,0000	0,005025999928960800	0,999997731	0,000276488
5%	1,0016	0,16024645487775	0,9998	0,025006909510580000	0,999986670	0,001382607
10%	1,0032	0,32052817684908	0,9995	0,049706885583759700	0,999972840	0,002765634
15%	1,0048	0,48084515850341	0,9993	0,074101246061019300	0,999959005	0,004149081
20%	1,0064	0,64119739270109	0,9990	0,098191300612171500	0,999945167	0,005532951
25%	1,0080	0,80158487310375	0,9988	0,121978350179063000	0,999931324	0,006917243
30%	1,0096	0,96200759335109	0,9986	0,145463688894793000	0,999917476	0,008301959
35%	1,0112	1,12246554764110	0,9983	0,168648602138987000	0,999903625	0,009687099
40%	1,0128	1,28295873061244	0,9981	0,191534367979315000	0,999889769	0,011072664
45%	1,0144	1,44348713733640	0,9979	0,214122256387597000	0,999875910	0,012458655
50%	1,0160	1,60405076312807	0,9977	0,236413529459227000	0,999862045	0,013845073
55%	1,0176	1,76464960388908	0,9974	0,258409442049100000	0,999848177	0,015231919
60%	1,0193	1,92528365577843	0,9972	0,280111241362391000	0,999834304	0,016619194
65%	1,0209	2,08595291541675	0,9970	0,301520166374061000	0,999820427	0,018006898
70%	1,0225	2,24665737967541	0,9968	0,322637449560702000	0,999806546	0,019395033
75%	1,0241	2,40739704605609	0,9966	0,343464315275440000	0,999792660	0,020783599
80%	1,0257	2,56817191221909	0,9964	0,364001980615456000	0,999778770	0,022172597
85%	1,0273	2,72898197627677	0,9962	0,384251655534570000	0,999764876	0,023562029
90%	1,0289	2,88982723682106	0,9960	0,404214542056280000	0,999750977	0,024951894
95%	1,0305	3,05070769259876	0,9958	0,423891835966515000	0,999737074	0,026342194
100%	1,0321	3,21162334319841	0,9956	0,443284724431066000	0,999723167	0,027732930
150%	1,0482	4,82271565325109	0,9938	0,621827679719132000	0,999583852	0,041664446
200%	1,0644	6,43732932892743	0,9923	0,773185534282661000	0,999444091	0,055640514
300%	1,0968	9,67714482324477	0,9900	0,998592422602783000	0,999163197	0,083729954
400%	1,1293	12,93115066639910	0,9887	1,127406145888630000	0,998880409	0,112008705
500%	1,1620	16,19947699728610	0,9884	1,166664825550880000	0,998595651	0,140484496
600%	1,1948	19,48229947167140	0,9888	1,122651571503620000	0,998308843	0,169165346

Fonte: Próprio autor

Tabela 18 – Continuação dos resultados das Simulações do MIT sem e com falhas dos rolamentos

Incremento Coef. Atrito (%)	Média dos Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC (%)	Varição Módulos das Correntes do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Média da Defasagem Ângular entre os Fasores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC (%)	Varição da Defasagem Ângular entre os Fasores de Tensão e Corrente do Estator nas Fases ABC em torno do valor Nominal (%)	Velocidade P.U.	Varição da Velocidade em torno do valor Nominal (%)
700%	1,2278	22,77983623511110	0,9900	1,000986293992950000	0,998019900	0,198059581
800%	1,2609	26,09234553807680	0,9920	0,806704286564425000	0,997728737	0,227175860
900%	1,2942	29,42012390670840	0,9946	0,544323693122394000	0,997435264	0,256523191
1000%	1,3276	32,76350479549170	0,9978	0,217903604508820000	0,997139386	0,286110959
1100%	1,3612	36,12285766912840	1,0017	0,168905783203797000	0,996841007	0,315948949
1200%	1,3950	39,49858746761110	1,0061	0,612819755087813000	0,996540022	0,346047373
1300%	1,4289	42,89113442196580	1,0111	1,110881421496790000	0,996236327	0,376416905
1400%	1,4630	46,30097419454010	1,0166	1,660428992223810000	0,995929809	0,407068708
1500%	1,4973	49,72861832779010	1,0226	2,259067294470130000	0,995620351	0,438014473
1600%	1,5317	53,17461498837110	1,0291	2,904642952869810000	0,995307832	0,469266456
1700%	1,5664	56,63955000344180	1,0360	3,595222748905140000	0,994992121	0,500837520
1800%	1,6012	60,12404818649140	1,0433	4,329074750055820000	0,994673084	0,532741183
1900%	1,6363	63,62877496083340	1,0510	5,101661039918810000	0,994350579	0,564991667
2000%	1,6715	67,15443828920950	1,0592	5,920577530297810000	0,994024457	0,597603952
2100%	1,7070	70,70179092664910	1,0678	6,779331980307480000	0,993694558	0,630593841
2200%	1,7427	74,27163301454210	1,0767	7,668748111558160000	0,993360716	0,663978024
2300%	1,7786	77,86481504795170	1,0860	8,598989073481160000	0,993022755	0,697774150
2400%	1,8148	81,48224124396840	1,0957	9,565553631631470000	0,992680487	0,732000914
2500%	1,8512	85,12487335463340	1,1057	10,567762991790100000	0,992333715	0,766678145
2600%	1,8879	88,79373497156080	1,1161	11,605056712064800000	0,991982227	0,801826905
2700%	1,9249	92,48991638229640	1,1268	12,676988393148500000	0,991625800	0,837469606
2800%	1,9621	96,21458004236610	1,1379	13,783222411484500000	0,991264195	0,873630130
2900%	1,9997	99,96896675044010	1,1493	14,923531668363100000	0,990897156	0,910333977
3000%	2,0375	103,75440261853000	1,1610	16,097796335581800000	0,990524412	0,947608413
4000%	2,4369	143,68882058647600	1,2976	29,761153088048200000	0,986406066	1,359443005
5000%	2,8935	189,35475621164200	1,4765	47,649051090390100000	0,981165016	1,883548047
6000%	3,4816	248,16317289109600	1,7359	73,591538636373500000	0,973166987	2,683350951
7000%	6,1979	519,79052514754000	-1,6952	-269,525878821464000000	-0,306848717	130,684921327

Fonte: Próprio autor