



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DE NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



# Sistema para Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução Utilizando Lógica *Fuzzy*

Hélio Henrique Cunha Pinheiro

Orientador: Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Natal (RN), Dezembro de 2011.

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Pinheiro, Hélio Henrique Cunha.

Sistema para detecção e diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução utilizando lógica *fuzzy* / Hélio Henrique Cunha Pinheiro. – Natal, RN, 2011.

84 f.; il.

Orientadora: André Laurindo Maitelli.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Motor de indução – Dissertação. 2. Lógica *Fuzzy* – Dissertação. 3. Motor de indução – Falhas - Dissertação. 4. Motor de indução – Diagnóstico – Dissertação. I. Maitelli, André Laurindo. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.313.333

# Sistema para Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução Utilizando Lógica *Fuzzy*

Hélio Henrique Cunha Pinheiro

Dissertação de Mestrado aprovada em 22 de dezembro de 2011 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Dr. André Laurindo Maitelli (orientador).....DCA/UFRN

---

Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar.....DCA/UFRN

---

Prof. Dr. Filipe de Oliveira Quintaes.....IFRN

*Aos meus filhos, Álvaro e Taís, e à minha esposa,  
Karisa, pelos momentos de atenção que lhes foram  
roubados durante a realização deste trabalho.*

---

# Agradecimentos

---

À Deus por ter me presenteado com a família que tenho e por ter me mostrado o quanto vale a pena trilhar pelo caminho do bem.

Aos meus pais, Hélio e Risoneide, pelos sacrifícios e investimentos destinados à minha educação e à minha formação moral, ética e profissional.

À minha esposa Karisa, pelo incentivo e pela compreensão.

Aos meus filhos, Álvaro e Taís, pelo carinho diário.

Ao meu orientador, professor Maitelli, pela confiança depositada na minha pessoa e pela orientação irrestrita que recebi.

Ao professor Ortiz, pelas horas dedicadas às discussões técnicas.

Ao meu colega, José Álvaro de Paiva, pelas importantes contribuições a este trabalho.

---

# Resumo

---

Os motores de indução constituem-se em um dos equipamentos mais importantes da indústria moderna. Contudo, em muitas situações, ficam sujeitos a condições inadequadas como temperaturas e pressões elevadas, variações de carga e vibrações constantes, por exemplo. Tais condições, os deixam mais susceptíveis a falhas, seja de natureza externa ou interna, indesejadas no processo industrial. Neste contexto, a manutenção preditiva desempenha um papel relevante, onde a detecção e o diagnóstico de falhas conseguidos em tempo hábil possibilita o aumento do tempo de uso do motor e a possibilidade de diminuição de custos, causados principalmente, com a parada da produção e com a manutenção corretiva do motor. Diante desta conjuntura, este trabalho propõe a concepção de um sistema que seja capaz de detectar e de diagnosticar falhas em motores de indução a partir da leitura e da interpretação de diagramas fasoriais de tensão e de corrente de linha e da velocidade do motor, executados por um sistema inteligente baseado em lógica *fuzzy*.

**Palavras-chave:** Motor de indução, Falhas, Detecção, Diagnóstico, Lógica *Fuzzy*.

---

# Abstract

---

Induction motors are one of the most important equipment of modern industry. However, in many situations, are subject to inadequate conditions as high temperatures and pressures, load variations and constant vibrations, for example. Such conditions, leaving them more susceptible to failures, either external or internal in nature, unwanted in the industrial process. In this context, predictive maintenance plays an important role, where the detection and diagnosis of faults in a timely manner enables the increase of time of the engine and the possibility of reducing costs, caused mainly by stopping the production and corrective maintenance the motor itself. In this juncture, this work proposes the design of a system that is able to detect and diagnose faults in induction motors, from the collection of electrical line voltage and current, and also the measurement of engine speed. This information will use as input to a fuzzy inference system based on rules that find and classify a failure from the variation of these quantities.

**Keywords:** Induction Motor, Failures, Detection, Diagnosis, Fuzzy Logic.

---

# Sumário

---

<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas</b>	<b>vii</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo da Dissertação.....	2
1.2. Organização da Dissertação.....	3
1.3. Estado da Arte.....	3
1.4. Conclusão.....	10
<b>2. Falhas Comuns em Motores de Indução.....</b>	<b>11</b>
2.1. Falhas no Estator.....	12
2.1.1. Esforços Térmicos.....	13
2.1.2. Esforços Elétricos.....	13
2.1.3. Esforços Mecânicos.....	14
2.1.4. Esforços/Contaminações Ambientais.....	14
2.2. Falhas no Rotor.....	15
2.2.1. Esforços Térmicos.....	15
2.2.2. Esforços Magnéticos.....	15
2.2.3. Falhas Dinâmicas.....	16
2.2.4 Falhas Mecânicas.....	16
2.2.5. Falhas Ambientais.....	17
2.3. Falhas nos Rolamentos.....	17
2.4. Conclusão.....	19
<b>3. Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução.....</b>	<b>21</b>
3.1. Técnicas de Detecção.....	22
3.1.1. Análise de Assinatura de Corrente do Motor.....	22
3.1.2. Análise de Campo Magnético.....	24

3.1.3. Análise de Vibração .....	25
3.1.4. Análise de Emissão Acústica .....	27
3.1.5. Análise da Velocidade Angular Instantânea .....	27
3.2. Técnicas para Diagnóstico.....	27
3.2.1. Lógica <i>Fuzzy</i> .....	29
3.3. Conclusão.....	31
<b>4. Modelagem do Motor de Indução Trifásico.....</b>	<b>33</b>
4.1. Modelo do Motor de Indução Trifásico.....	33
4.1.1. Notação Matricial Trifásica – Modelo ABC .....	34
4.1.2. Notação Matricial Trifásica – Modelo <i>qd0</i> .....	38
4.2. Influência das falhas nos parâmetros do motor de indução.....	41
4.2.1. Influência de barras quebradas no rotor.....	42
4.2.2. Influência de curto-circuito no estator.....	43
4.2.3. Influência de defeitos nos rolamentos .....	44
4.3. Simulação do motor de indução .....	44
4.4. Conclusão.....	48
<b>5. Sistema Proposto.....</b>	<b>49</b>
5.1. Escolha das Variáveis de Entrada .....	49
5.1.1. Diagrama Fasorial .....	50
5.1.2. Velocidade do motor .....	55
5.2. Fluxograma do Sistema Proposto.....	59
5.3. O Sistema de Inferência Fuzzy Baseado em Regras .....	60
5.3.1. Fuzzificação .....	61
5.3.2. A Inferência Máx-Min .....	63
5.3.3. Defuzzificação .....	65
5.4. Simulação do Sistema Fuzzy no Matlab® .....	68
<b>6. Resultados.....</b>	<b>73</b>
6.1. Diagnóstico Durante a Variação da Impedância do Rotor .....	73
6.2. Diagnóstico Durante a Variação da Impedância do Estator.....	74
6.3. Diagnóstico Durante a Variação do Coeficiente de Atrito do Estator.....	76
6.4. Matriz de Confusão.....	77

6.5. Conclusão.....	78
<b>7. Considerações Finais e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>79</b>
7.1. Trabalhos Futuros.....	80
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>81</b>

---

# Lista de Figuras

---

3.1	Esquema para a determinação do espectro da corrente.....	23
3.2	Espectro de corrente do estator.....	24
3.3	Espectro de fluxo (bobina de fluxo.....	25
3.4	Assinatura espectral de um sistema rotativo.....	26
4.1	Representação dos enrolamentos do estator e do rotor.....	34
4.2	Modelo idealizado para uma máquina de indução trifásica.....	35
4.3	Movimentação relativa entre os eixos $abc$ e $qd0$ para uma referência arbitrária.....	39
4.4	Circuito equivalente simplificado por fase do motor de indução.....	42
4.5	Fluxograma da simulação do motor de indução.....	45
4.6	Correntes no estator do motor de indução.....	46
4.7	Velocidade do motor de indução.....	46
4.8	Torque eletromagnético do motor de indução.....	47
4.9	Potência útil no eixo do motor de indução.....	47
5.1	Diagrama fasorial de tensão e corrente de linha, para o caso do motor saudável e com carga nominal.....	51
5.2	Alterações do diagrama fasorial de corrente mediante diferentes aumentos da impedância rotórica.....	52
5.3	Alterações do diagrama fasorial de corrente mediante diferentes reduções da impedância.....	53
5.4	Alterações do diagrama fasorial de corrente mediante diferentes aumentos do coeficiente de atrito do motor.....	54

5.5	Alterações na velocidade do motor mediante diferentes aumentos da impedância rotórica.....	56
5.6	Alterações da velocidade do motor mediante diferentes reduções da impedância estatórica.....	57
5.7	Alterações da velocidade do motor mediante diferentes aumentos do coeficiente de atrito do motor.....	58
5.8	Fluxograma do sistema proposto.....	60
5.9	Esquema do sistema fuzzy desenvolvido: 3 variáveis de entrada, 27 regras e 4 variáveis de saída.....	61
5.10	Fuzzificação da variável de entrada Módulo da Corrente.....	62
5.11	Fuzzificação da variável de entrada Defasagem Angular entre Tensão e Corrente de Linha.....	62
5.12	Fuzzificação da variável Velocidade do motor.....	63
5.13	Defuzzificação da variável de saída <i>Sem defeito</i> .....	66
5.14	Defuzzificação da variável de saída <i>Barras quebradas</i> .....	66
5.15	Defuzzificação da variável de saída <i>Curto-circuito nas espiras do estator</i> ....	67
5.16	Defuzzificação da variável de saída <i>Defeito nos rolamentos</i> .....	67
5.17	Toolbox de lógica fuzzy do Matlab®: FIS Editor.....	69
5.18	Toolbox de lógica fuzzy do Matlab®: Membership Function Editor.....	70
5.19	Toolbox de lógica fuzzy do Matlab®: Rule Editor.....	70
5.20	Execução do programa em Matlab®.....	71
6.1	Diagnóstico de barras quebradas de acordo com o incremento da impedância do rotor.....	74
6.2	Diagnóstico de curto-circuito nos enrolamentos do estator de acordo com o decréscimo da impedância do estator.....	75
6.3	Diagnóstico de defeito nos rolamentos do motor de acordo com o incremento do coeficiente de atrito.....	76

---

# Lista de Tabelas

---

4.1	Valores nominais do motor.....	45
5.1	Resumo das mudanças advindas nos diagramas fasoriais de tensão e de corrente de linha mediante a ocorrência de algumas falhas no motor.....	55
5.2	Comportamento dos parâmetros a serem usados como variáveis de entrada do sistema <i>fuzzy</i> .....	59
5.3	Conjuntos de regras aplicadas.....	64
6.1	Matriz de confusão.....	77

---

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

---

$A$	Área da seção transversal do fio
$A_b$	Área de seção transversal da bobina
$D$	Coefficiente de atrito do motor
$f_s$	Frequência fundamental do sinal no domínio da frequência
$I_{est}$	Corrente elétrica de enrolamento do estator
$I_{rot}$	Corrente elétrica de enrolamento do rotor referida ao lado do estator
$i_{ar}$	Corrente do rotor na fase $a$
$i_{as}$	Corrente do estator na fase $a$
$i_{br}$	Corrente do rotor na fase $b$
$i_{bs}$	Corrente do estator na fase $b$
$i_{cr}$	Corrente do rotor na fase $c$
$i_{cs}$	Corrente do estator na fase $c$
$i'_{dr}$	Corrente do rotor no eixo $d$ referida ao estator
$i_{ds}$	Corrente do estator no eixo $d$
$i'_{qr}$	Corrente do rotor no eixo $q$ referida ao estator
$i_{qs}$	Corrente do estator no eixo $q$
$i_r^{abc}$	Corrente total do rotor

$i_s^{abc}$	Corrente total do estator
$i'_{0r}$	Corrente do rotor no eixo zero referida ao estator
$i_{0s}$	Corrente do estator no eixo zero
$J$	Momento de inércia
$L_{lr}$	Indutância de dispersão do rotor por fase
$L_{ls}$	Indutância de dispersão do estator por fase
$L_r$	Indutância própria do rotor
$L_{ra}$	Indutância própria da fase <i>a</i> do rotor
$L_{rb}$	Indutância própria da fase <i>b</i> do rotor
$L_{rc}$	Indutância própria da fase <i>c</i> do rotor
$L_{rm}$	Indutância mútua entre as fases do rotor
$L_{rmab}$	Indutância mútua entre as fases <i>a</i> e <i>b</i> do rotor
$L_{rmbc}$	Indutância mútua entre as fases <i>b</i> e <i>c</i> do rotor
$L_{rmca}$	Indutância mútua entre as fases <i>c</i> e <i>a</i> do rotor
$L_{rr}$	Indutância própria do rotor por fase
$L_{rr}^{abc}$	Submatriz de indutâncias do rotor
$L_{rs}^{abc}$	Indutâncias mútuas das fases do rotor em relação ao estator
$L_s$	Indutâncias própria do estator
$L_{sa}$	Indutância própria da fase <i>a</i> do estator
$L_{sb}$	Indutância própria da fase <i>b</i> do estator
$L_{sc}$	Indutância própria da fase <i>c</i> do estator
$L_{sm}$	Indutância mútua entre as fases do estator

$L_{smab}$	Indutância mútua entre as fases $a$ e $b$ do estator
$L_{smbc}$	Indutância mútua entre as fases $b$ e $c$ do estator
$L_{smca}$	Indutância mútua entre as fases $c$ e $a$ do estator
$L_{sr}$	Indutâncias mútuas entre as fases do estator e do rotor
$L_{ss}$	Indutância própria do estator por fase
$L_{sr}^{abc}$	Indutâncias mútuas das fases do estator em relação ao rotor
$L_{ss}^{abc}$	Submatriz de indutâncias do enrolamento do estator
$M$	Número total dos elementos no universo de discurso
$N$	Número de barras do rotor
$n$	Número de barras quebradas no rotor
$P$	Número de pólos do motor
$r_b$	Resistência ôhmica de uma barra do rotor
$R_c$	Resistência elétrica de perda
$R_{rot}$	Resistência elétrica do enrolamento do rotor referida ao estator
$r_r$	Resistência do rotor
$r'_r$	Resistência do rotor referida ao estator
$r_s$	Resistência do estator
$s$	Escorregamento do motor
$t$	Tempo
$T_c$	Torque de carga aplicada
$T_D$	Torque de inércia total

$T_{em}$	Torque eletromagnético
$[T_{dq0}(\theta)]$	Matriz de transformação de Park
$[T_{dq0}(\theta)]^{-1}$	Matriz de transformação inversa de Park
$u_m$	m-ésimo elemento no universo de discurso
$V(t)$	Valor instantâneo de um sinal no domínio do tempo
$V$	Representação fasorial da senóide
$v_{ar}$	Tensão do rotor na fase $a$
$v_{as}$	Tensão do estator na fase $a$
$v_{br}$	Tensão do rotor na fase $b$
$v_{bs}$	Tensão do estator na fase $b$
$v_{cr}$	Tensão do rotor na fase $c$
$v_{cs}$	Tensão do estator na fase $c$
$V'_{dr}$	Tensão do rotor no eixo $d$ referida ao estator
$V_{ds}$	Tensão do estator no eixo $d$
$V_{est}$	Tensão de fase no estator
$V_m$	Amplitude de uma senóide
$V'_{qr}$	Tensão do rotor no eixo $q$ referida ao estator
$V_{qs}$	Tensão do estator no eixo $q$
$V_{sup}$	Tensão gerada pelo fluxo resultante no entreferro
$V'_{or}$	Tensão do rotor no eixo zero referida ao estator
$V_{0s}$	Tensão do estator no eixo zero
$X_{est}$	Reatância de dispersão do estator

$X_m$	Reatância de magnetização
$X_{rot}$	Reatância de dispersão do enrolamento do rotor referida ao estator
$\Delta l$	Variação do comprimento do fio
$\Delta l_b$	Variação do tamanho da bobina
$\Delta r$	Variação de resistência na espira do estator
$\Delta R$	Incremento de resistência rotórica
$\phi$	Ângulo de fase inicial
$\lambda_{ar}$	Fluxo magnético do rotor na fase <i>a</i>
$\lambda_{as}$	Fluxo magnético do estator na fase <i>a</i>
$\lambda_{br}$	Fluxo magnético do rotor na fase <i>b</i>
$\lambda_{bs}$	Fluxo magnético do estator na fase <i>b</i>
$\lambda_{cr}$	Fluxo magnético do rotor na fase <i>c</i>
$\lambda_{cs}$	Fluxo magnético do estator na fase <i>c</i>
$\lambda'_{dr}$	Fluxo magnético do rotor no eixo <i>d</i> referido ao estator
$\lambda_{ds}$	Fluxo magnético do estator no eixo <i>d</i>
$\lambda'_{qr}$	Fluxo magnético do rotor no eixo <i>q</i> referido ao estator
$\lambda_{qs}$	Fluxo magnético do estator no eixo <i>q</i>
$\lambda_r^{abc}$	Fluxo magnético concatenado total do rotor
$\lambda_s^{abc}$	Fluxo magnético concatenado total do estator
$\lambda'_{0r}$	Fluxo magnético do rotor no eixo zero referido ao estator
$\lambda_{0s}$	Fluxo magnético do estator no eixo zero

$\mu$	Permeabilidade do material do entreferro
$\rho$	Resistividade do material da bobina
$\theta$	Ângulo de deslocamento
$\omega$	Velocidade arbitrária
$\omega_r$	Velocidade mecânica do rotor
$\omega_s$	Velocidade angular do sinal da rede elétrica

DPW:	Decomposição por Pacote de Wavelet
FFT:	<i>Fast Fourier Transform</i>
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM:	Interface Homem-Máquina
MCSA:	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
MDE:	Modo de Decomposição Empírico
MEF:	Método de Elementos Finitos
RNA:	Rede Neural Artificial
RMS:	<i>Root Mean Square</i>
SCADA:	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
TCA:	Teoria dos Conjuntos Aproximados
TDW:	Transformada Discreta de Wavelet
THH:	Transformada de Hilbert-Huang

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

Os motores elétricos são utilizados no acionamento de cargas mecânicas por serem capazes de promover a transformação de energia elétrica em energia mecânica com pequenas perdas, o que os tornam máquinas com rendimento energético elevado. Entre os diversos tipos existentes no mercado, o *motor elétrico de indução*, também conhecido como *motor assíncrono*, destaca-se por apresentar um princípio de funcionamento simples, construção robusta, pouca necessidade de manutenção, baixo custo e possibilidade de emprego em praticamente qualquer aplicação, incluindo ambientes hostis, explosivos, com poeiras, aplicações navais, etc. [Guedes 1994].

Devido às suas excelentes características, o motor de indução trifásico tem sido utilizado nos mais diversos acionamentos eletromecânicos: desde o acionamento simples de ventiladores (1,5 kW) até aos motores dos veículos de tração elétrica, ou o acionamento de poderosos compressores utilizados na indústria química (200 a 1800 kW), passando pelo acionamento de máquinas ferramentais (4 a 30 kW) [Guedes 1994].

Por outro lado, a variação e controle da sua velocidade não é tão fácil como no caso do motor de corrente contínua. Os métodos clássicos de controle de velocidade baseados na variação da tensão estatórica, comutação de enrolamento, variação da resistência rotórica para o caso de motores de anéis, entre outros, são em geral, pouco eficientes e apresentam baixos rendimentos, o que na atualidade representa uma séria desvantagem. Sistemas mais modernos empregam conversores estáticos para a variação da velocidade, permitindo a variação simultânea da tensão e da frequência aplicadas ao estator ou ao rotor da máquina. Estes métodos são, então, mais eficientes e convenientes, além de um custo, relativamente baixo em face da difusão desses conversores nos dias atuais. Desta

forma, atualmente no mercado, tanto motores de indução quanto motores síncronos acionados por conversor, vêm substituindo gradativamente os tradicionais motores de corrente contínua.

Embora os motores de indução sejam robustos, eles estão sujeitos a alguns esforços indesejáveis, os quais os desgastam, causando-lhes algumas falhas [Siddique et al. 2005]. Pesquisadores tem estudado uma variedade de falhas nesses motores, entre as quais podemos destacar algumas como: falha nos enrolamentos, estator ou rotor desbalanceados, barras quebradas do rotor, excentricidades e falhas nos rolamentos [Siddique et al. 2005]. A necessidade de condições de monitoramento tem aumentado por causa do uso difundido da automação e na consequente redução de custos com o advento da IHM (Interface Homem-Máquina) e dos sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) na supervisão do sistema de operação. A tendência é monitorar os parâmetros de saída da máquina com o propósito de detecção, análise e correção dos problemas antes que eles aconteçam, reduzindo danos e paradas para manutenção não-programada, e por consequência, aumentando a sua disponibilidade, performance e vida útil [Siddique et al. 2005].

Neste contexto, este trabalho se propõe a desenvolver um sistema que visualize as condições de operação do motor de indução e possa perceber e classificar eventuais falhas que venham a ocorrer. Na sequência, apresentaremos o objetivo da dissertação, a maneira na qual o trabalho está organizado e uma revisão bibliográfica sobre o assunto.

## 1.1. Objetivo da Dissertação

O objetivo desse trabalho é desenvolver um sistema baseado na lógica *fuzzy* com o objetivo de diagnosticar alguns tipos de falhas incipientes existentes nos motores de indução trifásicos. Essas falhas se desencadeiam com o envelhecimento e com condições adversas as quais os motores são submetidos ao longo de suas vidas úteis. A não correção dessas falhas em situações programadas acarretará prejuízos futuros, com paralisações corretivas em momentos inoportunos e consequente interrupção do processo produtivo.

A motivação para esse trabalho está no fato de que o sistema proposto apresenta como vantagens: diagnósticos em tempo real; as grandezas a serem

monitoradas são tensão e corrente de linha e velocidade do motor, portanto, de fácil obtenção; há uma relevância considerável para o ambiente industrial, pois proporciona redução de custos; e a proposta tem um cunho prático acentuado já que é possível de ser disponibilizada ao mercado sob forma de produto.

## 1.2. Organização da Dissertação

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O primeiro é a introdução, onde ressaltamos o objetivo da pesquisa, a estruturação do trabalho e a revisão bibliográfica acerca do tema. O segundo, é dedicado às falhas mais comuns encontradas em motores de indução, onde destacamos as falhas estatóricas, rotóricas e nos rolamentos. O capítulo 3 traz as técnicas mais comuns dedicadas à detecção de falhas em motores de indução, bem como, aquelas designadas ao diagnóstico.

O capítulo 4 faz um abordagem sobre o motor de indução: as suas equações dinâmicas, o seu circuito equivalente, a influência das falhas sobre os seus parâmetros e a simulação computacional, são alguns dos aspectos relatados. O capítulo 5 é reservado ao sistema de inferência *fuzzy*, onde as variáveis de entrada e de saída, as regras estabelecidas, as funções de pertinência e a simulação em ambiente Matlab<sup>®</sup> são explanadas em detalhes. Esse capítulo é o mais importante, pois retrata a nossa contribuição técnico/científica.

Os capítulos 6 e 7 são designados, respectivamente, aos resultados da pesquisa e às considerações finais.

## 1.3. Estado da Arte

A detecção e o diagnóstico de falhas em motores de indução tem despertado o interesse de muitos pesquisadores de modo que já existe uma quantidade considerável de publicações sobre este tema. Entre os métodos de detecção, a “Assinatura de Corrente do Motor” tem se mostrado um dos mais utilizados, o mesmo acontecendo com as “Redes Neurais Artificiais”, no concernente ao diagnóstico, e entre as falhas mais pesquisadas, destacam-se barras quebradas no rotor, curto-circuito nos enrolamentos e problemas nos rolamentos. Assim, relataremos em seguida, uma síntese de alguns destes trabalhos.

Chow *et al.* (1991), desenvolveram um sistema de detecção em tempo real, baseado em Redes Neurais Artificiais. O detector era composto por duas partes: uma rede que detectava os distúrbios e filtrava os valores transitórios de medidas extraídas do motor; e outra que se constituía no detector propriamente dito. Foram levadas em consideração falhas como deterioração do enrolamento do estator e desgaste nos rolamentos.

Cho *et al.* (1992) usaram a resistência aparente do rotor como forma de detectar barras quebradas no rotor. O raciocínio usado foi o seguinte: a resistência aparente do rotor aumentava de valor em relação à nominal, quando nele havia quebras de barras. Foram extraídos valores de tensão, corrente e frequência do estator, além da velocidade do rotor dentro de uma pequena faixa, onde, posteriormente, tais valores eram usados para estimar os parâmetros do circuito equivalente motor de indução balanceado em regime permanente. Os valores estimados da resistência do rotor eram comparados com seus valores nominais na tentativa de encontrar barras quebradas no rotor.

Trutt *et al.* (1993) utilizando-se de dados nominais do motor e de análise nodal, acrescentando baixas ou altas impedâncias entre fases, entre núcleos da mesma fase ou entre fase e terra, com isso, conseguiram estimar valores de correntes que caracterizavam deterioração nas bobinas do estator ou do rotor.

Walliser *et al.* (1994) analisaram os efeitos das correntes entrebarras quando o motor de indução apresentava barras quebradas no rotor. A suposição era a de que uma barra quebrada não conduziria corrente, e isso, causaria um desequilíbrio magnético. Em alguns motores, porém, havia ainda grandes correntes circulando por intermédio das correntes entre barras. E eles se propuseram a mostrar que, no caso de haver barras quebradas, as correntes entre barras reduzem o referido desequilíbrio magnético.

Schoen *et al.* (1995) uniram as técnicas de MCSA e RNA para visualizar o desbalanceamento mecânico e a deterioração de rolamentos. O sistema proposto fornecia um método baseado em regras para selecionar as componentes espectrais importantes ao monitoramento, enquanto a rede neural, detectava mudanças em relação à condição saudável do motor. Assim, a predição era possível sem que informações sobre o motor ou das características de cargas fossem requeridas.

Com o objetivo de encontrar falhas nos rolamentos, o trabalho de Li *et al.* (1998) utilizou-se de medições de vibrações e de uma Rede Neural artificial (RNA).

Riley *et al.* (1999) expuseram um estudo inicial sobre a relação entre as vibrações (inerentes e induzidas externamente) e as correntes harmônicas do motor de indução. Tanto teorica, como experimentalmente, os resultados mostraram que mudanças no valor RMS (*Root Mean Square*) da corrente do estator estão diretamente relacionadas com mudanças na magnitude da vibração, para uma frequência de vibração conhecida. Os testes foram realizados com motores novos, onde vibrações foram induzidas externamente, assim como, em motores com danos nos rolamentos.

O trabalho de Benbouzid *et al.* (1999) investigou a eficiência da Análise da Assinatura da Corrente do Motor como forma de diagnosticar falhas. Descreveram os efeitos do espectro de corrente do estator e relacionaram as determinadas frequências à falhas específicas. As falhas assimétricas foram identificadas satisfatoriamente usufruindo-se de técnicas de processamento de sinais, como a análise espectral em alta resolução, que proporcionou uma melhor interpretação do sinal. Essa técnica, apresentou vantagens em relação a métodos tradicionais como a *Fast Fourier Transform* (FFT), por apresentar modificações na componente espectral principal do sinal, durante a ocorrências de diferentes falhas.

Kolla *et al.* (2000) utilizaram-se de Redes Neurais Artificiais para encontrar falhas como sobrecarga, fase em aberto, fonte de tensão desbalanceada, rotor bloqueado, falta fase-terra, sobretensão e subtensão. Valores RMS trifásicos de tensão e de corrente foram usados como dados de entrada. A estrutura usada foi a *feedforward* e o algoritmo de treinamento foi o *backpropagation*. Entre as conclusões constatou-se que para uma melhor exatidão no diagnóstico, o número de épocas deve ser grande. O trabalho não levou em consideração dados provenientes de sinais com ruídos e o diagnóstico não ocorre em tempo real.

Kabaodlu *et al.* (2001) também fizeram uso das medições de vibrações e de uma Rede Neural Artificial para encontrar falhas nos rolamentos, porém, neste caso, a evolução espectral foi calculada a partir dos coeficientes da expansão multi-indicador de Gabor.

Premrudeepreechacharn *et al.* (2002) usaram dois algoritmos de Redes Neurais Artificiais, um supervisionado e outro não-supervisionado, para detectar e diagnosticar falhas como excentricidade no entreferro, barras quebradas no rotor e falhas nos rolamentos, a partir da análise espectral da corrente. Constataram que o algoritmo supervisionado é capaz apenas de apontar a existência da falha, enquanto que o não-supervisionado consegue classificar o tipo de falha.

Brito (2002) desenvolveu um sistema híbrido, chamado *HY\_NES*, baseado em técnicas de inteligência artificial, combinando Redes Neurais Artificiais e sistemas especialistas, para diagnosticar falhas de origem mecânica (desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica), elétrica (desequilíbrio de fase e barras quebradas) e a condição normal de funcionamento do motor (assinatura do motor). Os sinais de vibração foram coletados aleatoriamente, nas direções vertical, axial e horizontal, no lado do acoplamento e no lado da ventoinha, formando um banco de dados extenso. Um filtro seletivo foi aplicado para reduzir o número de parâmetros representativos dos sinais das excitações durante o treinamento das 72 redes neurais artificiais. Foram implementadas 199 regras no sistema especialista que contemplam o conteúdo heurístico para a saída dessas redes.

O trabalho de Bonaldi *et al.* (2002) fazendo uso da Análise de Assinatura de Corrente do Motor, propôs um sistema para a detecção de falhas mecânicas. Assimetria rotórica, rotor desbalanceado, excentricidade entreférrica e barras quebradas, por exemplo, eram detectadas comparando-se a análise espectral da corrente numa fase do estator com o espectro dessa mesma corrente em condições normais. Para classificação de diagnóstico, ele utilizou um algoritmo baseado na Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA) que fazia a distinção entre os possíveis problemas. Com o mesmo propósito, Ye, Wu e Sadeghian (2003) desenvolveram um trabalho semelhante, diferenciando-se por utilizar a Decomposição por Pacote de Wavelet (DPW).

Li *et al.* (2004) compararam duas técnicas de Redes Neurais Artificiais: redes *feedforward* e mapas auto-organizados. O estudo foi feito levando-se em consideração falhas nos rolamentos e nos enrolamentos do estator, desbalanceamento e barras quebradas no rotor. As redes neurais foram treinadas e testadas usando dados de medições da corrente do estator e de vibrações

mecânicas. As conclusões mostraram que: a rede *feedforward* com uma estrutura interna muito simples pode gerar resultados satisfatórios, ao passo que, a rede de mapas auto-organizados pode classificar os tipos de falhas durante o regime permanente; o treinamento das redes *feedforward* demanda mais tempo; o incremento de neurônios não necessariamente melhora a performance; mas, o tamanho do treinamento a influencia, isto é, o diagnóstico melhora com o aumento do treinamento.

Brito *et al.* (2004), construíram uma bobina para detectar barras quebradas, desbalanceamento de tensão, subtensão e sobretensão, utilizando a análise de fluxo magnético. Constataram que este método apresenta resultados semelhantes aos da análise de corrente com a vantagem de não necessitar do conhecimento da carga do motor nem do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuitos entre espiras. Em 2007, complementaram o trabalho fazendo com que a detecção, o diagnóstico e o monitoramento acontecesse por intermédio da lógica *fuzzy*.

Marçal *et al.* (2005) na tentativa de encontrar desbalanceamentos em máquinas rotativas, utilizaram-se também da análise de vibração, mas, em conjunto com a lógica *fuzzy*.

Zeraoulia *et al.* (2005) apresentaram um trabalho em que o seu diferencial foi usar a lógica *fuzzy*, para interpretar o diagnóstico de falhas. A condição do motor foi descrita usando variáveis linguísticas, onde subconjuntos *fuzzy* e funções de pertinência correspondentes descreveram a amplitude da corrente do estator. Com uma base de dados conhecida e um conjunto base de regras, foi possível construir um suporte de inferência *fuzzy*, no qual a condição do motor de indução era diagnosticada usando uma regra composicional.

Gazzana *et al.* (2005) para detectar curto-circuitos no enrolamento do estator, combinaram as técnicas de MCSA e da lógica *fuzzy*. Entre as constatações, estão a dificuldade em detectar curto-circuito no enrolamento do estator quando existe excentricidades e carga acoplada ao motor. Nessas condições, o algoritmo da FFT não se mostrou confiável. Uma forma de neutralizar esse problema é trabalhar com amostras de frequência elevadas ou desacoplar a carga da máquina, esta última, contudo, não se mostra interessante em se tratando de situações práticas.

Jung *et al.* (2006) descreveram um método que usa a *Motor Current Signature Analysis* (MCSA) em conjunto com algoritmos avançados para processamento de sinais, para indicar não só falhas como excentricidade do entreferro ou barras e anéis quebrados no rotor, como também, rachaduras nos rolamentos e curto-circuito nos enrolamentos do estator. A inclusão desses algoritmos visou amenizar algumas limitações da MCSA.

Han *et al.* (2006) combinaram a Transformada Discreta de Wavelet (TDW), extração de característica da corrente, algoritmo genético e Redes Neurais Artificiais. A transformada de Wavelet melhora a relação sinal/ruído durante o pré-processamento. Características da corrente do estator são extraídas ao reduzir a transferência de dados. O algoritmo genético é usado para selecionar as características mais significantes dentre os dados extraídos e para otimizar a estrutura da rede neural. A rede neural otimizada é treinada e testada para selecionar dados característicos medidos da corrente do estator. A combinação das vantagens dessas técnicas reduz o tempo de aprendizagem e melhora a exatidão do diagnóstico. Entre falhas que o sistema pode diagnosticar estão: barras quebradas no rotor, rolamentos danificados, rotor desbalanceado e inclinado e desalinhamento do eixo.

Ballal *et al.* (2007) combinaram as características das RNAs e da lógica fuzzy para produzir um sistema que detectava a falha na isolação da espira do estator e o desgaste do rolamento. Segundo eles, entre as principais vantagens desta técnica, estão a não necessidade de modelagem matemática, assim como, a não necessidade do conhecimento prévio do motor. Inicialmente, são usados como parâmetros de entrada, a corrente de linha e a velocidade do rotor. Posteriormente, são acrescentadas as temperaturas dos rolamentos e dos enrolamentos e o ruído da máquina. Com essas cinco variáveis, o sistema mostra-se mais preciso no diagnóstico. Como fator limitante, para se obter o monitoramento em tempo real, instrumentos como amperímetro, sensor de temperatura, tacômetro e microfone receptor são obrigatórios para a coleta de dados.

Yang *et al.* (2007) propuseram um método para diagnosticar curto-circuitos no enrolamento do estator baseado na Transformada de Hilbert-Huang (THH). A relação entre a sequência zero e a sequência positiva da tensão após o desligamento do sistema é selecionada como característica de falha do estator, a

qual está imune a influência do desbalanceamento da fonte, como também da flutuação de carga, e representa diretamente alguma perturbação no estator. Usando um MDE (Modo de Decomposição Empírico) baseado na THH, a componente de sequência zero da tensão após o desligamento, é decomposta e suas componentes fundamentais são extraídas. Assim, a característica de falha pode ser calculada. Contudo, a sua limitação, está no fato de o diagnóstico não ser fornecido em tempo real.

He *et all.* (2007), fez um trabalho semelhante ao de Schoen *et all.* (1995), todavia, com o intuito de encontrar o número de barras quebradas do rotor.

Ematsu (2008) usou a corrente de partida do motor de indução para detectar falhas nas barras do rotor. Segundo ele, esta análise difere da grande maioria dos métodos empregados atualmente, porque a máquina não precisa operar em condições nominais de carga. Com isso, algumas desvantagens relativas às metodologias largamente utilizadas, como escorregamento inconstante e baixa relação sinal/ruído são eliminadas. O trabalho consiste em extrair o sinal fundamental da corrente de partida e analisar o restante utilizando a TDW.

Lemos *et all.* (2008) apresentaram um sistema híbrido para monitoramento, detecção e diagnóstico, composto por um inversor, um gerador síncrono, sensores de tensão e de corrente, chaves seccionadoras, além do próprio motor de indução, podendo operar tanto de forma não-supervisionada (*stand-alone*), quanto de forma supervisionada (*interconnected*).

Gazzana *et all.* (2008) mostraram as potencialidades da técnica da MCSA para detecção de falhas de curto-circuito do enrolamento do estator. Para a implementação desta técnica, a aquisição do sinal foi feita utilizando transdutores de corrente e a transformação do sinal tempo-freqüência baseada em algoritmos da FFT. Como contribuição, foi percebido que a presença de excentricidades do rotor - provocadas por desalinhamento entre carga e eixo - pode prejudicar a identificação das componentes de curto-circuito devido a similaridade entre as freqüências destas duas falhas. Alternativamente, a análise de harmônicos de curto-circuito de maior ordem foi realizada para minimizar este problema.

Rodríguez *et all.* (2008) construíram um esquema geral em ambiente SIMULINK/MATLAB simulando falhas como barras quebradas no rotor,

excentricidades e curto-circuitos nas bobinas. O Método de Elementos Finitos (MEF) foi utilizado para gerar dados virtuais. As técnicas para monitoramento e diagnóstico foram a MCSA e a lógica *fuzzy*.

Reis (2010) elaborou um sistema de diagnóstico de falhas para motor de indução trifásico utilizando os parâmetros do circuito equivalente e técnicas de reconhecimento de padrões, através de Redes Neurais Artificiais. O sistema foi desenvolvido em ambiente Matlab<sup>®</sup> onde alguns tipos de falhas foram simuladas a partir de modificações nos parâmetros do circuito equivalente.

#### **1.4. Conclusão**

Deste modo, observamos o quão é rica e variada a pesquisa acerca do tema em questão. Podemos constatar, através deste capítulo, que existe uma grande variedade de combinações que podem ser realizadas entre os métodos de monitoramento e as técnicas de diagnósticos. Entre os meios para a coletas de dados destacam-se a MCSA, a análise de fluxo e a análise de vibrações. Como técnicas de diagnósticos as RNAs apresentam-se robustas na área de proposição do trabalho, seguida da lógica *fuzzy* e de sistemas especialistas.

No capítulo seguinte, apresentaremos as falhas mais comuns encontradas em motores de indução, onde verificaremos que a maior parte delas, localiza-se, ou no estator, ou no rotor ou nos rolamentos.

---

## Capítulo 2

# Falhas Comuns em Motores de Indução

---

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

As causas dessas falhas são classificadas em:

- Erros de projeto;
- Materiais com defeitos;
- Processamento e fabricação deficientes;
- Instalações equivocadas;
- Condições de serviço fora de especificações;
- Manutenção deficiente;
- Operação imprópria.

Já Hattangadi (2005) afirma que a maior parte das falhas em máquinas elétricas está relacionada a aspectos mecânicos e elétricos. Entre os fatores que provocam problemas mecânicos podemos destacar: expansão térmica, vibração, fadiga mecânica, corrosão, fricção, fratura, deformação e desgaste ou erosão. Já os elétricos são provocados por: aquecimento elétrico, descargas parciais, degradação térmica, resistência de contato, avaria dielétrica, magnetização e indução eletromagnética.

Nandi et al. (2005), por sua vez, classificou as falhas em máquinas elétricas como pertencentes a uma das categorias abaixo:

1. Falhas estatóricas resultando na abertura ou curto-circuito de um ou mais enrolamentos de fases do estator;
2. Conexões anormais dos enrolamentos do estator;
3. Quebra de barras ou rachaduras nos anéis terminais do rotor;

4. Folgas irregulares estáticas e/ou dinâmicas no entreferro;
5. Eixo desalinhado que pode resultar num atrito entre o estator e o rotor;
6. Curto-circuito na bobina do rotor;
7. Falhas de engrenagens ou nos rolamentos.

Independentemente da classe em que seja classificada a falha, Nandi et al. (2005), afirma que, seja de forma isolada ou em combinação de duas ou mais, as falhas podem proporcionar, entre outros, os seguintes sintomas: tensões e correntes de linha desbalanceadas; aumento de vibrações; queda do torque médio; aumento das perdas e redução do rendimento; aquecimento excessivo.

Reis (2010) constata que, o estator, o rotor e os rolamentos são os componentes do motor de indução mais susceptíveis à falhas. No caso do estator, os enrolamentos são as partes mais sujeitas a danos, enquanto que no rotor, barras quebradas e excentricidade rotórica são os defeitos mais comuns, já nos rolamentos o desgaste físico é o problema mais recorrente. Por isso, na sequência, enfocaremos, com mais detalhes, os seus defeitos mais comuns.

## 2.1. Falhas no Estator

Segundo Siddique et al. (2005), estudos realizados pelo *IEEE* e pela *Electric Power Research Institute*, mostram que de 30% a 40% das falhas nos motores de indução estão relacionadas a avarias no enrolamento do estator. O trabalho reforça ainda que o estator está sujeito a vários esforços como térmicos, elétricos, mecânicos e ambientais os quais afetam-o severalmente, levando-o a uma condição de falha.

Siddique et al. (2005) afirmam também que os defeitos/falhas relacionadas ao estator podem ser classificados em duas categorias:

- 1) Laminações (ponto quente no núcleo, núcleo folgado), carcaça (vibração, corrente circulando, perdas de líquidos refrigerantes, falta à terra).
- 2) Defeitos nos enrolamentos: o mais comum dos defeitos está relacionado ou a “porção final de enrolamento” ou a “porção de ranhura”, os quais são descritos abaixo:

- a. Porção final de enrolamento (dano local na isolação, desgaste da isolação, contaminação da isolação por umidade, óleo ou sujeira, danos nos conectores, rompimento da isolação, erosão por descarga na isolação, deslocamento dos condutores, curto-circuito entre as espiras).
- b. Porção de ranhura (desgaste da isolação, deslocamento dos condutores).

A seguir, explanaremos com mais detalhes sobre os esforços os quais o estator fica submetido, elencando causas e falhas que eles podem resultar.

### 2.1.1. Esforços Térmicos

Esses esforços podem acontecer devido ao envelhecimento térmico e às sobrecargas térmicas.

Como uma regra básica, com o acréscimo na temperatura, a vida útil da isolação cai consideravelmente, isto é, o enrolamento torna-se mais envelhecido. Para minimizar este problema, existem algumas alternativas, entre as quais, citamos: redução da temperatura de operação, o aumento da classe de isolação e a ventilação forçada.

Sobrecarga térmica pode ocorrer devido a variações de tensão, fases desbalanceadas, operação com sobrecarga cíclica, ventilação obstruída, temperatura ambiente elevada, etc. Se o motor for submetido a muitas partidas dentro de um curto intervalo de tempo, ou a uma operação intermitente<sup>1</sup>, a temperatura interna aumentará rapidamente, o que levará a isolação a um enfraquecimento, por contração e expansão repentinas.

### 2.1.2. Esforços Elétricos

Os esforços elétricos podem ser classificados em: dielétricos, seguimento, efeito *corona* e tensões transitórias.

No que se refere aos dielétricos, podemos constatar que a relação entre a vida útil dos materiais e as sobretensões neles aplicadas são levadas em

---

<sup>1</sup> Regime de trabalho inerente ao processo industrial no qual o motor é ligado e desligado inúmeras vezes em intervalos de tempo indeterminados.

consideração no momento da seleção do isolante e no projeto das bobinas. Essas sobretensões podem ocorrer de fase para fase, de espira para espira e espira para terra. O fenômeno chamado seguimento ocorre quando o sistema de isolamento de motores que operam com nível de tensão superior a 600 V, não está completamente protegido das interpéries do meio-ambiente. Já o *efeito corona* é resultado de uma descarga localizada proveniente de uma ionização de gases, o que resulta numa tensão excedida de um valor crítico (da ordem de 5 kV) na qual o sistema de isolamento pode ficar comprometido. Tensões transitórias reduzem a vida útil do enrolamento e são causadas por: curtos fase-fase, curtos fase-terra, curtos multifases para terra, curtos trifásicos, fusíveis limitadores de correntes, transferência rápida de barramentos, abertura e fechamento de circuitos com disjuntores, chaveamento de capacitor, falhas de isolamento e movimentações variáveis de frequência.

### **2.1.3. Esforços Mecânicos**

Esses esforços acontecem devido à movimentos da bobina e a choques entre o rotor e o estator.

No que concerne à movimentos da bobina, Siddique et al. (2005) destacam que a força magnética sobre as bobinas, provocadas pelas corrente nos enrolamentos do estator, é a máxima durante a partida do motor, causando a vibração das bobinas nas direções radial e axial. Este movimento pode causar danos à sua isolamento por afrouxar o material isolante dos condutores de cobre. Já o atrito entre rotor e estator pode ocorrer por inúmeras razões como defeitos nos rolamentos, deflexão do eixo, desalinhamento entre rotor e estator, etc. Se as batidas ocorrerem somente durante a partida, então, neste momento, a força do rotor pode causar laminações no estator, comprometer a isolamento da bobina, o que resulta num contato direto da bobina com a massa. Se a batida ocorre também quando o motor está à velocidade nominal, então, isto resulta num desgaste prematuro, por haver contato direto da bobina com a massa, causado pelo calor excessivo existente no atrito em questão.

### **2.1.4. Esforços/Contaminações Ambientais**

A presença de materiais inapropriados pode causar ao motor vários efeitos destrutivos como a redução na dissipação de calor, falhas prematuras nos

rolamentos e defeitos no sistema de isolamento. A solução é limitar o contato da superfície do motor com a umidade, produtos químicos e partículas estranhas.

## 2.2. Falhas no Rotor

O trabalho de Bonnett et al. (1988) afirma que a maioria das falhas ocorridas nos rotores são motivadas por uma combinação de esforços os quais eles são submetidos. Esses esforços podem ser sintetizados em seis grupos:

- 1) Térmicos
- 2) Magnéticos
- 3) Residuais
- 4) Dinâmicos
- 5) Mecânicos
- 6) Ambientais

Na sequência, explanaremos melhor sobre cada um deles.

### 2.2.1. Esforços Térmicos

Esses esforços são normalmente fáceis de identificar por causa da aparência do rotor, onde pontos quentes são visíveis nas extremidades. Entre as possíveis causas estão: sobrecarga térmica, desbalanço térmico, pontos quentes, direção incorreta da rotação e rotor bloqueado. Entre as principais consequências, está o fato de alguns rotores tornarem-se curvados diante da instabilidade térmica, e outros, apresentarem manchas ao longo de toda sua superfície.

### 2.2.2. Esforços Magnéticos

As falhas magnéticas, em geral, necessitam de uma observação cuidadosa para identificar com exatidão sua verdadeira causa. Entre as existentes, se destacam a sobretração do rotor, a tração magnética desnivelada, a saturação da laminação e as correntes parasitas.

A sobretração do rotor pode vir ou não acompanhada de um contato físico com o estator. Se isto ocorrer, os sinais podem ser barulho, vibração ou uma grave falha no enrolamento. Se o contato não acontecer, evidências limitam-se somente a ruído e vibração. Segundo Bonnett et al. (1988), o prolongamento excessivo da

sobretração do rotor resultará numa sobrecarga radial elevada nos rolamentos, com uma correspondente redução da sua vida útil.

A tração magnética desnivelada exhibe uma fricção típica numa pequena área do estator ao redor do diâmetro externo do rotor. Isto é causado pelo fato do eixo de rotação ser diferente do eixo magnético do enrolamento. Esta condição é detectada somente com medições cuidadosas. Saturação e correntes parasitas provocam um desempenho deficiente do motor e a melhor solução para estes problemas está no próprio processo de fabricação [Bonnett *et al.* 1988].

### **2.2.3. Falhas Dinâmicas**

Com raras exceções, falhas dinâmicas normalmente são originadas por forças externas e não estão disponíveis para análise após a remoção do motor para o conserto. Inspeccionar partes dos componentes, observar os acoplamentos, entre outras, são tarefas imperativas durante a investigação. Igualmente importante, pode ser a análise do histórico de funcionamento da unidade produtiva, bem como, conversas com operadores para saber o momento da ocorrência e o tempo de duração da falha. Entre as possíveis causas estão: vibração (externa ou interna), barras folgadas do rotor (interna), fricção do rotor (externa ou interna), torque transitório (externo), sobrevelocidade (externo) e esforços cíclicos (externo).

### **2.2.4. Falhas Mecânicas**

A causa exata desse tipo de falha é frequentemente difícil de se identificar porque a aparência da parte danificada se assemelha muito com falhas dinâmicas ou térmicas, por exemplo. Contudo, uma análise usual mais criteriosa revela evidências físicas típicas de problemas mecânicos, entre os quais estão: variações da carcaça; laminação e/ou barras folgadas; incorreto ajuste eixo-núcleo; fadiga ou ruptura de peças, geometria do estator e do rotor inapropriadas; desvios de materiais; montagem prática e/ou ressonância do eixo impróprias; e fabricação ou projeto inadequados.

Assim como em outras falhas, é importante inspeccionar todas as partes do motor e não somente o rotor, para se determinar a classe de falhas. Núcleo do rotor ou fricção do eixo são comuns devido ao eixo de rotação do rotor está deslocado inapropriadamente do centro magnético ou por componentes danificados do motor

e/ou por desalinhamento de cargas acopladas. Laminação ou barras folgadas normalmente resultam em ruídos seja durante a partida ou no funcionamento em regime. O movimento dessas partes pode levar a uma fadiga, pontos localizados, eixo inclinado, fricções do rotor, falhas no rolamentos ou enrolamentos, etc [Bonnett et al. 1988].

### **2.2.5. Falhas Ambientais**

Falhas deste tipo estão entre as mais fáceis de se diagnosticar, onde, para isso, é especialmente importante observar os registros de manutenção e as condições de operação para se ter um histórico completo que possa fornecer subsídios mais precisos. Entre as possíveis causas estão: contaminação, materiais abrasivos, partículas estranhas, ventilação restrita, temperatura ambiente excessiva e forças externas incomuns.

Essas falhas ocorrem frequentemente devido a mau uso da máquina ou a manutenções incorretas. Poeiras ou outros materiais podem obstruir filtros, passagens de ventilação ou de ar, causando sobreaquecimentos. Produtos químicos ou água podem entrar no motor atacando a superfície do rotor. Partículas estranhas ao penetrar no rotor danificam a sua superfície como também as pás do ventilador.

## **2.3. Falhas nos Rolamentos**

Rolamentos esféricos ou deslizantes (mancais) são usados em larga escala numa grande variedade de máquinas, onde estima-se que hoje haja bilhões em funcionamento. Embora sejam projetados para atuar até o fim da vida útil da máquina, falhas durante o seu funcionamento não são raras. As razões são as mais diversas [Hattangadi et al. 2005].

Segundo Hattangadi et al. (2005), os materiais usados nos rolamentos são sempre submetidos a níveis de esforços próximos dos seus limites e rendimentos nominais, porque todas as transmissões mecânicas se dão através deles. Ele afirma ainda, que nesses componentes, a causa mais comum para a falha é a fadiga do metal empregado, e que no cenário atual, falhas ocorrem principalmente devido a erros existentes, seja na seleção, na instalação, na utilização, na manutenção ou na fabricação dos rolamentos.

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

- Sobrecargas térmicas;
- Lubrificação inadequada ou excessiva;
- Contaminação;
- Carga excessiva (axial/radial combinadas);
- Vibração;
- Desalinhamento;
- Correntes de falta do eixo para terra;
- Manipulação ou montagem incorretas;
- Aplicação inadequada;
- Danos ocorridos durante o transporte ou o armazenamento.

Outro fator já conhecido que provoca o desgaste dos rolamentos é o acionamento do motor de indução por meio de inversores de frequência. Dentre as principais causas, podem ser citadas as correntes de modo comum que circulam pelos rolamentos em função da carga eletrostática induzida no eixo do motor e as oscilações de conjugado devido às barras quebradas no rotor ou em função dos harmônicos de corrente de baixa ordem presentes nos acionamentos que utilizam inversores.

As cargas induzidas no eixo do motor em função do chaveamento dos inversores, ao atingirem patamares suficientemente elevados, rompem a rigidez dielétrica da graxa isolante e provocam uma corrente de descarga para a carcaça aterrada, através do rolamento. Essa descarga deteriora tanto as pistas como as esferas deste, cujos malefícios são gradativamente acumulados e conduzem à sua inutilização. Outro fator são as perturbações do fluxo magnético, que fazem flutuar a frequência do rotor e, conseqüentemente, a rotação e a corrente do motor, gerando pulsações no conjugado desenvolvido pela máquina e tornando-se uma das causas da deterioração dos rolamentos. Por último, a operação do motor com velocidades próximas da nominal requer o funcionamento do inversor na região de sobremodulação, fazendo com que a interação de harmônicos ímpares de corrente induzam no rotor frequências que geram pulsações e reduções de conjugado, podendo provocar falhas no sistema mecânico de acionamento e instabilidade de sistemas de controle de torque [Araújo, 2011].

## **2.4. Conclusão**

Desta forma, observamos neste Capítulo, que as falhas mais comuns em motores de indução, decorrem de diversas causas, que vão desde de operação e manutenção inadequadas, passando por agentes externos, como sobrecargas e correntes de fuga, até a desgastes inerentes ao próprio funcionamento da máquina, como vibração e descargas elétricas internas. Vale reforçar que a maior parte dessas falhas situam-se normalmente no estator, no rotor ou nos rolamentos.

No capítulo seguinte, abordaremos sobre as técnicas de monitoramento e detecção de falhas mais usadas em motores de indução, com destaque para a MCSA e análise de fluxo magnético.



---

## Capítulo 3

# Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução

---

A chave para o sucesso da operação do motor está na qualidade de sua fabricação, na sua aplicação de forma correta e na sua manutenção adequada. Contudo, o uso de motores na indústria atualmente é extensivo deixando-os expostos a ambientes hostis, a má operação, a defeitos de fabricação, entre outros. Por isso, falhas internas (curto-circuito do bobinado, falta à terra, rolamentos gastos ou quebrados, barras do rotor quebradas) e externas (falta de fase, fonte assimétrica, sobrecarga mecânica, rotor bloqueado) são cada vez mais comuns, e causam uma degradação gradual no motor podendo resultar na sua parada se não forem encontradas à tempo [Chow, 2000]. O tempo que a máquina permanece parada e o custo associado ao reparo, representam gastos inconvenientes. Daí é sempre desejável descobrir a falha ainda em estágio inicial [Ballal 2007].

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

Neste capítulo estão expostas algumas técnicas existentes para detecção e diagnóstico usada em falhas incipientes em motores de indução. Existe um destaque especial para a lógica *fuzzy*, a qual será adotada nesse trabalho como a técnica destinada ao diagnóstico.

### 3.1. Técnicas de Detecção

Com o propósito de detectar as falhas nos motores de indução, muitos métodos foram desenvolvidos até então, envolvendo diferentes campos da ciência e tecnologia. Destacamos aqui, os seguintes:

1. Monitoramento por vibração;
2. Monitoramento por emissão acústica;
3. Monitoramento do campo magnético;
4. Monitoramento por temperatura;
5. Monitoramento por pulso de choque;
6. Monitoramento de flutuação de velocidade;
7. Monitoramento da assinatura elétrica;
8. Monitoramento de emissão de rádio-frequência;
9. Análise química.

Ballal et al. (2007) informa que cada um deles tem seus méritos e deméritos, enquanto Reis (2010) destaca as técnicas não-invasivas<sup>2</sup> como promissoras, devido a sua praticidade e baixo custo de implementação. A seguir, algumas dessas técnicas em detalhes.

#### 3.1.1. Análise de Assinatura de Corrente do Motor

Segundo Thompson et al. (2001), MCSA é uma técnica não-invasiva capaz de monitorar o motor em tempo real, e consiste na utilização dos resultados da análise espectral do sinal de corrente de uma das fases do estator. Quando uma falha está presente, o espectro da corrente de linha torna-se distinto em comparação com aquele que representa o motor saudável. Tais falhas modulam o entreferro e produzem frequências harmônicas girantes nas indutâncias próprias e mútuas da máquina. Desde que o fluxo concatenado oscile somente na frequência da fonte, aquelas indutâncias harmônicas produzem no estator uma corrente com harmônicas localizadas em cada lateral da frequência fundamental.

---

<sup>2</sup> As técnicas não-invasivas são aquelas baseadas em medições que não necessitam interromper nem desmontar o motor para a coleta de informações. Já as técnicas invasivas precisam ter acesso ao motor para coletar os dados necessários à análise.

A aquisição desse espectro acontece a partir da coleta do sinal da corrente no domínio do tempo com sua posterior transformação para o domínio da frequência, conforme a Figura 3.1.

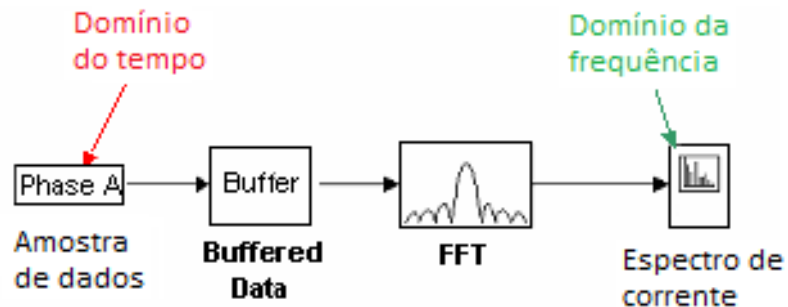


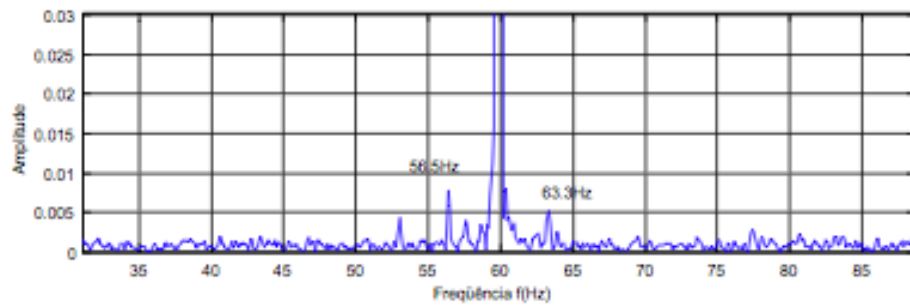
Figura 3.1 - Esquema para a determinação do espectro da corrente. Fonte: Gazzana et all. (2008).

Entre as possíveis falhas que a MCSA pode diagnosticar estão: assimetria do rotor, rotor desbalanceado, barras quebradas do rotor, danos nos rolamentos, curtos entre bobinas do estator e excentricidade do entreferro.

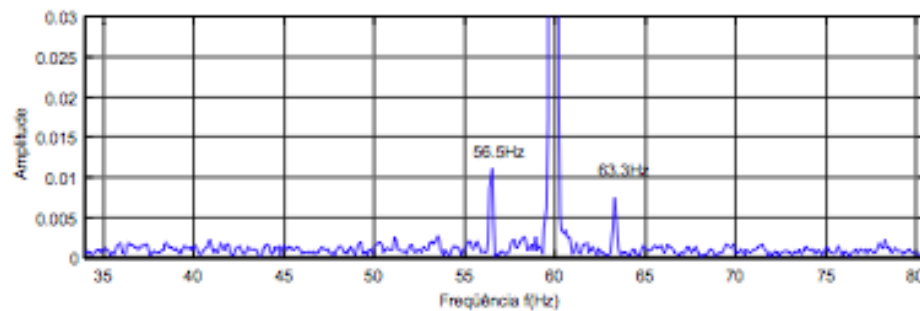
Quando uma assimetria está presente no rotor, a densidade de fluxo no entreferro é distorcida. Esta distorção gira à velocidade do eixo, gerando uma componente característica no espectro de frequência. No caso da excentricidade dinâmica que varia com a posição do rotor, o que acontece é uma oscilação no comprimento do entreferro, causando variações do fluxo ali existente, afetando a indutância instantânea da máquina e produzindo harmônicas na corrente do estator.

No caso da excentricidade do entreferro, há dois métodos para a detecção. No primeiro, monitora-se o comportamento das faixas laterais próximas da frequência de ranhura. Como desvantagem, existe a necessidade de conhecer aspectos construtivos da máquina. O segundo, consiste em monitorar o comportamento das faixas laterais em torno da frequência fundamental, o que pode suprir a deficiência do primeiro.

A detecção de barras quebradas acontece observando-se duas componentes em particular, ao redor da componente fundamental, igualmente espaçadas em  $2.f_s$ . No caso de ocorrer tal problema, as duas componentes apresentarão um leve acréscimo em suas magnitudes, conforme observado na Figura 3.2.



(a)



(b)

Figura 3.2 - Espectro de corrente do estator: (a) motor saudável; (b) motor com uma barra quebrada. Fonte: Bonaldi et al. (2002).

No caso de defeitos nos rolamentos, a formulação depende de suas dimensões físicas, e no caso de curto-circuitos nos enrolamentos do estator, existem componentes harmônicos específicos que caracterizam esta falha.

### 3.1.2. Análise de Campo Magnético

O diagnóstico de defeitos a partir da análise de fluxo magnético tem sido proposto por fabricantes de equipamentos da área de monitoramento de máquinas. Para tanto, se faz necessário a instalação de um sensor comercial e de um bobina de fluxo no motor. Entretanto, esta técnica tem sido pouco estudada de forma pouco profunda por pesquisadores. Em estudos preliminares já realizados, constataram-se algumas vantagens em relação às técnicas convencionais de análise de corrente, como por exemplo, a não necessidade do conhecimento da carga do motor e do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuito entre espiras [Brito, 2004].

Segundo Brito *et al* (2004), por definição, os motores elétricos produzem fluxo magnético. Qualquer pequeno desbalanceamento nesse fluxo ou no circuito elétrico, tem reflexão direta no fluxo transmitido axialmente. As principais causas da mudança de características da simetria são: barras quebradas do rotor, desequilíbrio de fases e anomalias nos enrolamentos do estator (curto entre espiras e curto entre fases).

A análise dos espectros de fluxo magnético é feita através da tendência de parâmetros específicos associados a cada tipo de falha. A inspeção de faixas espectrais em baixa frequência fornece informações sobre a condição do rotor, ao passo que em altas frequências, é possível avaliar as condições do estator. A Figura 3.3 mostra, por exemplo, o espectro de fluxo para o caso de um motor saudável e para o caso de um outro com barras quebradas.

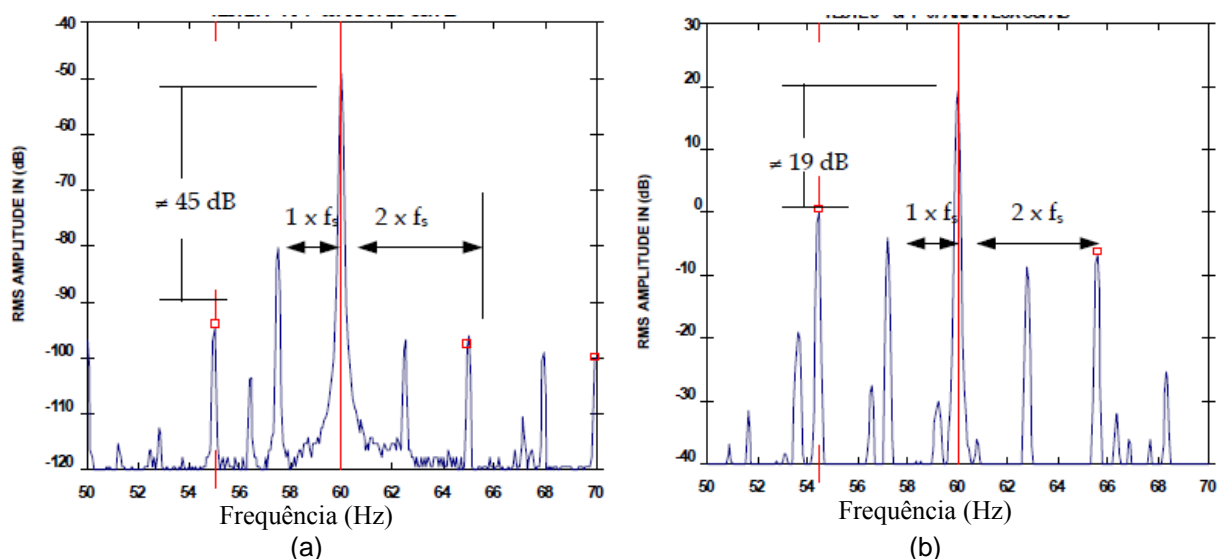


Figura 3.3 - Espectro de fluxo (bobina de fluxo: (a) motor saudável; (b) motor com 7 barras quebradas. Fonte: Brito et al. (2004).

### 3.1.3. Análise de Vibração

As máquinas são elementos mecânicos complexos e articulados. As peças que sofrem excitação podem oscilar e as oscilações se transmitem pelas articulações aos demais elementos acoplados. O resultado é um complexo de frequências que caracteriza o sistema. Cada vez que uma peça altera suas características mecânicas por desgaste ou trinca, uma componente de frequência do sistema será alterada. Havendo alteração no acoplamento entre as peças, altera-se o coeficiente de transmissão do sinal entre elas e, em consequência, a forma de frequência global do sistema.

Folgas, defeitos ou desalinhamentos de rolamentos ou mancais de máquinas rotativas refletem-se na alteração ou no surgimento de novas frequências. O desbalanceamento do rotor é transmitido pelo rolamento.

A premissa fundamental sobre a qual se baseia a análise de vibração como técnica aplicada à manutenção industrial é: cada componente ou cada tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação produz uma vibração de frequência específica que em condições normais de funcionamento, alcança uma amplitude máxima determinada [Marçal *et al* 2005]. Desta forma, é possível medindo-se e analisando-se a vibração, se estabelecer sua origem, identificar cada componente da máquina e o tipo de falha que a está gerando, além, de avaliar o estado mecânico do componente que a produz ou a gravidade da deficiência detectada.

O método de análise de frequências, baseado no Teorema de Fourier, estabelece que qualquer função periódica pode ser decomposta por uma série de ondas senoidais puras com frequências distintas e múltiplas harmônicas da frequência fundamental. Estas componentes constituem o espectro de frequência da vibração. Ao se utilizar transdutores sensores (acelerômetros) para a aquisição de tal parâmetro e posterior análise, o espectro de vibração de um sistema pode ser levantado. Observando-se a amplitude dos picos em determinadas frequências e relacionando-se as amplitudes observadas com as da frequência fundamental do sistema (rotativo), pode-se chegar a um diagnóstico do estado de funcionamento ou alterabilidade em curso do sistema [Marçal *et al.* 2005]. A Figura 3.4 mostra o espectro de vibração de um motor.

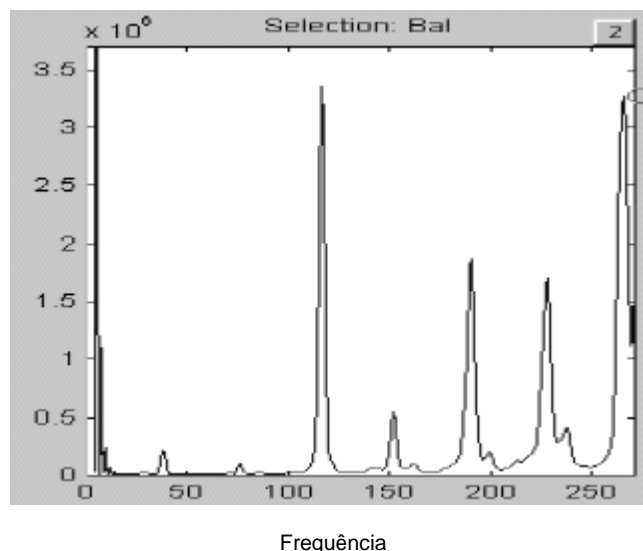


Figura 3.4 - Assinatura espectral de um sistema rotativo. Fonte: Marçal *et al.* (2005).

#### **3.1.4. Análise de Emissão Acústica**

O espectro de emissão de ruído no motor de indução restringe-se basicamente a três situações: excitação eletromagnética, ventilação e ruídos acústicos.

O ruído de ventilação está associado com a turbulência no ar, o qual produz distúrbios periódicos no ar pressurizado devido ao contato com as partes rotativas. O ruído por excitação eletromagnética ocorre devido aos esforços que atuam na superfície do ferro em decorrência do campo magnético, o que provoca vibrações na estrutura do estator, irradiando ruídos. Os ruídos acústicos são inerentes ao próprio funcionamento do motor, por causa do atrito das partes mecânicas e da sua aerodinâmica.

#### **3.1.5. Análise da Velocidade Angular Instantânea**

Vários problemas de assimetria do motor podem ser detectados monitorando-se a vibração do núcleo do estator usando a técnica de medição de velocidade angular instantânea. No caso particular de falhas no enrolamento do estator ou de fontes desbalanceadas, o sinal de vibração conterá uma componente significativa duas vezes maior que a frequência da fonte.

Além das técnicas de monitoramento aqui apresentadas, devemos ter em mente que os recursos para acompanhar o desempenho do motor de indução não parecem ter limites. Siddique et al. (2005), por exemplo, demonstram que, para falhas no estator, existem ainda outras técnicas como: torque no entreferro, tensões induzidas, medição de potência, descargas parciais, análise de gases, teste de impulso e análise do circuito equivalente.

### **3.2. Técnicas para Diagnóstico**

Métodos avançados de supervisão e gerenciamento de falhas são embasados por processos de *detecção* e *diagnósticos* que se fundamentam, respectivamente, pela coleta de variáveis mensuráveis por meio de instrumentos, e pelo seu acompanhamento feito por operadores humanos. Isto quer dizer que, em se tratando de um processo automatizado, ele não deve se limitar somente à medição de variáveis em tempo real, mas requer também, conhecimento analítico do processo e a análise da evolução das variáveis medidas deve ser realizada por um

perito experiente com um vasto conhecimento, o qual chamamos de conhecimento heurístico [Isermann 2006].

Assim, qualquer sistema concebido para encontrar falhas terá que ter as duas etapas: detecção e diagnóstico. Para a detecção, discutida nas seções anteriores, faz-se necessária apenas a medição de parâmetros por meio de instrumentos/equipamentos apropriados para tal atividade.

No entanto, somente leitura e histórico de parâmetros, pouco adianta se não houver quem saiba interpretá-los e fazer a distinção entre a existência ou não de uma falha, ou informar que se trata de um curto-circuito no estator, ou invés de uma barra quebrada no rotor, por exemplo. Esta tarefa, pode, perfeitamente, ser desempenhada por um operador, de preferência experiente, que detenha conhecimentos sobre os métodos de detecção de falhas (temperatura, assinatura elétrica, emissão de rádio-frequência, etc.). Contudo, em um mundo cada vez mais informatizado e com a automação cada vez mais presente na indústria, na tentativa de se obter respostas com mais agilidade, confiabilidade e exatidão, é de se esperar que para situações como esta sejam requeridos sistemas inteligentes<sup>3</sup>.

Segundo Isermann (2006), o diagnóstico de falhas é baseado na observação analítica e heurística dos sintomas e no conhecimento heurístico do processo, os quais podem ser extraídos a partir da modelagem de sinais ou a partir da modelagem do próprio processo. Neste contexto, técnicas baseadas em Inteligência Artificial<sup>4</sup> se mostram promissoras no campo do diagnóstico de falhas, entre as quais destacam-se: as redes neurais artificiais, a lógica *fuzzy*, sistemas *neuro-fuzzy* e algoritmos genéticos. Conforme visto no capítulo 1, já existem diversos trabalhos que contemplam essas técnicas, seja de forma isolada ou através de combinações entre duas ou mais, entretanto, as RNAs destacam-se por estarem presentes em um número mais expressivo de publicações.

No entanto, este trabalho propõe que a supervisão e o gerenciamento de falhas em motores de indução seja feita através do diagrama fasorial de tensão e de

---

<sup>3</sup> São sistemas que fornecem respostas que solucionam problemas, mesmo que sejam novas ou inesperadas, fazendo com que tal comportamento seja “único” ou até mesmo considerado como “criativo”.

<sup>4</sup> É uma disciplina que estuda como as pessoas resolvem problemas e como as máquinas podem emular este comportamento humano de “soluções de problemas”. Em outras palavras, como fazer com que as máquinas sejam mais atribuídas de características da inteligência humana.

corrente e da velocidade do motor (detecção) em conjunto com a lógica *fuzzy* (diagnóstico). As justificativas, para o uso da lógica *fuzzy* encontram-se adiante.

### 3.2.1. Lógica Fuzzy

Até o presente momento, existe um grande descompasso entre a capacidade criativa dos seres humanos e a possibilidade de solução que as máquinas computacionais proporcionam, devido ao fato de que as pessoas raciocinam de forma incerta, imprecisa, difusa ou nebulosa, enquanto que as máquinas e computadores são movidas por raciocínio preciso e binário. Esse raciocínio típico do ser humano é chamado, em inglês, de “*fuzzy*”, e podemos entendê-la como sinônimo de incerto, impreciso, difuso ou nebuloso.

Shaw & Simões (1999) definem a lógica *fuzzy* (também referida como lógica *nebulosa* e em alguns casos por *teoria de possibilidades*) como sendo uma técnica que incorpora a forma humana de pensar, em diversas aplicações, como controle automático, ajuste de foco em câmeras, entre outros. A característica especial da lógica *fuzzy* é a de representar uma forma inovadora de manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da *teoria de probabilidades*. Em outras palavras, ela provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos. Isso abre as portas para se converter a experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo enfoque *fuzzy* tem um imenso valor prático, na qual se torna possível a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos.

Um típico controlador *fuzzy* pode ser projetado para comportar-se conforme o raciocínio *dedutivo*<sup>5</sup>. Por exemplo, operadores humanos podem controlar processos industriais e plantas com características não-lineares e até com comportamento dinâmico pouco conhecido, através da experiência e inferência de relações entre as variáveis do processo. A lógica *fuzzy* pode capturar esse conhecimento em um

---

<sup>5</sup> É o raciocínio que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem, ou seja, por esse raciocínio, conclui-se sobre um particular, a partir de um geral.

controlador *fuzzy*, possibilitando a implementação de um controlador computacional com desempenho equivalentes ao do operador humano.

Outra forma de raciocínio é o *indutivo*<sup>6</sup>, que também pode ser utilizado no projeto de controladores *fuzzy*, onde seria possível o aprendizado e a generalização através de exemplos particulares provenientes da observação do comportamento do processo numa situação dinâmica, ou variante no tempo. Esse enfoque é geralmente referido como controle *fuzzy* “aprendiz” ou então como controle *fuzzy adaptativo*.

Vantagens significativas podem ser obtidas desses sistemas que podem aprender com a experiência, de tal forma que quando uma situação é encontrada repetidamente, estes sistemas saberão como gerenciar o problema. Os sistemas *fuzzy* adaptativos podem se ajustar às mudanças no ambiente devido à sua habilidade de aprender e explicar seu raciocínio, além de poderem ser modificados e estendidos. Tal equilíbrio entre a aprendizagem por exemplos e a codificação do conhecimento humano explícito, fazem com que tais sistemas sejam muito robustos, extensíveis e passíveis de serem aplicados em uma larga gama de problemas.

A teoria *fuzzy* pode também ser agregada aos sistemas de redes neurais, os chamados sistemas *neurofuzzy*, que aumentam a capacidade de aprendizado através de interface com dados numéricos. Informações vagas, incertezas, qualitativas, comunicações verbais, capacidade de aprendizado e de formulação de estratégias de tomadas de decisão são características humanas, portanto, a teoria *fuzzy*, as redes neurais e redes *neurofuzzy* são frequentemente referidas como *inteligentes*.

O sucesso mundialmente reconhecido de sistemas de modelagem e controle em aplicações industriais, baseados em lógica *fuzzy*, tem comprovado sua utilização como mais uma ferramenta (ou tecnologia) para as disciplinas de engenharia de controle industrial, manufatura, comunicação homem-máquina e em sistemas de tomadas de decisão [Shaw e Simões, 1999]. Essa constatação corrobora com a nossa escolha pela lógica *fuzzy*.

---

<sup>6</sup> Nesse raciocínio, infere-se uma conclusão sobre o geral, com base no particular.

### 3.3. Conclusão

Através deste capítulo, verificamos que existem técnicas de diferentes naturezas para monitorar, detectar e diagnosticar falhas em motores de indução, onde em cada uma delas, são necessários equipamentos específicos para tal fim. Entre as técnicas destinadas à deteção, destaca-se a MCSA por ser aplicável a diferentes tipos falhas. Neste contexto, a Análise de Campo Magnético e a Análise de Vibração também aportam como ferramentas bastante difundidas. Entre as técnicas para diagnóstico, foi focado as características da lógica *fuzzy* que justificaram a sua escolha para a realização desse trabalho.

No próximo capítulo, trataremos sobre a modelagem do motor elétrico de indução trifásico. Na ocasião, enfocaremos: os modelos matriciais trifásicos e bifásicos de modelagem existentes na literatura; o circuito equivalente; a influência da existência de algumas falhas no motor sobre o seu comportamento dinâmico; e resultados obtidos com a simulação da máquina de indução adotada para este trabalho.



---

# Capítulo 4

## Modelagem do Motor de Indução Trifásico

---

Neste capítulo, é feita uma abordagem sobre o modelo matemático do motor elétrico de indução trifásico. Esta apreciação se faz necessária uma vez que proporciona uma melhor compreensão sobre o funcionamento dinâmico da máquina e nos ajuda a visualizar a influência das falhas sobre seus parâmetros de saída. Aqui, são abordados os procedimentos escolhidos para simulação, as equações elétricas e mecânicas, o circuito equivalente e o efeito das falhas sobre os parâmetros da máquina.

### 4.1. Modelo do Motor de Indução Trifásico

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

O comportamento dinâmico é obtido baseado no conhecimento da estrutura construtiva do motor, onde é possível representá-lo através de um circuito equivalente, e conhecer os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos envolvidos.

Na literatura, existem distintos procedimentos para a modelagem de uma máquina de indução, diferenciando-se pela notação matemática aplicada a cada um deles, isto é, a maneira como ocorrem as simplificações aplicadas à estrutura construtiva ou de análise do motor de indução. Neste trabalho, em especial, utilizaremos a Notação Matricial Ortogonal  $dq0$  ou  $\alpha\beta0$  [Reis, 2010].

Serão adotadas também, algumas hipóteses e considerações, facilmente encontradas na literatura, que objetivam simplificar matematicamente a máquina, de modo a tornar viável a simulação, uma vez que sem elas, a modelagem tornaria-se bastante complexa. São elas:



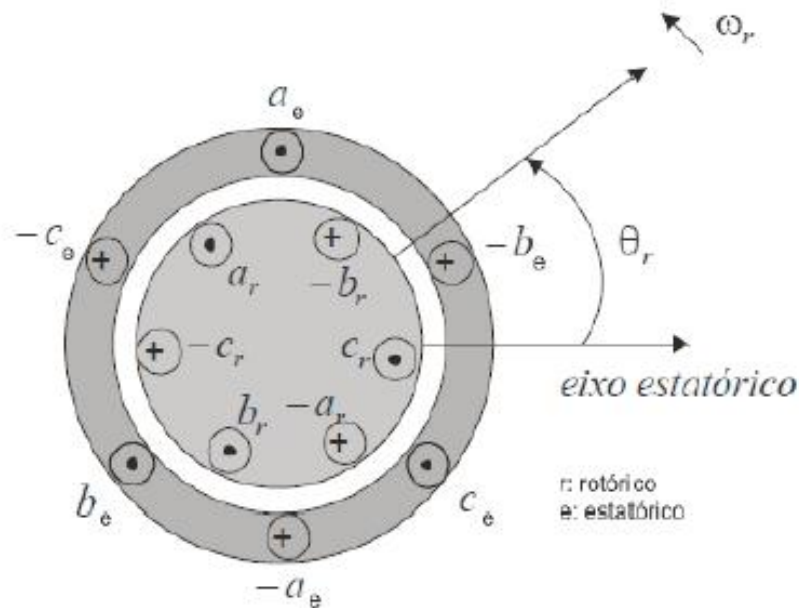


Figura 4.2 – Modelo idealizado para uma máquina de indução trifásica. Fonte: Ong (1998).

### Equações do Sistema Elétrico

A partir da figura 4.2 são postuladas seis equações de tensão que descrevem o comportamento das grandezas por fase, tanto do estator quanto do rotor, e também, das relações entre elas. Os duplos índices nelas presentes, representam, respectivamente, as grandezas de fluxo e de corrente do estator referida ao estator e de rotor referida ao rotor [Ong 1998].

$$\begin{aligned} v_{as} &= r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \\ v_{bs} &= r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \\ v_{cs} &= r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} v_{ar} &= r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \\ v_{br} &= r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \\ v_{cr} &= r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Onde:

- $v_{as}$  é a tensão do estator na fase  $a$ ;
- $v_{bs}$  é a tensão do estator na fase  $b$ ;

- $v_{cs}$  é a tensão do estator na fase  $c$ ;
- $i_{as}$  é a corrente do estator na fase  $a$ ;
- $i_{bs}$  é a corrente do estator na fase  $b$ ;
- $i_{cs}$  é a corrente do estator na fase  $c$ ;
- $\lambda_{as}$  é o fluxo magnético do estator na fase  $a$ ;
- $\lambda_{bs}$  é o fluxo magnético do estator na fase  $b$ ;
- $\lambda_{cs}$  é o fluxo magnético do estator na fase  $c$ ;
- $r_s$  é a resistência do estator;
- $v_{ar}$  é a tensão do rotor na fase  $a$ ;
- $v_{br}$  é a tensão do rotor na fase  $b$ ;
- $v_{cr}$  é a tensão do rotor na fase  $c$ ;
- $i_{ar}$  é a corrente do rotor na fase  $a$ ;
- $i_{br}$  é a corrente do rotor na fase  $b$ ;
- $i_{cr}$  é a corrente do rotor na fase  $c$ ;
- $\lambda_{ar}$  é o fluxo magnético do rotor na fase  $a$ ;
- $\lambda_{br}$  é o fluxo magnético do rotor na fase  $b$ ;
- $\lambda_{cr}$  é o fluxo magnético do rotor na fase  $c$ ;
- $r_r$  é a resistência do rotor.

As equações 4.1 e 4.2 são chamadas, respectivamente, de equações de tensão do estator e do rotor. Nelas, estão presentes os termos de fluxo que representam o fluxo total concatenado por fase. Este fluxo total é constituído pelas contribuições de três fluxos, representados pelas indutâncias próprias do estator e do rotor, as indutâncias de dispersão do estator e do rotor e as indutâncias mútuas entre fases do enrolamento do estator e do rotor. A partir das considerações que os enrolamentos do estator e rotor são iguais por fase, têm-se que as indutâncias próprias do estator e do rotor são iguais. Deste mesmo fundamento, conclui-se que as indutâncias mútuas do estator e rotor também são constantes. Assim, as indutâncias próprias do motor e as indutâncias mútuas são dadas por:

$$\begin{aligned}
 L_s &= L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} \\
 L_r &= L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} \\
 L_{sm} &= L_{smab} = L_{smbc} = L_{smca} \\
 L_{rm} &= L_{rmab} = L_{rmbc} = L_{rmca}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

sendo que  $L_s$  e  $L_r$  representam, respectivamente, as indutâncias próprias do estator e do rotor e  $L_{sm}$  e  $L_{rm}$  representam, respectivamente, as indutâncias mútuas entre as fases do estator e do rotor. Além das indutâncias próprias e mútuas do estator e rotor, têm-se as indutâncias entre as fases do estator e as do rotor. Estas indutâncias são dependentes da posição do rotor, ou seja, do ângulo rotórico  $\theta_r$ . Assim, para essas indutâncias, têm-se em notação matricial a equação 4.4.

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

sendo que  $L_{sr}^{abc}$  representa as indutâncias mútuas das fases do estator em relação ao rotor e  $L_{rs}^{abc}$  representa as do rotor em relação ao estator.

Definindo as indutâncias próprias dos enrolamentos do rotor e do estator em representação matricial, têm-se as submatrizes mostradas nas equações 4.5 e 4.6.

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Onde:

- $L_{ls}$  é a indutância de dispersão do estator por fase;
- $L_{ss}$  é a indutância própria do estator por fase;
- $L_{lr}$  é a indutância de dispersão do rotor por fase;
- $L_{rr}$  é a indutância própria do rotor por fase;
- $L_{ss}^{abc}$  representa a submatriz de indutâncias do enrolamento do estator;
- $L_{rr}^{abc}$  representa a submatriz de indutâncias do rotor.

Desta forma, os fluxos concatenados totais dos enrolamentos do estator e do rotor estão descritos, em notação matricial, na Equação 4.7, onde as correntes e os fluxos são dados conforme as Equações 4.8.

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \lambda_s^{abc} &= [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}]^t \\ \lambda_r^{abc} &= [\lambda_{ar} \quad \lambda_{br} \quad \lambda_{cr}]^t \\ i_s^{abc} &= [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t \\ i_r^{abc} &= [i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]^t \end{aligned} \quad (4.8)$$

Onde:

- $\lambda_s^{abc}$  é o fluxo magnético concatenado total do estator;
- $\lambda_r^{abc}$  é o fluxo magnético concatenado total do rotor;
- $i_s^{abc}$  é a corrente total do estator;
- $i_r^{abc}$  é a corrente total do rotor.

A máquina idealizada é descrita por seis equações diferenciais de primeira ordem, uma para cada enrolamento. Estas equações diferenciais são acopladas uma à outra através de indutâncias mútuas entre os enrolamentos. Em particular, os termos de acoplamento estator-rotor são dependentes da posição rotórica; assim, quando o rotor gira, estes termos de acoplamento variam com o tempo [Ong 1998].

#### 4.1.2. Notação Matricial Trifásica – Modelo $qd0$

Transformações matemáticas como o modelo  $qd0$  facilitam a computação de soluções em regime transitório do modelo de máquina descrito acima, por converter equações diferenciais com indutâncias variando com o tempo, em equações com indutâncias constantes. Para tanto, a máquina é assumida com um entreferro simétrico [Ong 1998].

O modelo  $qd0$  consiste em modelar a máquina de indução trifásica como sendo um motor de corrente contínua. Para isso, o modelo matricial ABC é convertido para um sistema de dois eixos  $q$  e  $d$  conforme a figura 4.3, onde o eixo  $qd0$  movimenta-se a uma velocidade  $\omega$  em relação ao eixo  $abc$  quando se trata de uma referência arbitrária.

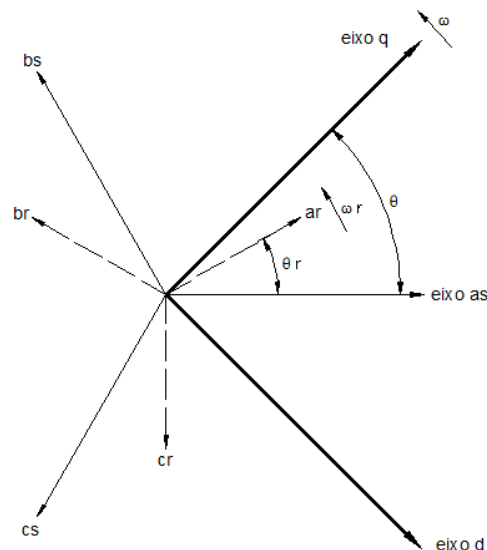


Figura 4.3 – Movimentação relativa entre os eixos *abc* e *qd0* para uma referência arbitrária. Fonte: Ong (1998).

A transformação de equações do modelo *abc* para o modelo *qd0* ocorre por meio da equação 4.9:

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qdo}(\theta)] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

onde as variáveis  $f$  podem ser representadas por tensões, correntes ou fluxos concatenados da máquina. Observando-se a figura 4.3, o ângulo  $\theta(t)$ , entre o eixo  $q$  de referência movimentando-se a uma velocidade  $\omega$  em relação ao eixo estacionário do bobinado  $a$  do estator, pode ser calculado de acordo com a equação 4.10:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad (4.10)$$

Do mesmo modo, o ângulo do rotor  $\theta_r(t)$ , formado entre o eixo  $a$  do estator e o rotor que gira a uma velocidade rotórica  $\omega_r(t)$  pode ser expresso como:

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (4.11)$$

Os ângulos  $\theta(0)$  e  $\theta_r(0)$ , são os valores iniciais de ângulos no domínio do tempo  $t$ .

O termo  $[T_{qdo}(\theta)]$  da equação 4.9, é na verdade, a matriz de transformação da Transformada de Park, isto é, ela pode ser reescrita através da equação 4.12:

$$[T_{dq0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

De modo semelhante, quando houver variáveis do modelo  $qd0$  que se deseje obter no modelo  $abc$ , deve-se utilizar a Transformada Inversa de Park que pode ser visualizada através da equação 4.13:

$$[T_{dq0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Deste modo, as equações de tensão e de fluxo concatenado obtidas no modelo  $abc$  podem agora, serem convertidas em função da referência  $qd0$  por meio das equações 4.9 e 4.12, juntamente com as manipulações matemáticas convenientes. Assim, as equações de tensão 4.1 e 4.2, respectivamente, passam a serem representadas pelas equações 4.14 e 4.15. As equações de fluxo concatenado formada por 4.7 e 4.8, serão substituídas pela equação 4.16.

$$\begin{aligned} v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \\ v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \\ v_{0s} &= r_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} v'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \\ v'_{dr} &= r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \\ v'_{0r} &= r'_r i'_{0r} + \frac{d\lambda'_{0r}}{dt} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

O torque eletromagnético desenvolvido no eixo do motor, representa a energia convertida em trabalho mecânico dividido pela velocidade mecânica ao longo do tempo. Para o modelo  $qd0$  a equação do torque eletromagnético pode ser escrita como:

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (4.17)$$

Onde  $P$  representa a número de pólos da máquina. Assim, as equações 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 formam as equações do sistema elétrico do motor.

### Equação do Sistema Mecânico

A modelagem do motor de indução se completa com a equação do sistema mecânico. A equação de movimento do rotor retrata sua aceleração em função do momento de inércia e dos torques existentes.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} - T_c - T_D \quad (4.18)$$

onde  $J$  é o momento de inércia,  $\omega_r$  é a velocidade do rotor,  $T_{em}$  é o torque eletromagnético,  $T_c$  é o torque de carga aplicada e  $T_D$  é o torque de inércia total.

## 4.2. Influência das falhas nos parâmetros do motor de indução

A forma mais fácil de se compreender o funcionamento do motor de indução é através do seu circuito equivalente. Dentre os modelos presentes na literatura, nesse trabalho, a representação de circuito equivalente considerada é a advinda do conceito de transformadores. Devido à indução magnética mútua entre o estator e o rotor, o motor de indução é considerado um sistema magneticamente acoplado como no caso dos enrolamentos do transformador primário e secundário. Dessa forma, o circuito equivalente do motor de indução é bastante semelhante ao de um transformador elétrico. Podemos visualizá-lo através da figura 4.4, a qual trás o modelo simplificado.

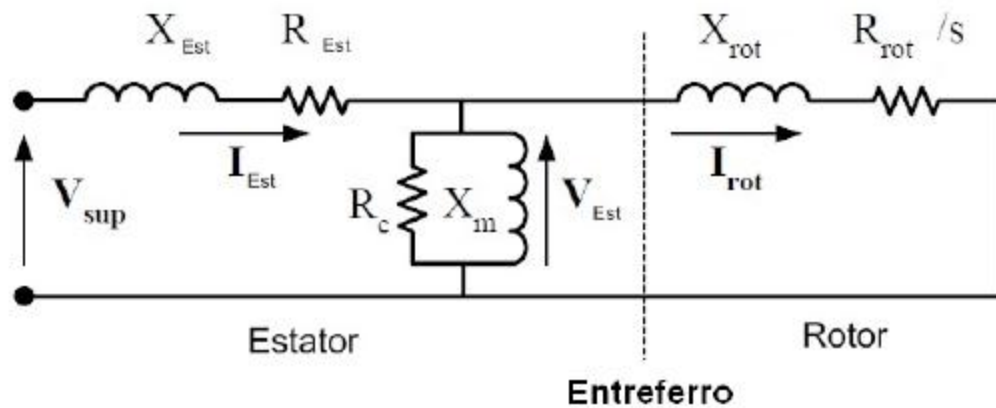


Figura 4.4 – Circuito equivalente simplificado por fase do motor de indução.

Os parâmetros do circuito são:

- $V_{est}$  - Tensão de fase no estator;
- $V_{sup}$  - Tensão gerada pelo fluxo resultante no entreferro;
- $I_{est}$  - Corrente elétrica de enrolamento do estator;
- $X_{est}$  - Reatância de dispersão do estator;
- $R_c$  - Resistência elétrica de perda;
- $X_m$  - Reatância de magnetização;
- $I_{rot}$  - Corrente elétrica de enrolamento do rotor referida ao lado do estator;
- $X_{rot}$  - Reatância de dispersão do enrolamento do rotor referida ao estator;
- $R_{rot}$  - Resistência elétrica do enrolamento do rotor referida ao estator;
- $s$  - Escorregamento do motor.

O comportamento dinâmico do motor de indução é mais bem compreendido a partir da análise do seu circuito equivalente como também das equações elucidadas na seção anterior. Dentro do foco desse trabalho, conforme exposto no capítulo 2, em virtude do grande número de incidência, as falhas estudadas aqui serão: barras quebradas no rotor, curto-circuito nas espiras do estator e defeito nos rolamentos. Assim, é importante analisar qual(is) parâmetro(s) é(são) afetado(s) no momento da ocorrência de uma dessas falhas.

#### 4.2.1. Influência de barras quebradas no rotor

Conforme visto anteriormente, existem diversos fatores (mecânicos e elétricos) que provocam defeitos nos rotores. A existência desses defeitos provoca

um distúrbio nos valores de resistência e de indutância rotóricas [Reis 2010]. Algumas, resultam no aumento de valores, e outras, na queda, tomando-se como base o valor padrão da máquina.

A magnitude da influência de barras defeituosas no motor pode ser obtida considerando que o rotor é trifásico e composto por  $N$  barras e que a resistência de uma barra é representada por  $r_b$ , logo:

$$r_r \propto \frac{r_b}{\frac{N}{3}} \quad (4.19)$$

O incremento do valor de resistência rotórica é dado por:

$$\Delta R = 3r_r \frac{n}{N-3n} \quad (4.20)$$

As barras de cobre presentes no rotor em gaiola estão dispostas – do ponto de vista elétrico - em paralelo, umas em relação às outras. No caso da ocorrência de quebra de uma delas significa que um dos ramos ficará em aberto, logo, fazendo-se uma análise de circuito, concluímos que a resistência e a reatância totais aumentam de valor.

Portanto, quando houver barras quebradas haverá aumento de resistência e de reatância rotórica<sup>7</sup>.

#### 4.2.2. Influência de curto-circuito no estator

As falhas estatóricas apresentam comportamento semelhante ao que ocorre no rotor, ou seja, elas incidem sobre os valores de resistência e indutância no estator.

No caso de um curto-circuito entre espiras, ou entre bobinas, por exemplo, haverá uma redução no tamanho do bobinado como um todo. As equações 4.21 e 4.22 auxiliam na compreensão.

$$\Delta r = \rho \frac{\Delta l}{A} \quad (4.21)$$

$$\Delta l = \frac{\Delta l_b}{\mu \cdot A_b} \quad (4.22)$$

---

<sup>7</sup> Embora o terminologia *barras* seja uma característica típica de um motor com rotor em gaiola, esta análise se estende também para motores com rotor bobinado, onde, as barras são substituídas por enrolamentos ligados a um reostato. Isto é, há também um aumento na impedância rotórica.

onde  $\rho$  é a resistividade do material da bobina,  $\Delta l$  é a variação do comprimento do fio,  $A$  é área da seção transversal do fio,  $\Delta l_b$  é a variação do tamanho da bobina,  $\mu$  é a permeabilidade do material do entreferro e  $A_b$  é a área da seção da bobina.

Portanto, na redução de espiras de uma bobina haverá uma redução no valor de resistência e de indutância na mesma magnitude.

### 4.2.3. Influência de defeitos nos rolamentos

No capítulo 2 foram enumeradas as causas mais comuns que prejudicam o desempenho do rolamento do motor de indução. Independentemente da causa, o fato é que, problemas nos rolamentos, afetam a transmissão mecânica de potência e o motor terá que desempenhar um torque eletromagnético maior para vencer o aumento de atrito entre o eixo e os rolamentos.

Uma maneira de simular esta falha é alterar o torque de inércia total  $T_D$ , presente na equação 4.18. Isto é conseguido variando-se o valor do coeficiente de atrito  $D$  da máquina.

$$T_D = D \cdot \omega_r \quad (4.23)$$

Assim sendo, o defeito nos rolamentos reflete num aumento do coeficiente de atrito.

## 4.3. Simulação do motor de indução

Neste trabalho, o motor de indução é simulado conforme o fluxograma da figura 4.5. A excitação da máquina se dá por meio de uma fonte de tensão constante. O programa elaborado em MATLAB<sup>®</sup>, necessita de informações de entrada como dados da rede e do motor.

No caso da rede, são necessários informar a tensão de linha e a frequência, quanto ao motor, são requisitados parâmetros do circuito equivalente, potência mecânica acoplado ao eixo, coeficiente de atrito, momento de inércia, número de pólos e tipo de ligação no bobinado do estator.

Os sinais de tensão provenientes do sistema trifásicos são convertidos para o modelo  $qd0$  através da equação 4.12. Os dados de entrada são então processados no domínio do tempo, pelas equações 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18. O comportamento dinâmico do motor é acompanhado pela saída de grandezas como

torque eletromagnético, velocidade do rotor, potência útil, além das correntes do estator e do rotor, as quais são obtidas com o auxílio da Transformada Inversa de Park.

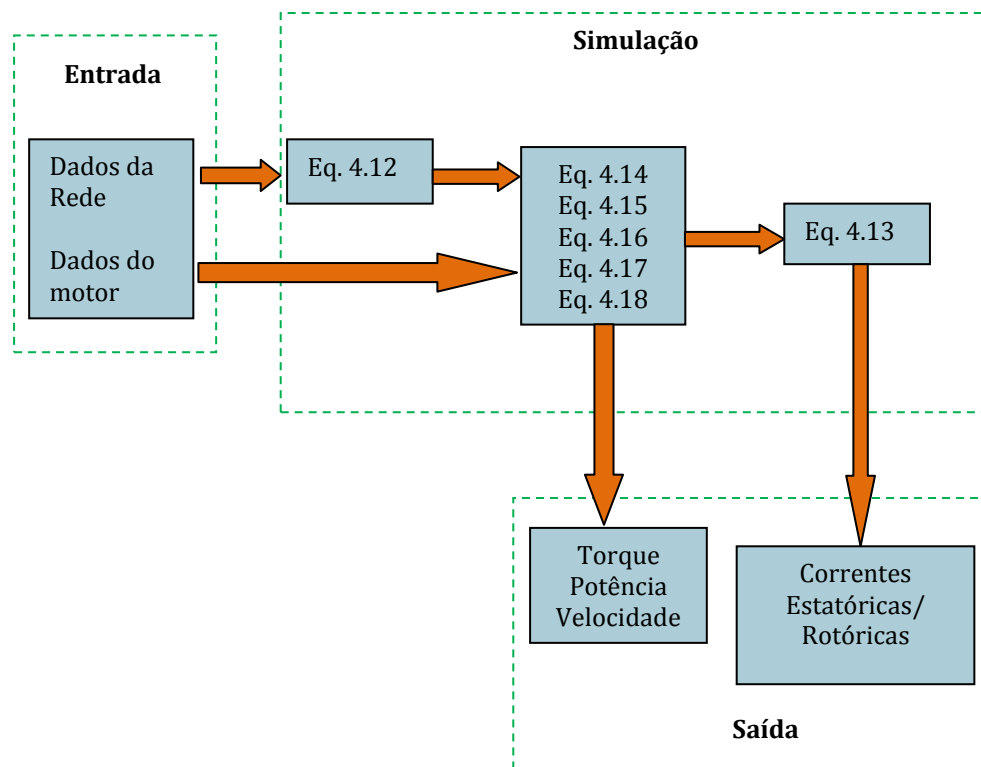


Figura 4.5 – Fluxograma da simulação do motor de indução.

O motor simulado nesse trabalho, foi o motor da Tabela 4.1, cujo o comportamento dinâmico pode ser acompanhado através das Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Vale ressaltar que a máquina foi simulada com carga nominal e sem defeitos.

Tabela 4.1 – Valores nominais do motor.

Variável	Valor
Potência	1 HP
Resistência do estator	3,35 $\Omega$
Resistência do rotor	1,99 $\Omega$
Indutância de Dispersão do estator	6,94 mH
Indutância de Dispersão do rotor	6,94 mH
Indutância de Magnetização	163,73 mH
Frequência	60 Hz
Número de Pólos	4
Momento de Inércia	0,1 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficiente de Fricção	0,001 N.m.s/rad
Tensão de Fase	200 V
Velocidade	1800 rpm
Ligação	Estrela

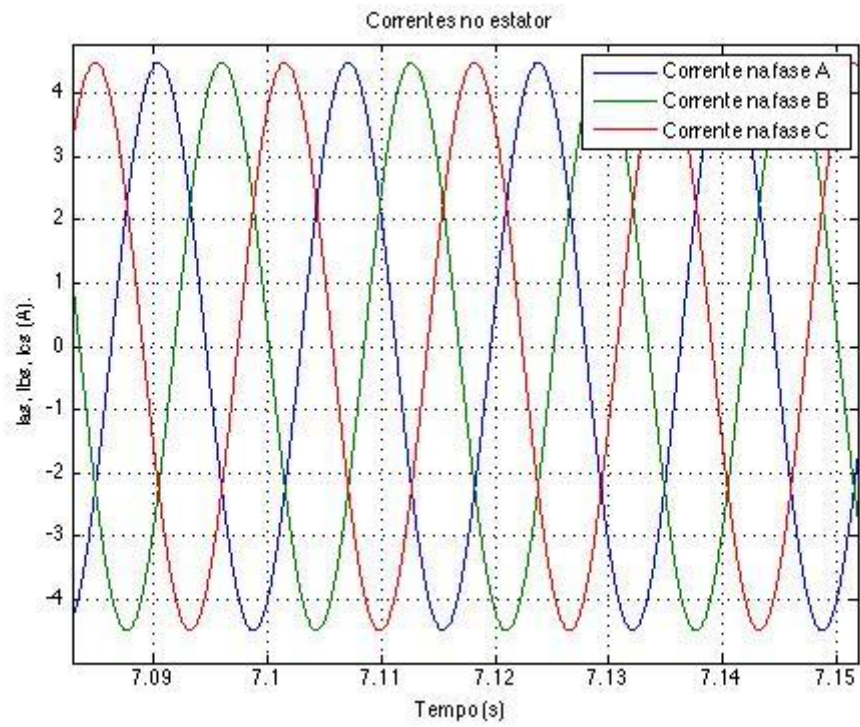


Figura 4.6 – Correntes no estator do motor de indução.

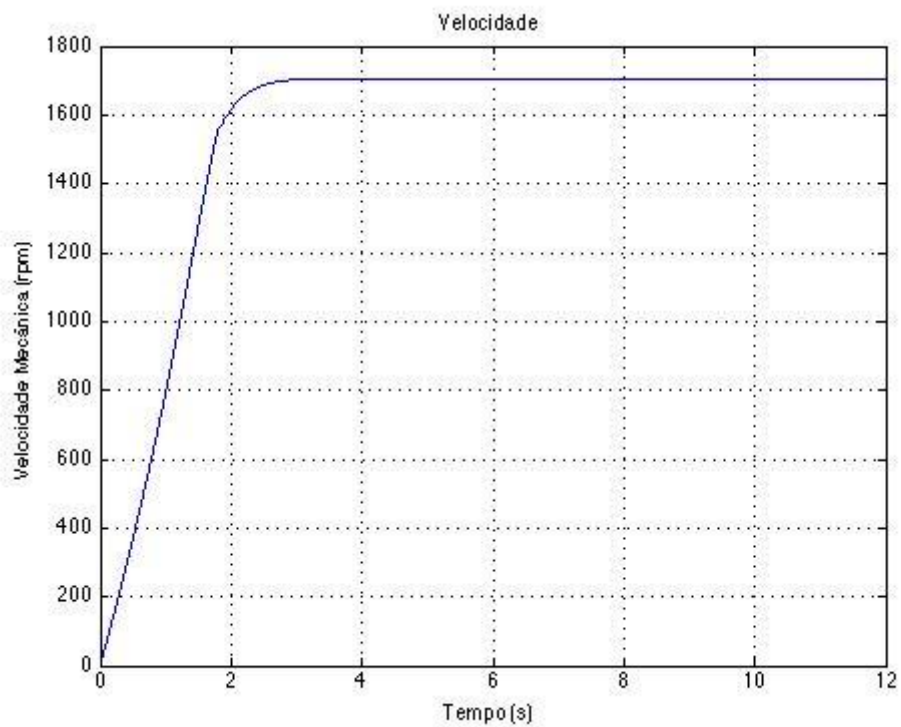


Figura 4.7 – Velocidade do motor de indução.

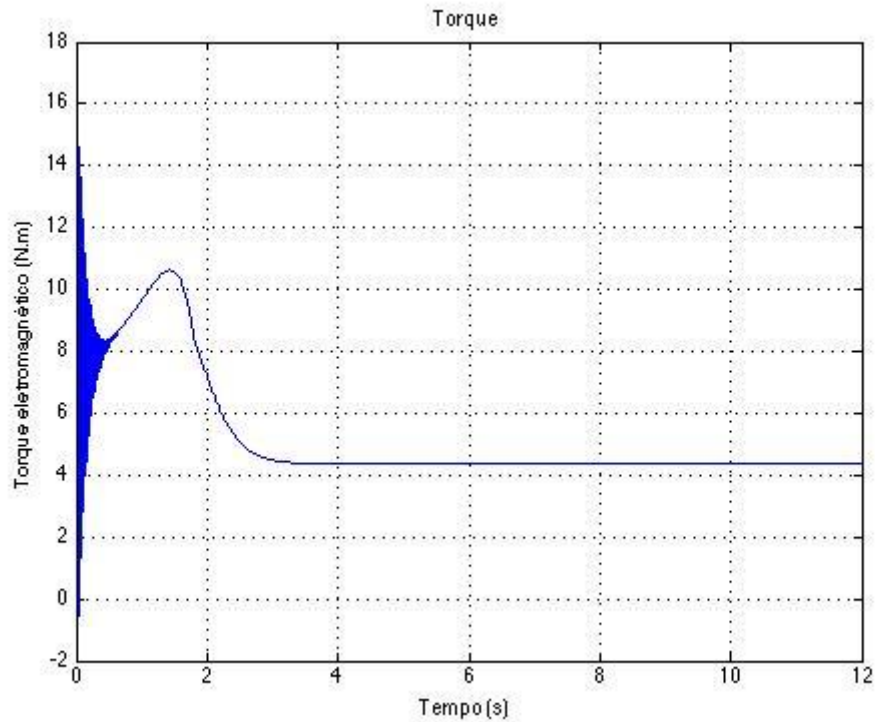


Figura 4.8 – Torque eletromagnético do motor de indução.

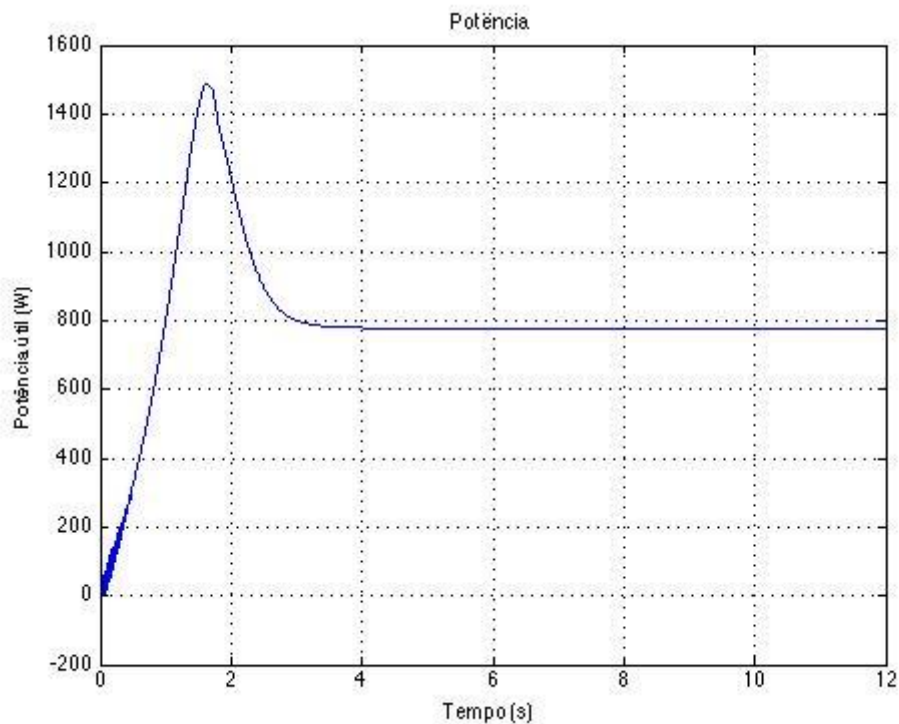


Figura 4.9 – Potência útil no eixo do motor de indução.

As variações nos fasores de tensão e de corrente e na velocidade, provenientes da ocorrência de falhas no motor de indução, serão observadas no capítulo seguinte.

#### 4.4. Conclusão

Este capítulo foi dedicado o motor elétrico trifásico de indução. Foi apresentado aqui, as equações diferenciais que regem o seu comportamento dinâmico, o circuito equivalente, a influência das falhas sobre os parâmetros da máquina e o fluxograma que norteia a sequência de cálculos do algoritmo destinado à simulação. Além do mais, foi apresentado o comportamento dinâmico de alguns parâmetros do motor, o qual foi simulado com valores nominais e sem defeitos.

No capítulo seguinte é apresentado a proposta do trabalho, onde está descrito em detalhes, o sistema de detecção e diagnóstico baseado na lógica *fuzzy*. Entre os aspectos a serem apresentados estão: as variáveis de entrada, os critérios para a confecção de regras, as funções de pertinência, as variáveis de saída e exemplos de execução do programa.

---

# Capítulo 5

## Sistema Proposto

---

Neste capítulo, é apresentada a proposta do nosso trabalho, isto é, a nossa contribuição para a detecção e diagnóstico de falhas incipientes em motores de indução, em tempo real, de modo a evitar paradas em momentos inoportunos com manutenções corretivas não programadas. O nosso sistema é baseado na lógica *fuzzy* e tem como parâmetros de entrada os diagramas fasoriais de tensão e de corrente e a velocidade do motor.

O uso da lógica *fuzzy*, conforme visto no capítulo 3, se justifica pelo fato desta técnica estar entre as ferramentas mais utilizadas para a realização de diagnóstico. Já os diagramas fasoriais aparecem como uma inovação, pois conforme observado no capítulo 1, eles não figuram na literatura com este propósito. Com relação à velocidade do motor, esta aparece como um dado importante a ser analisado, porque, além da facilidade em se obtê-la, ela é diretamente afetada durante a ocorrência de algumas falhas incipientes.

A sequência do capítulo se desenvolve da seguinte forma: inicialmente é feita uma análise nos parâmetros de entrada diante da ocorrência de algumas falhas, depois, o sistema *fuzzy* é explanado em detalhes, passando pelas regras aplicadas e pelas funções de pertinência, até o diagnóstico inferido.

### **5.1. Escolha das Variáveis de Entrada**

A escolha pelo diagrama fasorial dos sinais elétricos se e pela velocidade do motor deu pelo fato de que a medição destas grandezas é obtida por meio de métodos não-invasivos. Falhas incipientes no motor causam perturbações nesses sinais, onde a partir de mudanças ocorridas, pode-se traçar um perfil do diagrama fasorial e da velocidade, de acordo com a falha ocorrida.

Conforme já mencionado, as falhas consideradas nesse trabalho para efeito de simulação computacional são: barras quebradas, curto-circuito nos enrolamentos do estator e defeitos nos rolamentos. Na ocorrência de cada uma delas em separado, é analisado os efeitos no diagrama fasorial de tensões e de correntes de linha e na velocidade do motor.

### 5.1.1. Diagrama Fasorial

Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo, são, na realidade, senóides. Para se conseguir a representação fasorial de uma senóide, primeiro, a expressamos na forma de co-seno e depois, extraímos a sua magnitude e a sua fase. A equação (4.1) sintetiza essa transformação.

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi) \Leftrightarrow V = V_m \angle \phi \quad (5.1)$$

Alexander e Sadiku (2008) enfatizam as diferenças entre  $v(t)$  e  $V$ :

1.  $v(t)$  é a representação *instantânea* ou no *domínio do tempo*, ao passo que  $V$  é a representação *em termos de frequência* ou no *domínio dos fasores*;
2.  $v(t)$  é dependente do tempo, ao passo que  $V$  não é;
3.  $v(t)$  é sempre real sem nenhum termo complexo, ao passo que  $V$  geralmente é complexo.

Devemos ter em mente ainda, que a análise de fasores se aplica apenas quando a frequência é constante, ou seja, a manipulação de dois ou mais sinais senoidais, de modo a serem representados num diagrama fasorial, só será possível, se eles tiverem a mesma frequência.

Assim, dentro da nossa proposta, os sinais de tensão e corrente monitorados são convertidos em diagrama fasoriais. Devemos observar de agora em diante, as mudanças ocorridas nesses fasores mediante a existência de falhas nos motores.

A figura 5.1 mostra os diagramas fasoriais de tensão e de corrente de linhas extraídos no momento em que motor (tabela 4.1) funciona a carga nominal e em condições saudáveis. Tanto os fasores de tensão, quanto os de corrente apresentam estão defasados de  $120^\circ$  entre si e a diferença angular entre eles é de  $63,3^\circ$ . Os módulos das tensões de linha são 200 V e os módulos das correntes de linha são 3,1762 A.

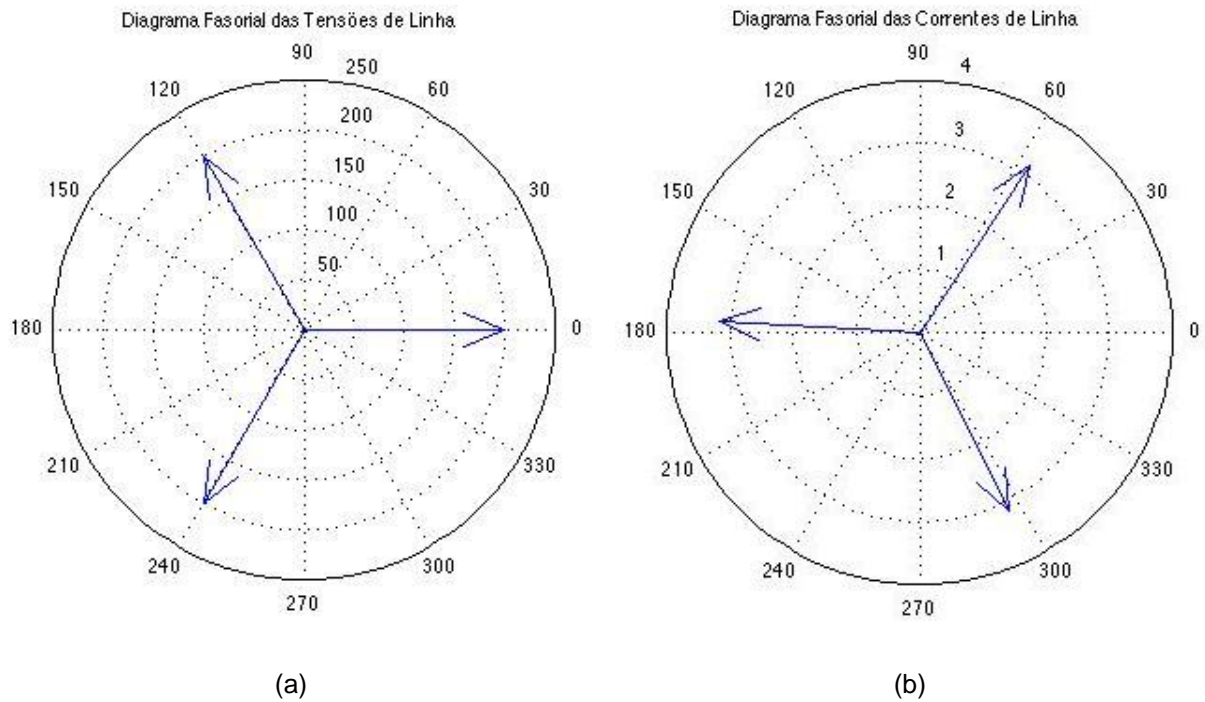


Figura 5.1 – Diagrama fasorial de (a) tensão e (b) corrente de linha, para o caso do motor saudável e com carga nominal.

Mediante a existência de barras quebradas, a figura 5.2 mostra as variações ocorridas no diagrama fasorial de corrente para diferentes valores de impedância rotórica. Nos quatros casos, houve aumento no módulo da corrente e também na diferença angular com relação ao fasor de tensão. As mudanças mais expressivas aconteceram para o caso em que a impedância rotórica foi aumentada em 90%, onde o módulo passou para 3,4927 A e a diferença angular saltou para  $65,1^\circ$ . E os valores menos significativos ocorreram para o caso de 10%, onde os valores obtidos foram 3,2094 A e  $63,6^\circ$ , respectivamente. Os três fasores mantiveram-se defasados de  $120^\circ$  e a sequência trifásica manteve-se positiva.

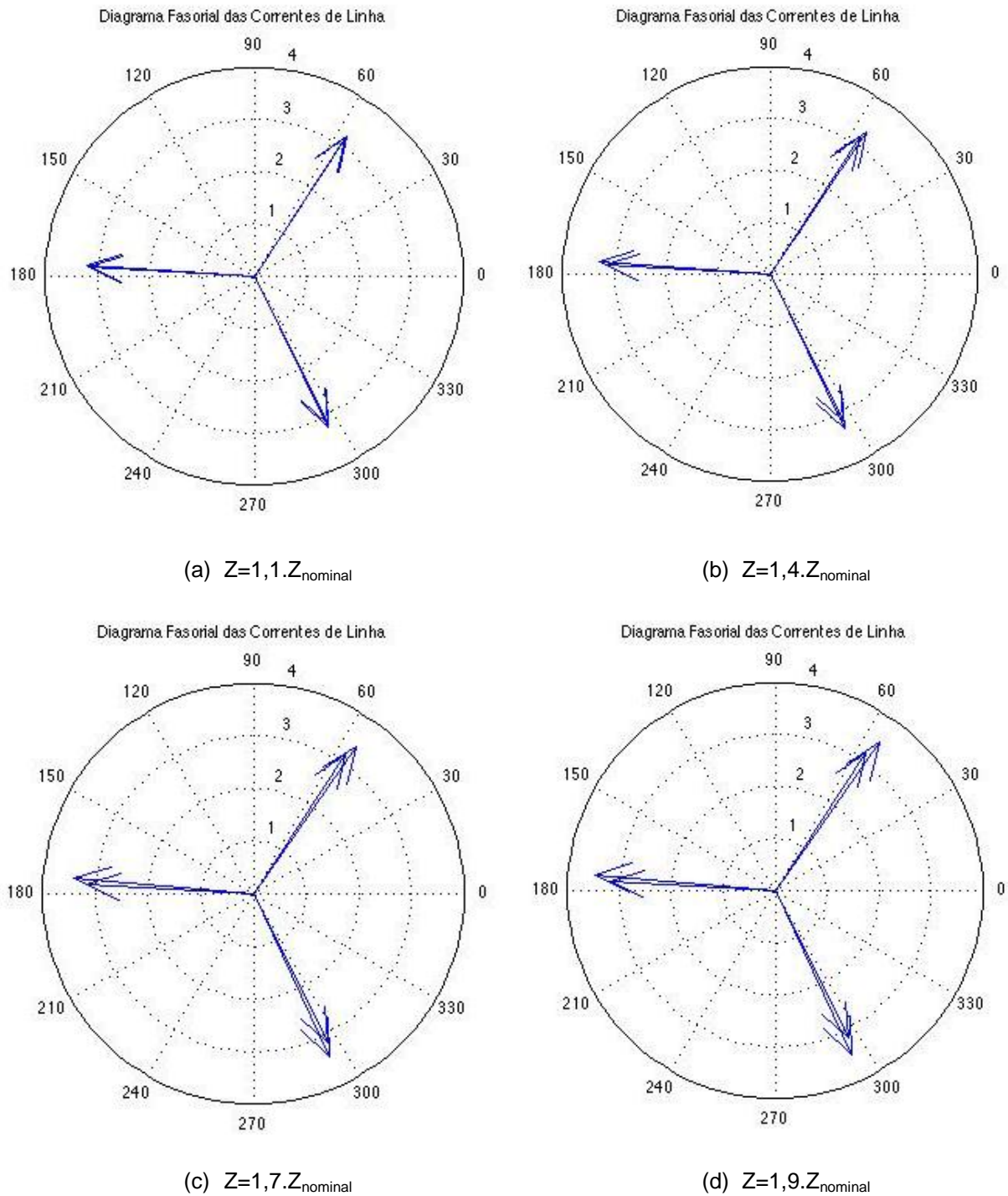


Figura 5.2 – Alterações do diagrama fasorial de corrente mediante diferentes aumentos da impedância rotórica (barras quebradas): (a) 1,1 vezes; (b) 1,4 vezes; (c) 1,7 vezes; (d) 1,9 vezes.

A figura 5.3 traz uma análise no diagrama fasorial de corrente para o caso de curto-circuito nas espiras do estator. A impedância estática foi reduzida em diferentes valores. Quando é restringida em 90% não há variações significativas, pois o módulo da corrente cai para 3,1488 A e a diferença angular com relação a tensão aumenta para 63,6°. Já quando a impedância é reduzida a 1% a corrente cai para 2,9813 A e a defasagem aumenta para 68,4°. Após a perturbação do curto, os

fasores de corrente retornam aos  $120^\circ$  equidistantes entre si e a sequência positiva é mantida.

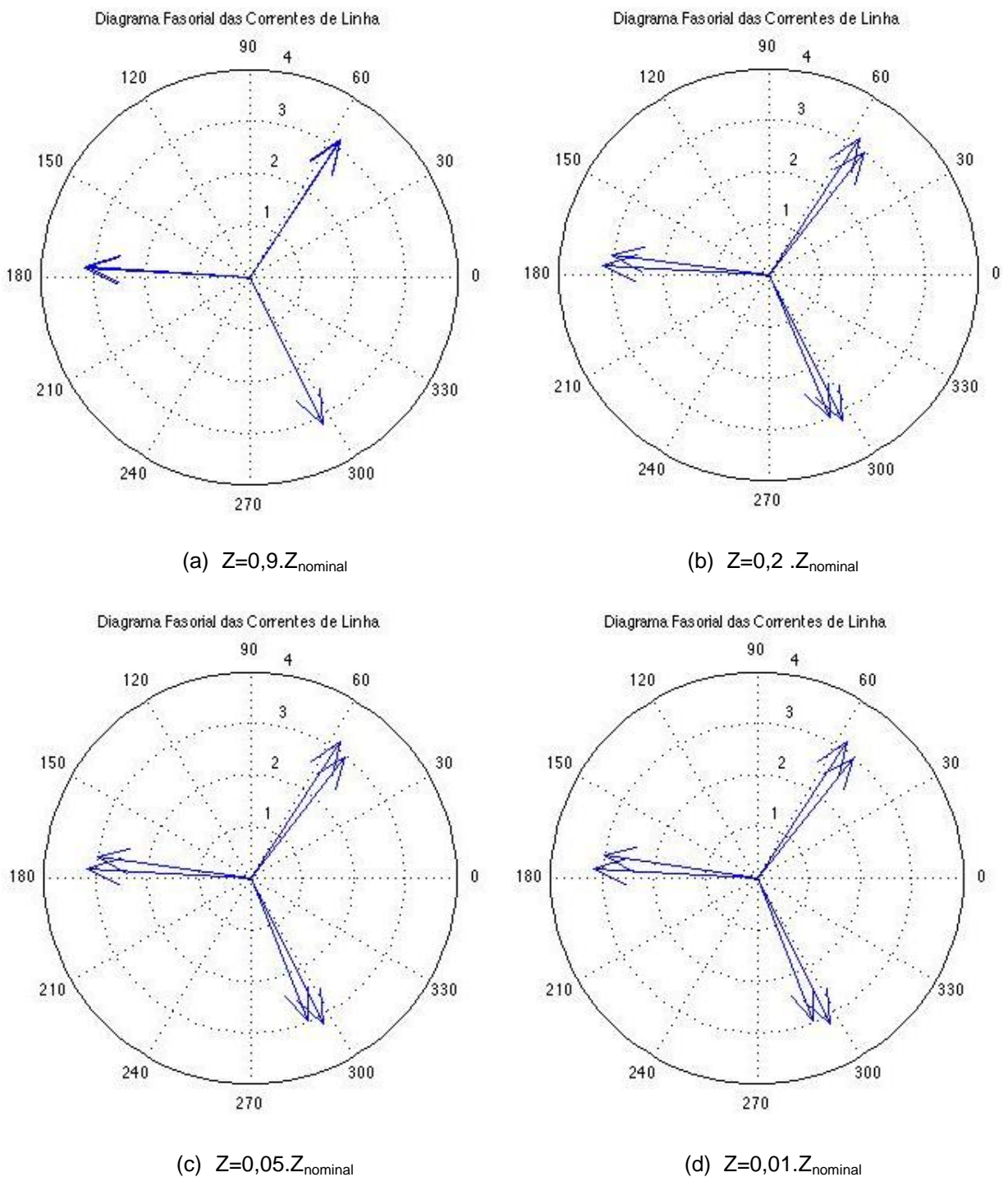


Figura 5.3 – Alterações do diagrama fasorial de corrente mediante diferentes reduções da impedância estática (curto-circuito nas espiras do estator): (a) Redução para 90%; (b) Redução para 20%; (c) Redução para 5%; (d) Redução para 1%.

Para efeito de simulação de defeitos nos rolamentos aumenta-se o valor do coeficiente de atrito do motor. A figura 5.4 mostra esse aumento com as respectivas reações encontradas no diagrama fasorial da corrente. Em todos os casos

percebeu-se que o módulo da corrente aumentou e que o defasamento angular entre tensão e corrente diminuiu. No caso do aumento em 10 vezes, os valores são respectivamente, 4,3099 A e  $57,6^\circ$ . Novamente, a sequência trifásica não foi alterada e a defasagem angular entre os fasores de corrente permaneceu em  $120^\circ$  elétricos.

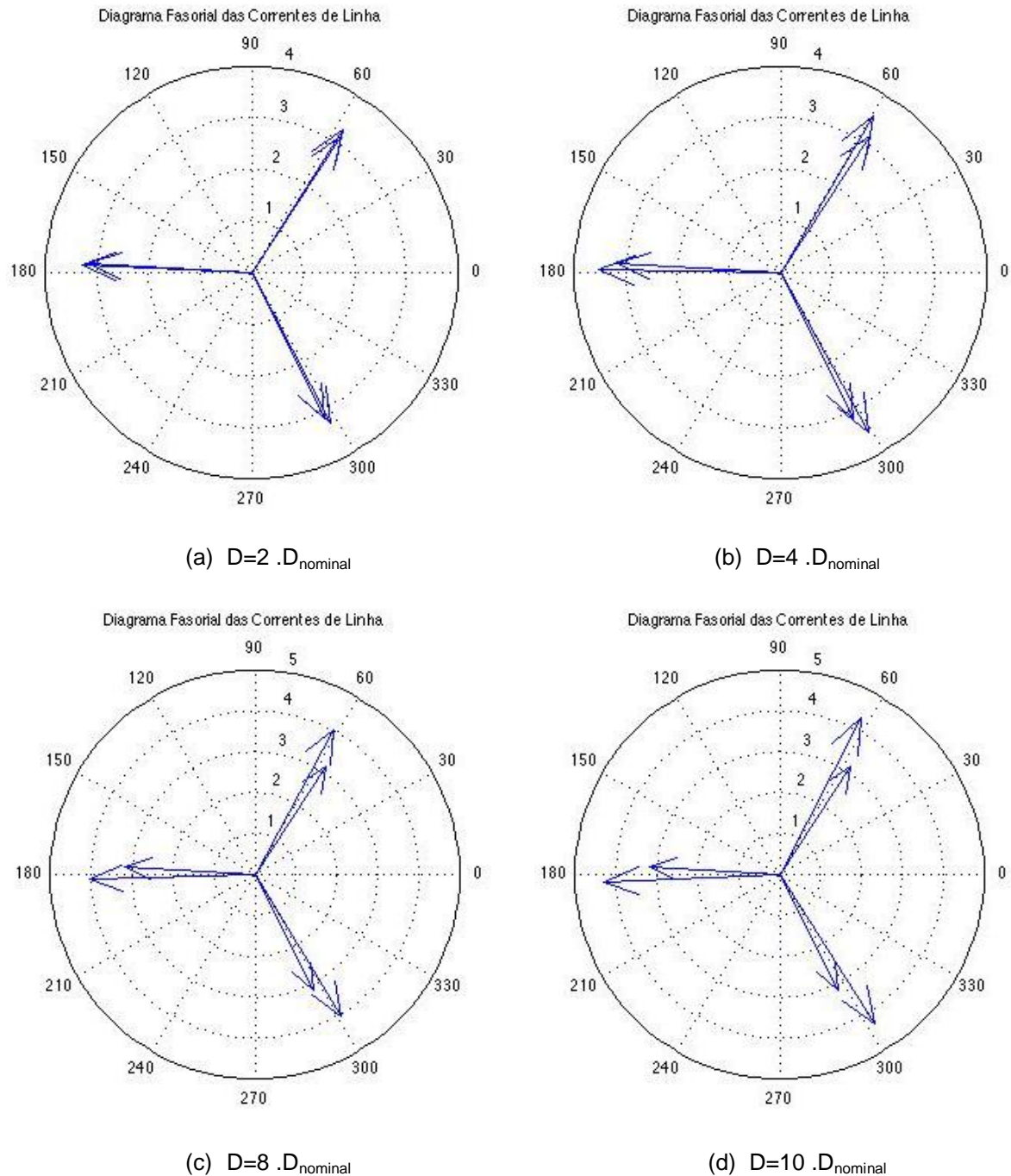


Figura 5.4 – Alterações do diagrama fasorial de corrente mediante diferentes aumentos do coeficiente de atrito do motor (defeito nos rolamentos): (a) 2 vezes; (b) 4 vezes; (c) 8 vezes; (d) 10 vezes.

Em todas as falhas simuladas não houve qualquer mudança no diagrama fasorial da tensão de linha. No diagrama fasorial da corrente, todavia, os  $120^\circ$

elétricos foram mantidos, independentemente do tipo de falhas ocorrida, o mesmo vale para a sequência trifásica positiva. Apesar disso, é importante frisar que o módulo da corrente variou, dependendo do tipo de falha, o mesmo ocorrendo entre o defasamento angular entre a tensão e a corrente de linha. A tabela 5.1 mostra o comportamento dos fasores diante das falhas incididas. A referência *aumenta* e *diminui* refere-se ao um comparativo com os valores nominais.

Tabela 5.1 – Resumo das mudanças advindas nos diagramas fasoriais de tensão e de corrente de linha mediante a ocorrência de algumas falhas no motor.

DEFEITO	TENSÃO DE LINHA (V)			CORRENTE DE LINHA (A)			DEFASAGEM ENTRE TENSÃO E CORRENTE
	Módulo	Defasagem entre os fasores	Sequência	Módulo	Defasagem entre os fasores	Sequência	
Normal	Nominal	120°	Positiva	Nominal	120°	Positiva	Nominal
Barras quebradas	Nominal	120°	Positiva	Aumenta	120°	Positiva	Aumenta
Curto-circuito nas bobinas do estator	Nominal	120°	Positiva	Diminui	120°	Positiva	Aumenta
Defeitos nos rolamentos	Nominal	120°	Positiva	Aumenta	120°	Positiva	Diminui

### 5.1.2. Velocidade do motor

A velocidade do motor é outro parâmetro que pode ser facilmente mensurável a partir de um tacômetro fixado ao eixo da máquina, por exemplo. Ela também se torna importante pois sofre variações quando ocorre algumas das falhas estudadas aqui. Nas próximas figuras são mostradas o comportamento da velocidade.

A figura 5.5 exhibe a queda da velocidade quando o motor está com barras quebradas no rotor. É perceptível que há uma redução de velocidade com o aumento de barras quebradas.

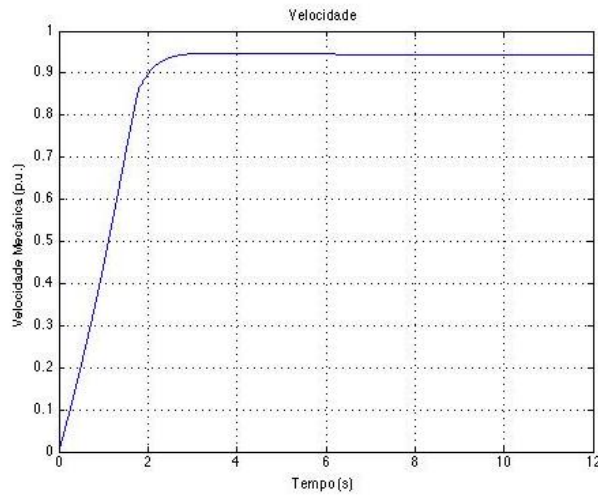
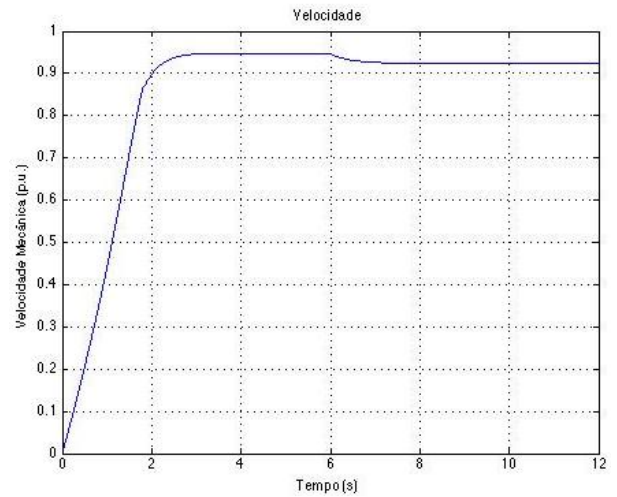
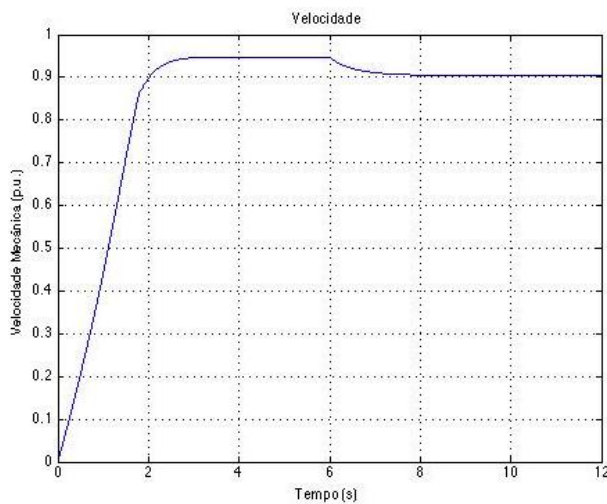
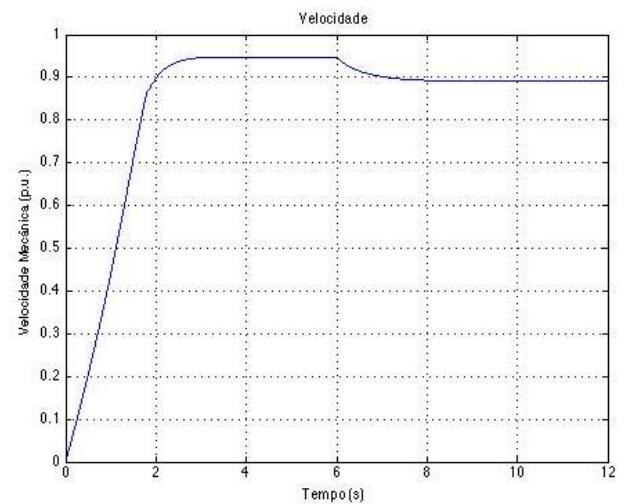
(a)  $Z=1,1.Z_{\text{nominal}}$ (b)  $Z=1,4.Z_{\text{nominal}}$ (c)  $Z=1,7.Z_{\text{nominal}}$ (d)  $Z=1,9.Z_{\text{nominal}}$ 

Figura 5.5 – Alterações na velocidade do motor mediante diferentes aumentos da impedância rotórica (barras quebradas): (a) 1,1 vezes; (b) 1,4 vezes; (c) 1,7 vezes; (d) 1,9 vezes.

A figura 5.6 expõe o comportamento da velocidade do motor quando existe curto-circuito nas espiras do estator. Ao contrário do caso anterior, ela aumenta com a redução da impedância do estator. Porém, o valor fica relativamente estável a partir de 20%.

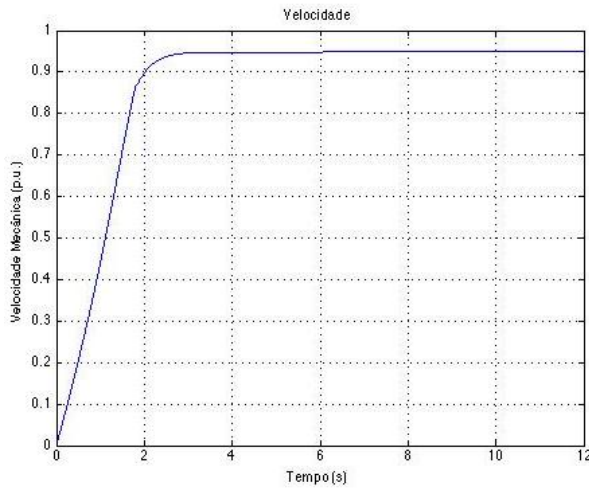
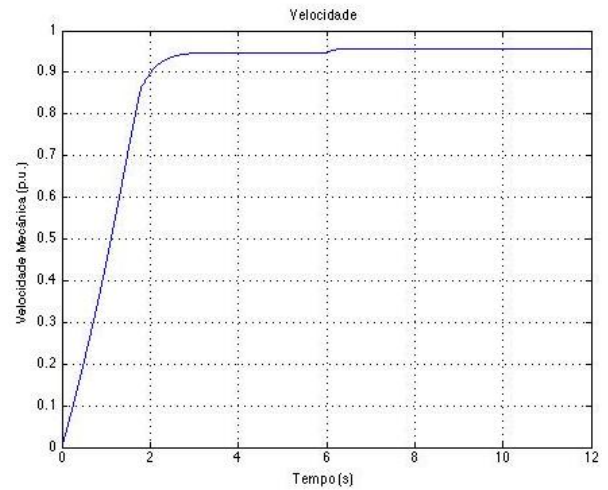
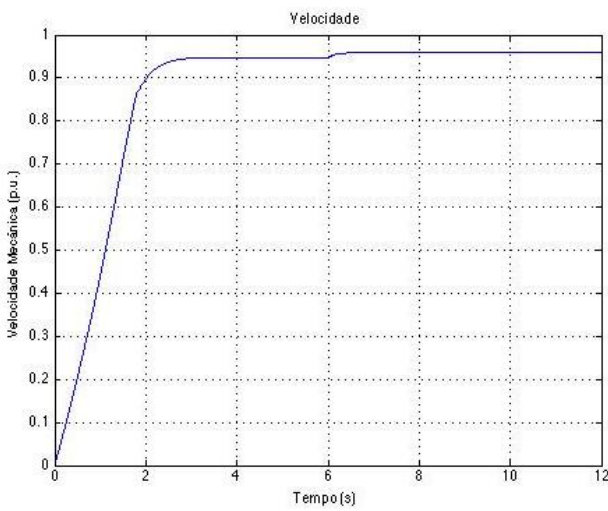
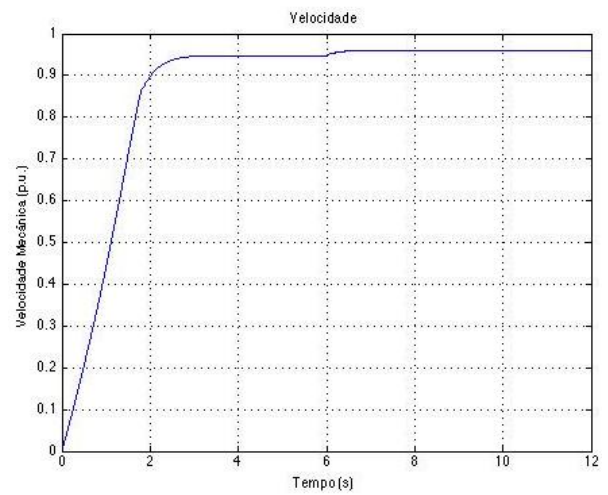
(a)  $Z=0,9.Z_{\text{nominal}}$ (b)  $Z=0,2.Z_{\text{nominal}}$ (c)  $Z=0,05.Z_{\text{nominal}}$ (d)  $Z=0,01.Z_{\text{nominal}}$ 

Figura 5.6 – Alterações da velocidade do motor mediante diferentes reduções da impedância estática (curto-circuito nas espiras do estator): (a) Redução para 90%; (b) Redução para 20%; (c) Redução para 5%; (d) Redução para 1%.

A figura 5.7 mostra o desempenho da velocidade do motor diante do defeito dos rolamentos. A medida que se aumenta o coeficiente de atrito, a velocidade do motor cai.

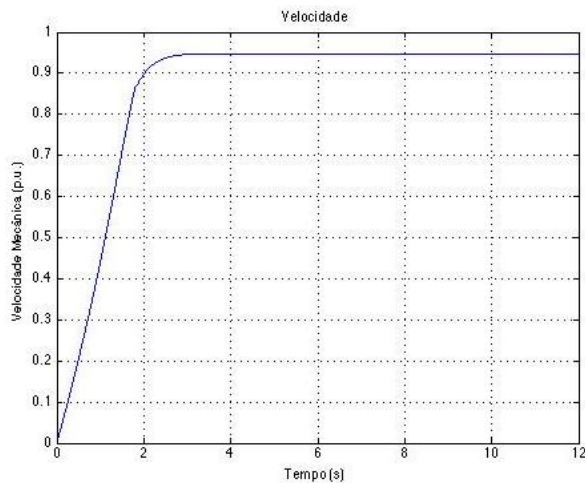
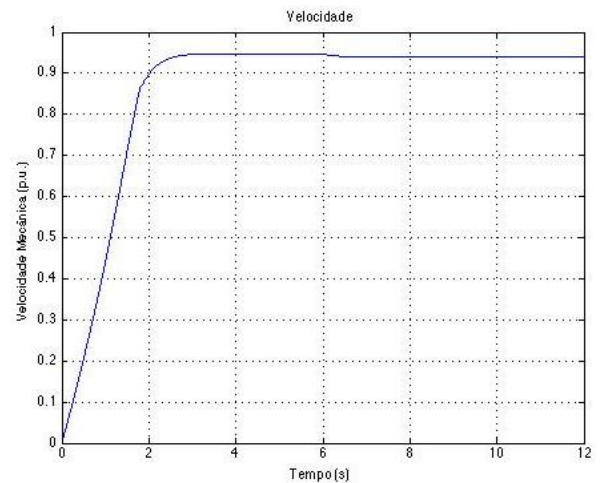
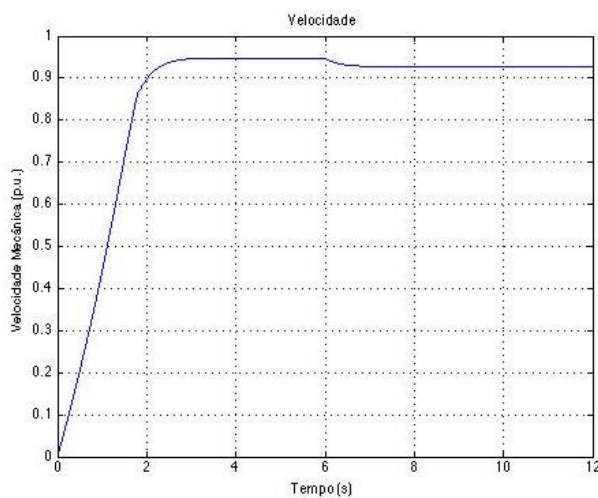
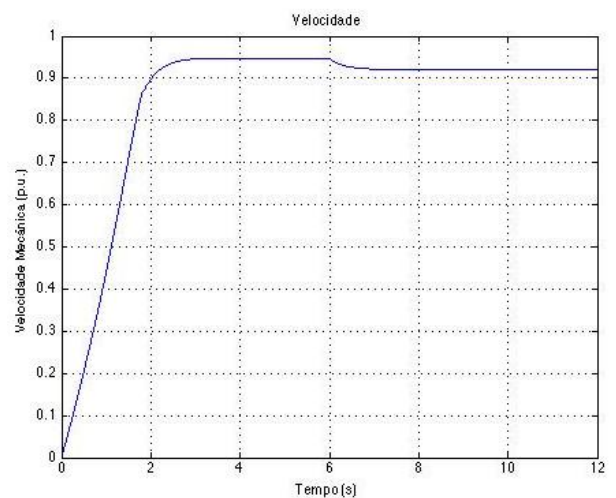
(a)  $D=2 \cdot D_{\text{nominal}}$ (b)  $D=4 \cdot D_{\text{nominal}}$ (c)  $D=8 \cdot D_{\text{nominal}}$ (d)  $D=10 \cdot D_{\text{nominal}}$ 

Figura 5.7 – Alterações da velocidade do motor mediante diferentes aumentos do coeficiente de atrito do motor (defeito nos rolamentos): (a) 2 vezes; (b) 4 vezes; (c) 8 vezes; (d) 10 vezes.

A partir da análise das figuras acima e também da tabela 5.1, verificamos que existe um comportamento padrão para o diagrama fasorial de tensão e de corrente de linha e para a velocidade do motor, de acordo com as falhas existentes na máquina. Observamos que dos parâmetros existentes na tabela 5.1, apenas o *módulo da corrente* e a *defasagem entre a tensão e a corrente* apresentam variações relevantes, condicionando-os junto com a velocidade a tornarem-se variáveis de entrada adequados para o sistema *fuzzy*. Assim, sintetizamos o desempenho dessas variáveis na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Comportamento dos parâmetros a serem usados como variáveis de entrada do sistema *fuzzy*.

DIAGNÓSTICO	MÓDULO DA CORRENTE DE LINHA (A)	DEFASAGEM ENTRE TENSÃO E CORRENTE	VELOCIDADE DO MOTOR
Sem defeito	Nominal	Nominal	Nominal
Barras quebradas	Aumenta	Aumenta	Diminui
Curto-circuito nas bobinas do estator	Diminui	Aumenta	Aumenta
Defeitos nos rolamentos	Aumenta	Diminui	Diminui

## 5.2. Fluxograma do Sistema Proposto

Conforme visto na seção anterior, a tabela 5.2 nos fornece subsídios para inpetrarmos o diagrama fasorial e a velocidade como variáveis de entrada no sistema *fuzzy*. A proposta do trabalho é melhor visualizada através do fluxograma da Figura 5.8, que conta com três etapas as quais intitulamos de *aquisição de dados*, *pré-processamento* e *processamento*.

A primeira etapa, trata da *aquisição de dados*, isto é, da coleta de parâmetros do motor que possam ser relevantes na busca por informações sobre o seu estado. Aqui, particularmente, nos utilizaremos dos diagramas fasoriais de tensão e de corrente e da velocidade, coletados a partir de instrumentos específicos, conforme mencionados na seção anterior.

Após a coleta dos dados, os sinais de tensão e corrente serão conduzidos para a segunda etapa, chamada de *pré-processamento*. Nela, será realizado o condicionamento do sinal oriundo do primeiro bloco, de modo a transformá-lo em um outro tipo de sinal que permita melhor visualizar a condição do motor. Neste caso, quer dizer, converter as senóides em fasores.

A terceira e última etapa, a qual denominamos de *processamento*, refere-se a utilização de técnicas que possam fornecer o diagnóstico de falhas. No caso em

questão, usaremos a lógica *fuzzy*. Esta etapa, retrata o sistema de inferência *fuzzy* baseado em regras, sobre o qual discorreremos a seguir.

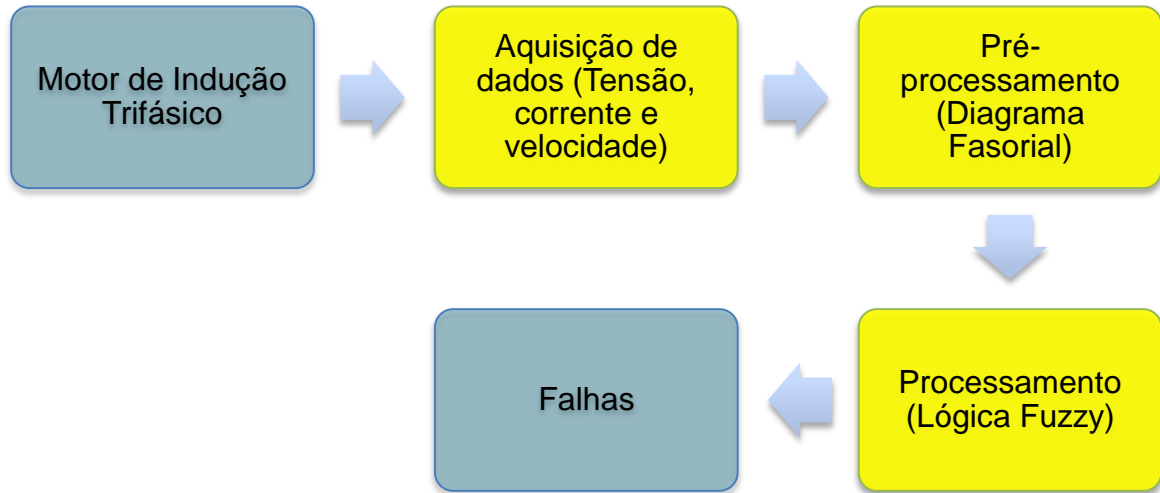


Fig. 5.8 – Fluxograma do sistema proposto.

### 5.3. O Sistema de Inferência *Fuzzy* Baseado em Regras

O sistema *fuzzy* desenvolvido tem uma estrutura baseada em regras, onde a função  $f:U \Rightarrow Y$  mapeia o universo de discurso de entrada  $U$  ao universo de discurso de saída  $Y$ , isto é, para cada elemento  $u \in U$  a função atribui unicamente um elemento  $y \in Y$ , denota-se tal atribuição única como  $y = f(u)$  [Shaw & Simões, 1999]. A transformação de entradas em saídas pode ser representada por

*variáveis de entrada*  $\Rightarrow$  *inferência fuzzy (regras)*  $\Rightarrow$  *variáveis de saída*

As variáveis de entrada são *o módulo do fasor da corrente, a defasagem angular entre o fasor de tensão e o fasor de corrente e a velocidade*. Os motivos que levaram a estas escolhas já foram apresentados nas seções anteriores. As variáveis de saída são *sem defeito, barras quebradas, curto-circuito nas espiras do estator e defeito nos rolamentos*. O propósito do sistema é fornecer um diagnóstico sobre o estado de operação do motor, por isso, as variáveis de saída se remetem a um dos estados possíveis do motor, dentro da proposta trabalhada. As regras de inferência *fuzzy* operam no modo afirmativo. Em síntese, o nosso sistema é composto de 3 variáveis de entrada, 27 regras e 4 variáveis de saída. A figura 5.9 traz um retrato do sistema *fuzzy* desenvolvido.

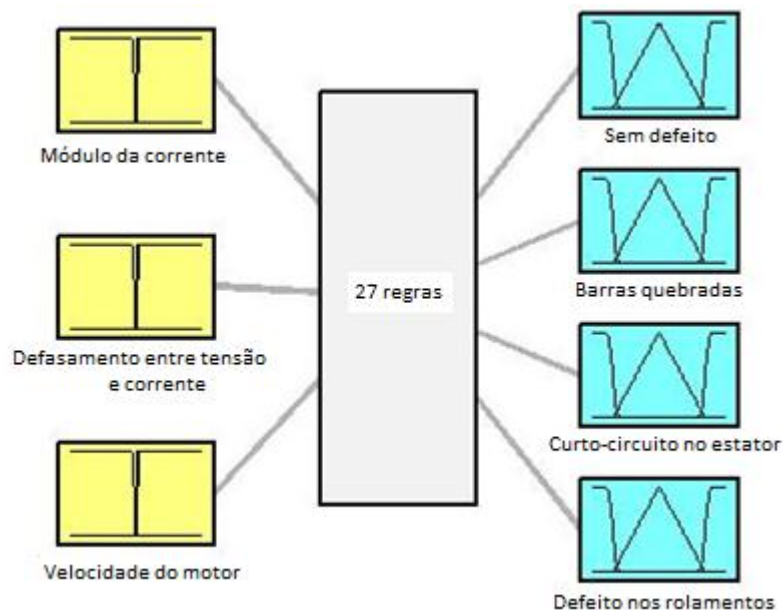


Figura 5.9 – Esquema do sistema *fuzzy* desenvolvido: 3 variáveis de entrada, 27 regras e 4 variáveis de saída.

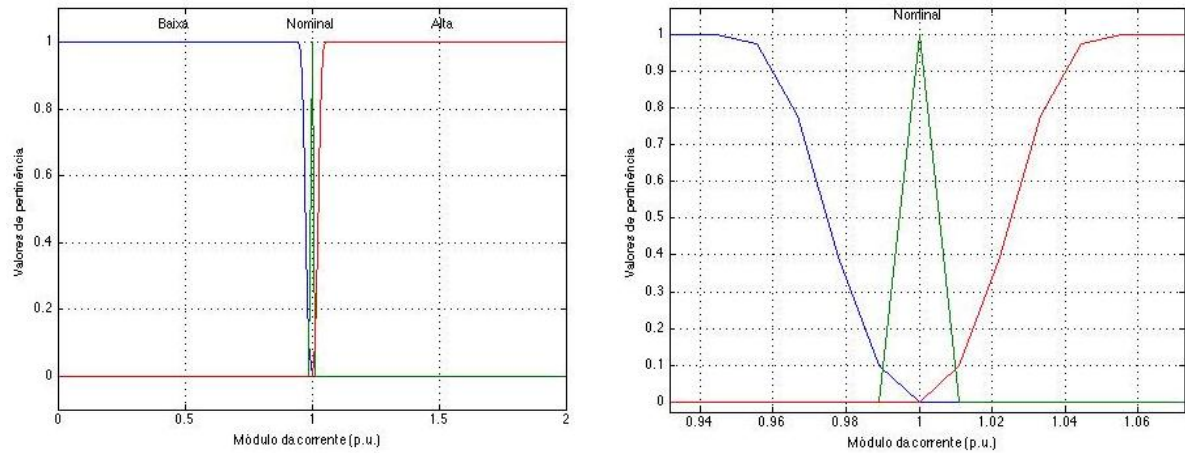
### 5.3.1. Fuzzificação

Fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio *fuzzy*, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. É uma espécie de pré-processamento<sup>8</sup> de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo consideravelmente o número de valores a serem processados [Shaw & Simões, 1999].

As variáveis de entrada, no domínio dos números reais, têm seus valores expressos em p.u, uma vez que isto permite que essas variáveis sejam fuzzificadas a partir de qualquer motor. Para cada variável são estipuladas três funções de pertinência denominadas de *Baixa*, *Nominal* e *Alta*. A função *Nominal* refere-se aos valores nominais das variáveis de entrada, onde o valor de 1 p.u. indica o valor de pertinência máximo da variável, isto é, 100% nominal. A função *Baixa* esboça os valores considerados abaixo da referência nominal, onde valores iguais ou menores que 0,95 p.u. apontam para um valor de pertinência máximo. De forma análoga, a função *Alta* retrata os valores acima dos nominais, onde valores iguais ou maiores que 1,05 p.u. sinalizam para um valor de pertinência máximo. Essas características são comuns às três variáveis: módulo da corrente, defasagem angular entre tensão

<sup>8</sup> O pré-processamento definido aqui não é o mesmo explicado na seção 5.2. São etapas distintas.

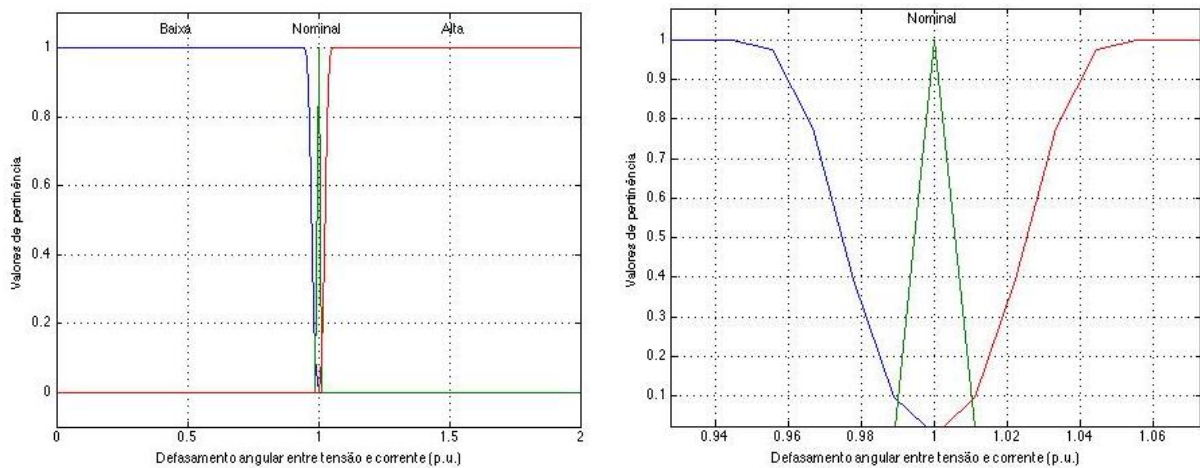
e corrente de linha e velocidade do motor. Observando-se as figuras 5.10, 5.11 e 5.12 percebe-se com mais nitidez estas considerações.



(a)

(b)

Figura 5.10 – Fuzzificação da variável de entrada Módulo da Corrente: (a) Visão geral. (b) Visualização mais detalhada.



(a)

(b)

Figura 5.11 – Fuzzificação da variável de entrada Defasagem Angular entre Tensão e Corrente de Linha: (a) Visão geral. (b) Visualização mais detalhada.

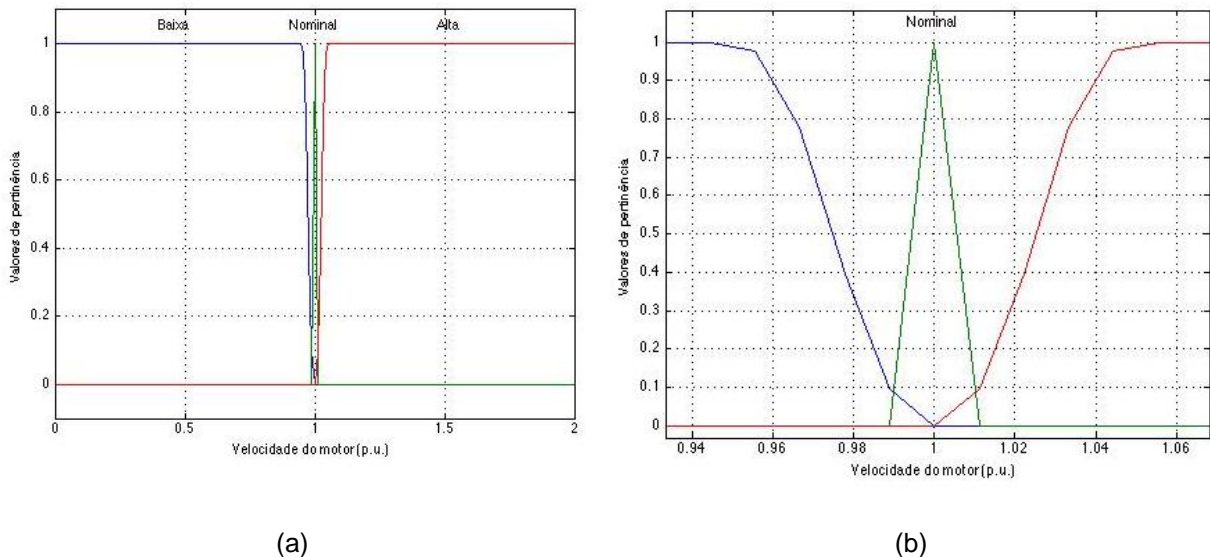


Figura 5.12 – Fuzzificação da variável Velocidade do motor: (a) Visão geral. (b) Visualização mais detalhada.

A função de pertinência *Nominal* é a função triangular (*trimf*), ao passo que a função *Baixa* é a função polinomial assimétrica com curva aberta à esquerda (*zmf*), enquanto que a função *Alta* é a função espelho-imagem à direita (*smf*). Essas curvas foram escolhidas para as funções *Baixa* e *Alta*, porque há a necessidade de considerarmos os valores baixos ou altos a partir de um determinado referencial (0,95 p.u para baixo e 1,05 para alto, neste trabalho). Com relação à função *Nominal*, o intervalo é pequeno (de 0,95 a 1,05 p.u.) porque as falhas ocorridas no motor alteram as variáveis de entrada em magnitudes muito pequenas, então, se faz necessário um intervalo pequeno para garantir a sensibilidade do sistema e o consequente diagnóstico correto.

### 5.3.2. A Inferência Máx-Min

Seja um sistema com multi-entradas e multi-saídas caracterizado por conjunto de regras na forma

SE  $var_1=A$  <conectivo<sup>t</sup>>  $var_2=B$  <conectivo<sup>t</sup>> ... ENTÃO  $var_{01}=C$ <conectivo<sup>t</sup>>...  
 <conectivo<sup>s</sup>>  
 SE  $var_1=D$  <conectivo<sup>t</sup>>  $var_2=E$  <conectivo<sup>t</sup>> ... ENTÃO  $var_{01}=F$ <conectivo<sup>t</sup>>...  
 <conectivo<sup>s</sup>>  
 ....  
 ....

onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  e  $F$  são conjuntos discretos ou *fuzzy*, <conectivo<sup>t</sup>> representa genericamente o operador de interseção *fuzzy*, e <conectivo<sup>s</sup>> representa

genericamente o operador de união *fuzzy*, escolhidos para se expressar a inferência *fuzzy* desejada.

Segundo Shaw & Simões (1999), na *agregação*, isto é, na composição dos vários conjuntos *fuzzy* de entrada dentro de uma regra, as t-normas *mín* e *produto* são mais comuns, enquanto que na *combinação*, ou composição das saídas *fuzzy* de cada regra, a s-norma *máx* tem sido a mais usada. Por isso, é usada a estrutura *máx-mín* neste trabalho.

Tabela 5.3 – Conjuntos de regras aplicadas.

Regras	Variáveis de entrada			Diagnóstico			
	Módulo da corrente de linha	Defasagem entre os fasores de tensão e de corrente	Velocidade do motor	Sem defeito	Barras quebradas	Curto-circuito nos enrolamentos do estator	Defeitos nos rolamentos
1	B	B	B	B	B	B	M
2	B	B	N	B	B	B	B
3	B	B	A	B	B	M	B
4	B	N	B	B	B	B	B
5	B	N	N	M	B	B	B
6	B	N	A	B	B	M	B
7	B	A	B	B	M	M	B
8	B	A	N	B	B	M	B
9	B	A	A	B	B	A	B
10	N	B	B	B	B	B	M
11	N	B	N	M	B	B	B
12	N	B	A	B	B	B	B
13	N	N	B	M	B	B	B
14	N	N	N	A	B	B	B
15	N	N	A	M	B	B	B
16	N	A	B	B	M	B	B
17	N	A	N	M	B	B	B
18	N	A	A	B	B	M	B
19	A	B	B	B	B	B	A
20	A	B	N	B	B	B	M
21	A	B	A	B	B	B	M
22	A	N	B	B	M	B	M
23	A	N	N	M	B	B	B
24	A	N	A	B	B	B	B
25	A	A	B	B	A	B	B
26	A	A	N	B	M	B	B
27	A	A	A	B	M	M	B

Com base na tabela 5.2 foi elaborado um conjunto com 27 regras que compõem no nosso sistema de inferência *fuzzy*. As regras estão agrupadas na tabela 5.3. As letras *B*, *N*, *A* e *M*, representam *Baixa*, *Nominal*, *Alta* e *Média*, respectivamente. Para as variáveis de saída usamos a nomenclatura *Média* ao invés

de *Nominal*. Ressaltamos que as regras 9, 14, 19 e 25 representam as situações ideais para os respectivos diagnósticos: *curto-circuito nos enrolamentos do estator, sem defeito, defeito nos rolamentos e barras quebradas*.

### 5.3.3. Defuzzificação

Na defuzzificação, o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido num valor discreto. O objetivo é obter-se um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos da variável lingüística de saída, ou seja, a distribuição de possibilidades. Assim, a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída domínio *fuzzy* para o domínio discreto. Dentre os métodos adotados para defuzzificação, podemos destacar centro-da-área (C-o-A), centro-do-máximo (C-o-M) e média-do-máximo (M-o-M).

Segundo Shaw & Simões (1999), o método média-do-máximo (M-o-M) é o mais indicado para reconhecimento de padrões, isto é, quando se deseja identificar objetos pela classificação do sinal de um sensor. Ainda segundo os autores, esse método apresenta o resultado mais plausível por conter informações sobre a similaridade entre o sinal e os objetos-padrão.

Pelo método média-do-máximo (M-o-M) pode-se obter a média de todos os máximos pela equação:

$$u^* = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (5.2)$$

onde  $u_m$  é o m-ésimo elemento no universo de discurso, em que a função  $\mu_{out}(\mu_i)$  tenha um máximo e  $M$  é o número total desses elementos. A abordagem M-o-M é também chamada de solução *mais plausível*, por desconsiderar o formato das funções de pertinência de saída. Por essas razões, é adotado nesse trabalho o método média-do-máximo no processo de defuzzificação.

As figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 revelam as funções reservadas às variáveis de saída, onde, em cada uma delas, existem três funções de pertinência com as mesmas características daquelas destinadas às variáveis de entrada, diferenciando-se, entre outros aspectos, na nomenclatura, agora denominadas de *Baixa*, *Média* e *Alta*. Outra diferença é que a função triangular denominada aqui de *Média*, apresenta um *range* bem mais amplo que no caso das variáveis de entrada, isto porque, adotamos a faixa de 15% a 85% de possibilidades como sendo a

classificação média de um estado de saída possível. Para que a possibilidade de um defeito seja considerada baixa, o percentual não pode ser considerado superior a 10% (observar a função *Baixa*). No caso do raciocínio ser estendido para a função *Alta*, então, o percentual a ser considerado é o de 90% em diante.

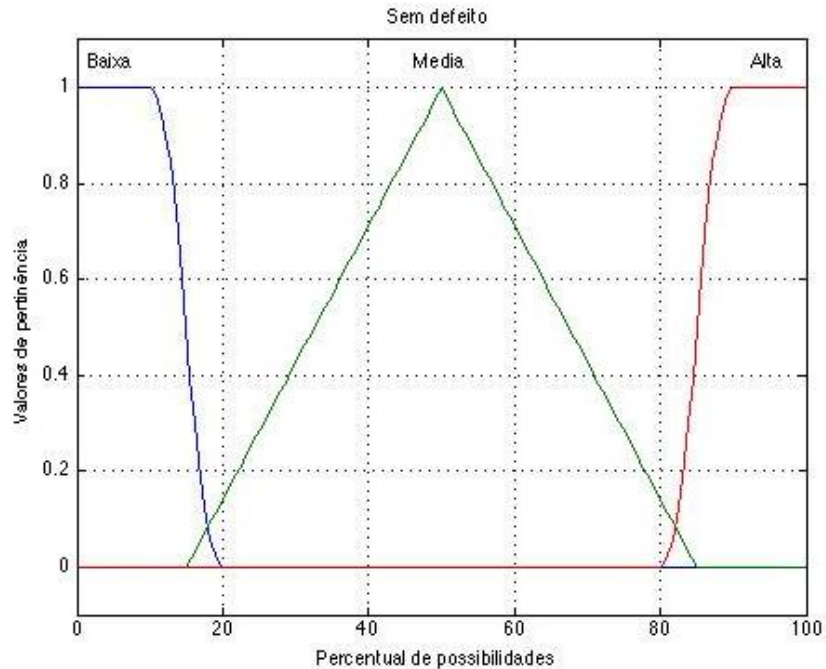


Figura 5.13 – Defuzzificação da variável de saída *Sem defeito*.

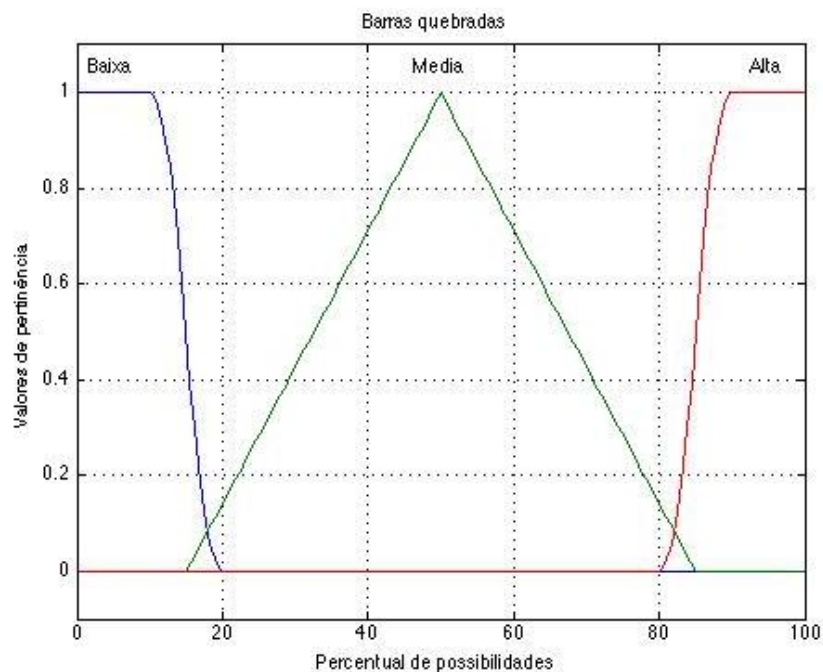


Figura 5.14 – Defuzzificação da variável de saída *Barras quebradas*.

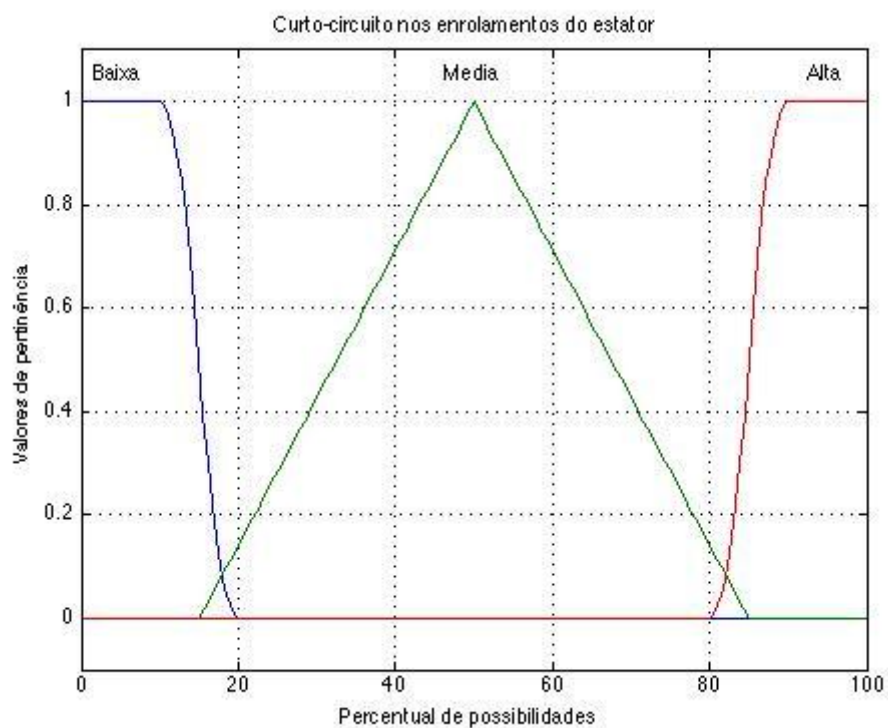


Figura 5.15 – Defuzzificação da variável de saída *Curto-circuito nas espiras do estator*.

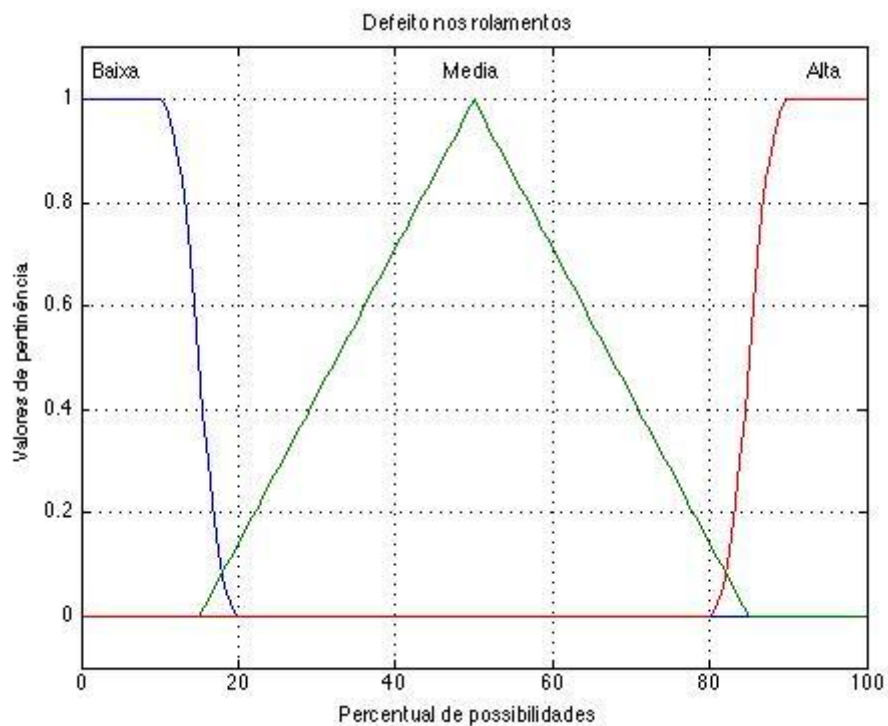


Figura 5.16 – Defuzzificação da variável de saída *Defeito nos rolamentos*.

O diagnóstico fornecido pelo sistema é feito de modo que cada variável de saída tenha um percentual estipulado pelo sistema. Por exemplo:

**Diagnóstico 1:**

- Sem defeito: 8 %;
- Barras quebradas: 8 %;
- Curto-circuito nos enrolamentos do estator: 92 %;
- Defeito nos rolamentos: 8 %.

**Diagnóstico 2:**

- Sem defeito: 50 %;
- Barras quebradas: 8 %;
- Curto-circuito nos enrolamentos do estator: 50 %;
- Defeito nos rolamentos: 8 %.

O diagnóstico 1 fornece informações contundentes para se acreditar que o motor apresenta defeito nos enrolamentos do estator. Já o diagnóstico 2 indica que existem curto-circuito nos enrolamentos do estator, porém, elas não acarretam alterações significativas nas variáveis de entrada, ao ponto do diagnóstico ser enfático em afirmar que o motor está realmente com defeito nos enrolamentos do estator.

#### **5.4. Simulação do Sistema *Fuzzy* no Matlab®**

A implementação do sistema *fuzzy* proposto se desenvolveu em ambiente Matlab®, incluindo toda a sequência do fluxograma da figura 5.8 (simulação do motor de indução, captura dos sinais de entrada, transformação de senóides em fasores, sistema de inferência *fuzzy* e diagnóstico do sistema).

No tocante ao sistema de inferência *fuzzy* particularmente, foram utilizadas as ferramentas disponíveis no *toolbox* da lógica *fuzzy*, as quais destacam-se: o *FIS Editor*, o *Membership Function Editor* e o *Rule Editor*.

O *FIS Editor* é a tela principal para a implementação do sistema *fuzzy*. Nele são determinadas, entre outros itens, o número de variáveis de entrada e de saída, quantas e quais funções de pertinências serão usadas em cada variável, a faixa de

valores de cada variável de entrada, o número de regras, as inferências na agregação e na composição e o processo de defuzzificação.

O *Membership Function Editor* é usado para definir as funções de pertinência associadas a cada variável. Já o *Rule Editor* permite editar a lista de regras que definem o comportamento do sistema. As figuras 5.17, 5.18 e 5.19 trazem a aparência desses editores com mais detalhes.

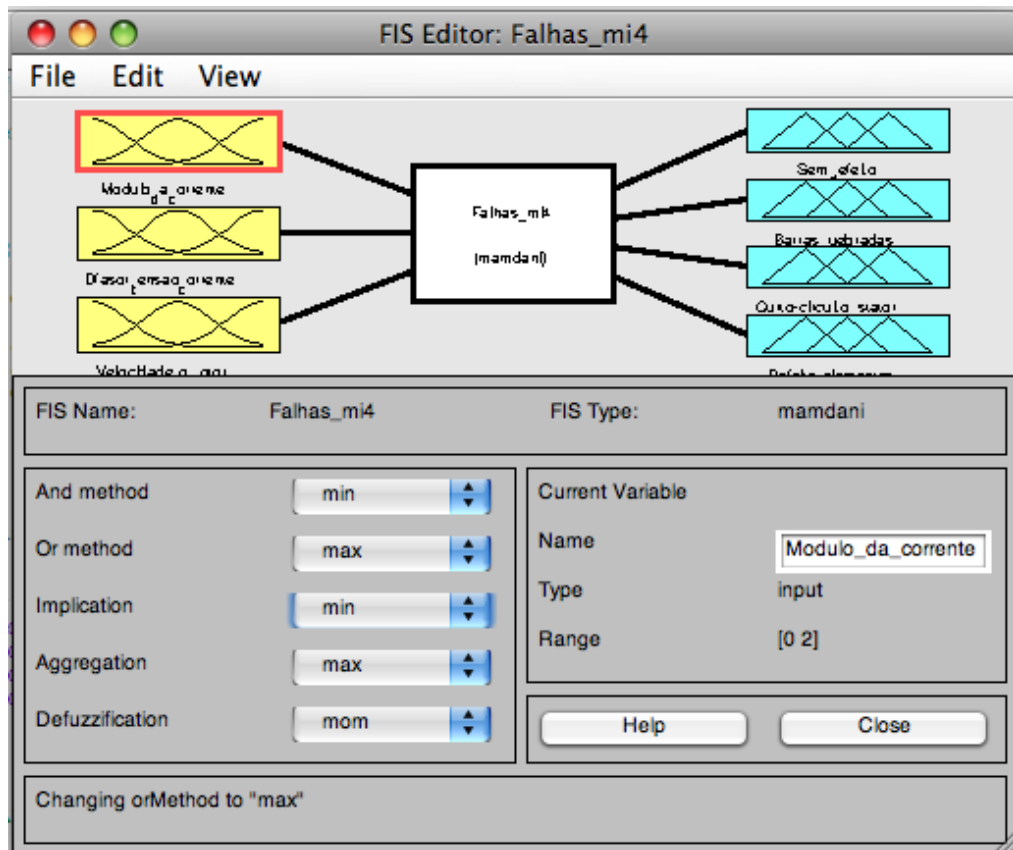


Figura 5.17 – Toolbox de lógica fuzzy do Matlab®: *FIS Editor*.

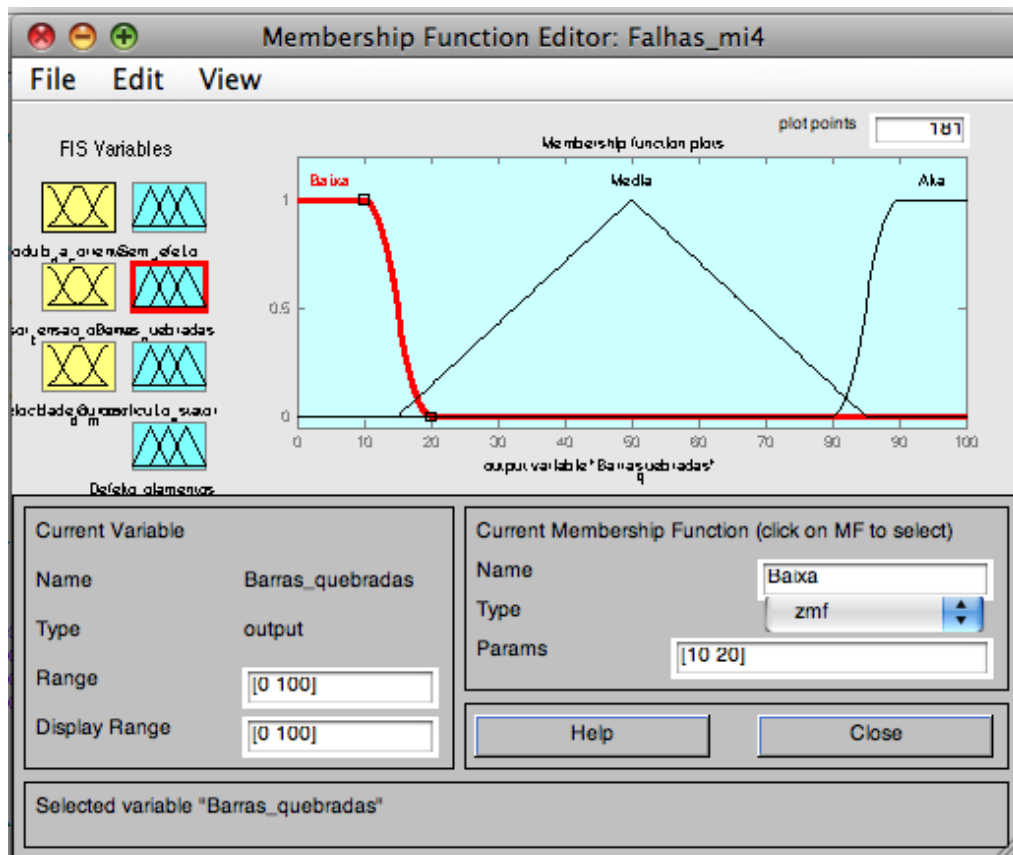


Figura 5.18 – Toolbox de lógica fuzzy do Matlab®: *Membership Function Editor*.

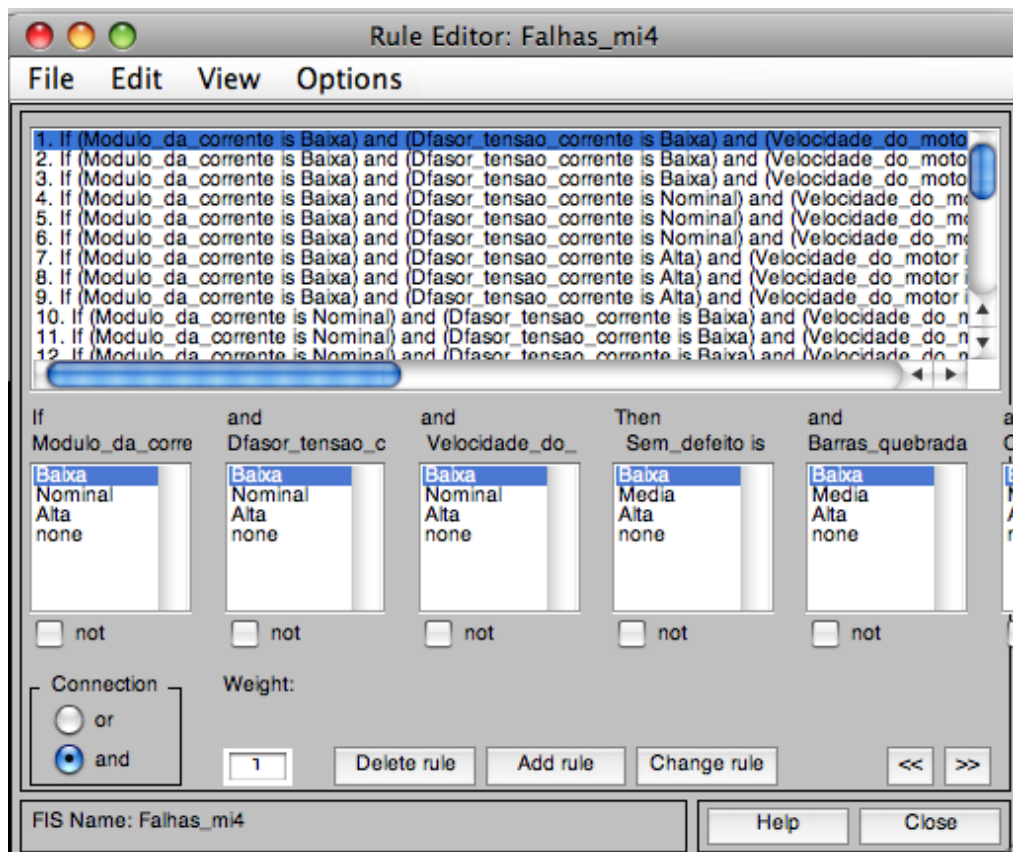
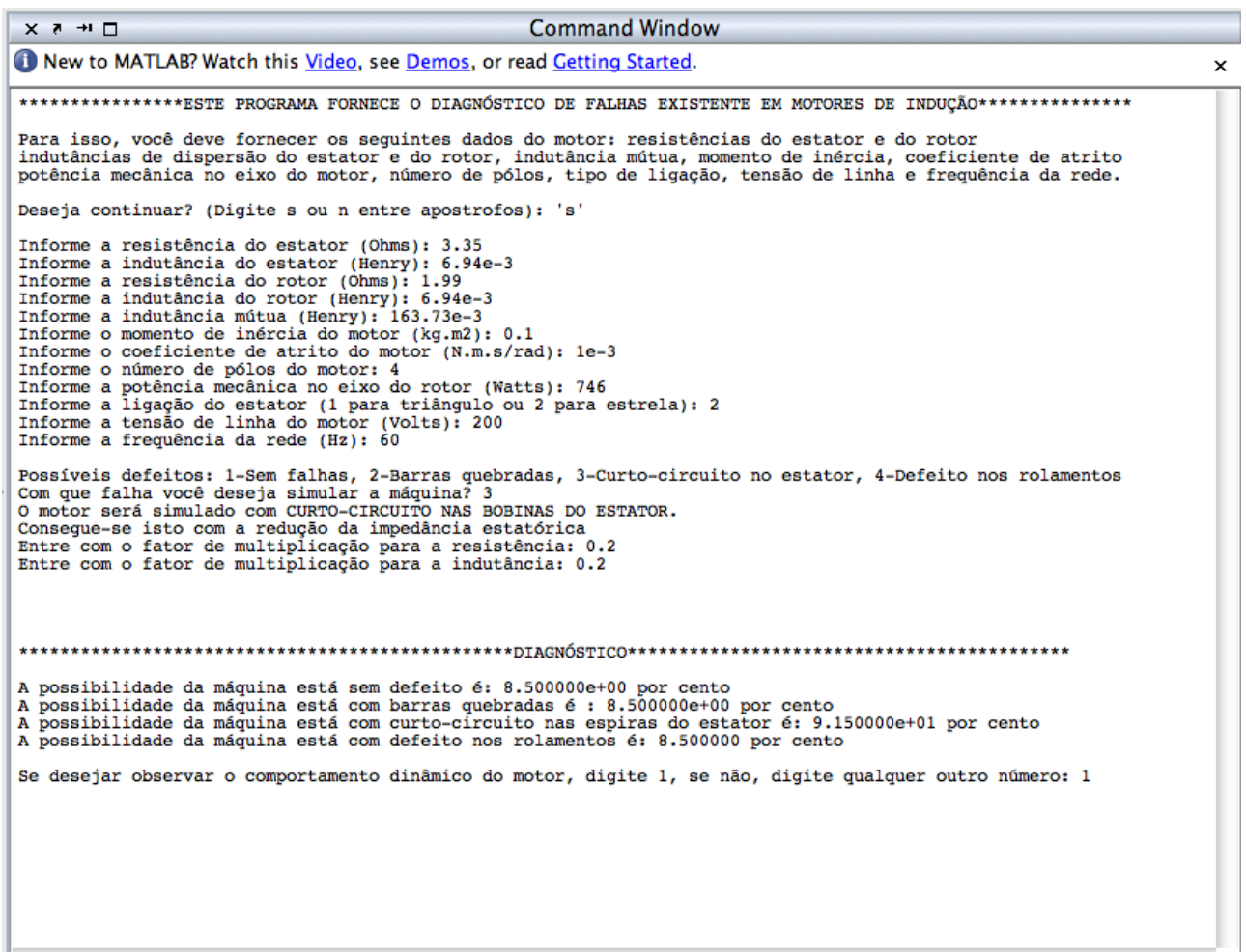


Figura 5.19 – Toolbox de lógica fuzzy do Matlab®: *Rule Editor*.

A figura 5.20 traz a interface do programa com o usuário, onde lhes são solicitados: dados do motor e da rede elétrica; e se existe ou não o desejo de simular alguma falha no motor. Ao final da execução, é fornecido o diagnóstico do sistema, expressos em porcentagem das quatro variáveis de saída. O programa ainda fornece a opção do usuário visualizar ou não, as alterações nos parâmetros da máquina decorrentes da existência de alguma falha.



```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

*****ESTE PROGRAMA FORNECE O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EXISTENTE EM MOTORES DE INDUÇÃO*****

Para isso, você deve fornecer os seguintes dados do motor: resistências do estator e do rotor
indutâncias de dispersão do estator e do rotor, indutância mútua, momento de inércia, coeficiente de atrito
potência mecânica no eixo do motor, número de pólos, tipo de ligação, tensão de linha e frequência da rede.

Deseja continuar? (Digite s ou n entre apostrofes): 's'

Informe a resistência do estator (Ohms): 3.35
Informe a indutância do estator (Henry): 6.94e-3
Informe a resistência do rotor (Ohms): 1.99
Informe a indutância do rotor (Henry): 6.94e-3
Informe a indutância mútua (Henry): 163.73e-3
Informe o momento de inércia do motor (kg.m2): 0.1
Informe o coeficiente de atrito do motor (N.m.s/rad): 1e-3
Informe o número de pólos do motor: 4
Informe a potência mecânica no eixo do rotor (Watts): 746
Informe a ligação do estator (1 para triângulo ou 2 para estrela): 2
Informe a tensão de linha do motor (Volts): 200
Informe a frequência da rede (Hz): 60

Possíveis defeitos: 1-Sem falhas, 2-Barras quebradas, 3-Curto-circuito no estator, 4-Defeito nos rolamentos
Com que falha você deseja simular a máquina? 3
O motor será simulado com CURTO-CIRCUITO NAS BOBINAS DO ESTATOR.
Consegue-se isto com a redução da impedância estatórica
Entre com o fator de multiplicação para a resistência: 0.2
Entre com o fator de multiplicação para a indutância: 0.2

*****DIAGNÓSTICO*****

A possibilidade da máquina está sem defeito é: 8.500000e+00 por cento
A possibilidade da máquina está com barras quebradas é : 8.500000e+00 por cento
A possibilidade da máquina está com curto-circuito nas espiras do estator é: 9.150000e+01 por cento
A possibilidade da máquina está com defeito nos rolamentos é: 8.500000 por cento

Se desejar observar o comportamento dinâmico do motor, digite 1, se não, digite qualquer outro número: 1

```

Figura 5.20 – Execução do programa em Matlab®.



---

# Capítulo 6

## Resultados

---

O capítulo 6 é destinado a apresentação dos resultados obtidos a partir das simulações feitas no programa desenvolvido em Matlab<sup>®</sup>. No capítulo 4 foram exibidos os resultados do comportamento dinâmico dos parâmetros de saída do motor de indução, na condição *sem defeito* e com carga nominal. No capítulo 5 foram expostos os resultados da influência de algumas falhas incipientes (barras quebradas, curto-circuito nas espiras do estator e defeito nos rolamentos) no diagrama fasorial da rede e na velocidade do motor.

Este capítulo é direcionado a análise dos resultados de saída do programa, isto é, do diagnóstico conferido pelo sistema *fuzzy* a partir da falha a ser introduzida, como também, a partir da magnitude dessa falha. Em outras palavras, dependendo da magnitude da variação da grandeza a ser alterada, o diagnóstico pode variar de um patamar inicial de 50% para um outro de 90%, por exemplo, ou ainda, pode alterar por completo o perfil do diagnóstico, levando-o de uma situação *sem defeito* para uma outra como *barras quebradas*, por exemplo.

Os testes relatados aqui, usam como referência o motor da tabela 4.1. As situações descritas acima, serão melhor observadas a seguir.

### **6.1. Diagnóstico Durante a Variação da Impedância do Rotor**

Conforme visto nos capítulos anteriores, a presença de barras quebradas no rotor exerce influência sobre a impedância do rotor. Assim, quando se deseja simular o motor com este defeito, aumenta-se o valor da impedância do rotor. Em um primeiro momento, imaginamos que qualquer alteração seja suficiente para sensibilizar o sistema *fuzzy* ao ponto dele percebê-la e afirmar que o motor encontra-se com barras quebradas. Na verdade, depende muito da magnitude do valor dessa alteração.

Na simulação para barras quebradas foram realizados 100 testes, em que o incremento da impedância do rotor ocorreu desde 1% acima do valor nominal até 100% (valores empíricos). Neste intervalo, foi observado que para um incremento de até 15%, o sistema *fuzzy* aponta uma probabilidade de menos de 10% de chance de o motor está com barras quebradas. Na faixa entre 16% e 21%, a probabilidade sobe consideravelmente para 50%, e a partir de 22% a probabilidade passa para um patamar superior a 90%. Dentro da faixa pré-estabelecida, o sistema *fuzzy* apresenta a probabilidade de maior valor, que é 93%, a partir de 84%. Todo este comportamento pode ser analisado através da Figura 6.1.

Com isso, conclui-se que quanto maior for o valor da impedância do rotor com relação ao valor nominal, o sistema *fuzzy* diagnosticará a existência de barras quebradas no rotor com um maior grau de certeza.

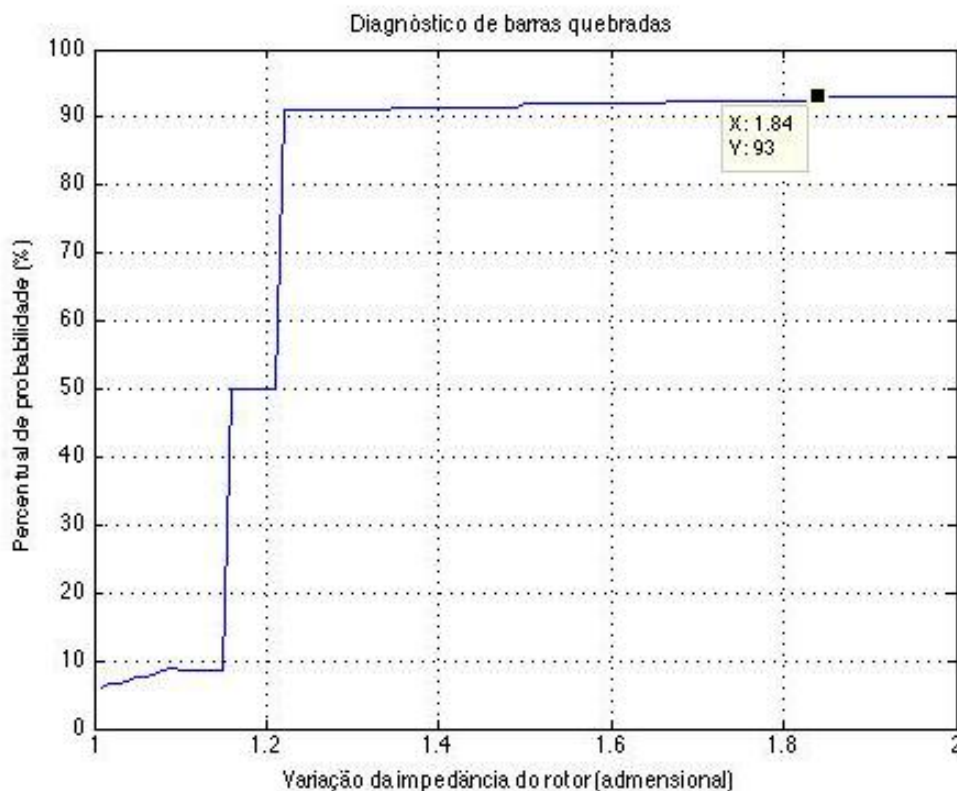


Figura 6.1 – Diagnóstico de barras quebradas de acordo com o incremento da impedância do rotor.

## 6.2. Diagnóstico Durante a Variação da Impedância do Estator

Assim como no caso anterior, também foi visto ao longo deste trabalho, que o motor com curto-circuito nos enrolamentos do estator tem a sua impedância no

estator alterada, e que para simulá-lo nesta condição, é necessário fazer um decréscimo da impedância do estator em relação ao seu valor nominal.

Assim como no caso do rotor, também foi estabelecido, de forma empírica, um intervalo de valores para a variação da impedância do estator. O intervalo em questão começa com 100% e vai reduzindo até 1% do valor nominal. Neste caso, também foram realizados 100 testes.

O desempenho do diagnóstico *fuzzy* pode ser acompanhado através da figura 6.2 fazendo-se uma varredura de trás para frente. No decréscimo da impedância do estator compreendido no intervalo entre 100% e 89%, o diagnóstico *fuzzy* indica uma evolução da probabilidade, que vai de 5% a 9% do motor estar com curto-circuito nas espiras do estator. A partir do decréscimo de 88% até 32%, a probabilidade estabiliza-se no valor de 50%. Com o decréscimo em 31%, a probabilidade salta para 91%, e na faixa de decréscimo que vai de 25% até 1%, a probabilidade permanece constante em 91,5%. Com isso, conclui-se que quanto menor for o valor da impedância do estator com relação ao valor nominal, o sistema *fuzzy* diagnosticará a existência de curto-circuito nas espiras do estator com uma maior intensidade.

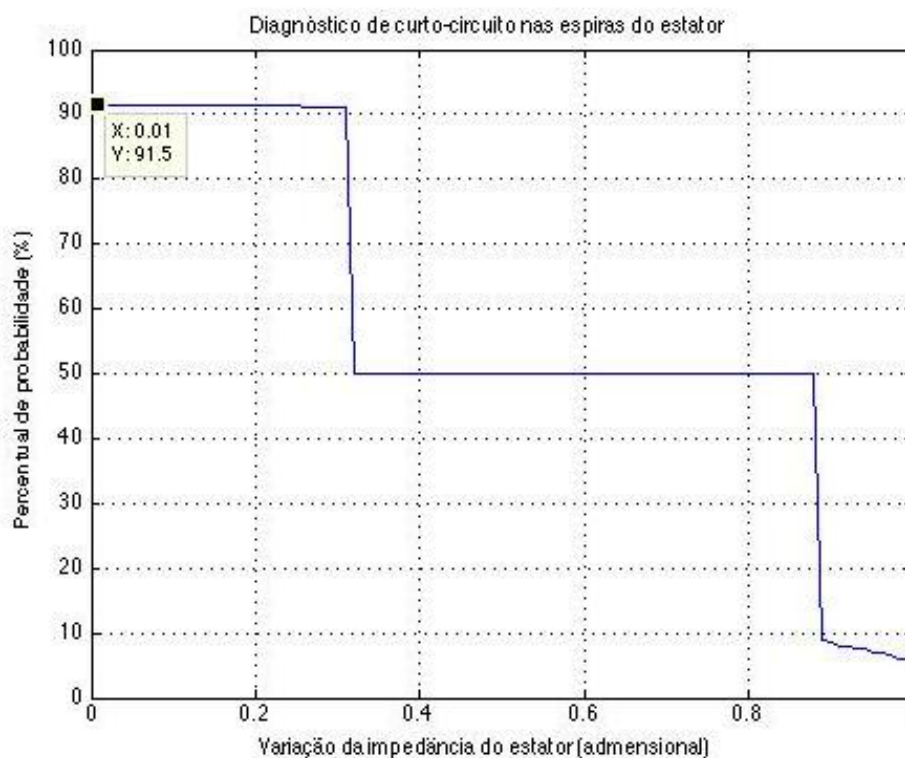


Figura 6.2 – Diagnóstico de curto-circuito nos enrolamentos do estator de acordo com o decréscimo da impedância do estator.

### 6.3. Diagnóstico Durante a Variação do Coeficiente de Atrito do Estator

Conforme visto no decorrer deste trabalho, a presença de defeito nos rolamentos do motor de indução pode ser simulada através do incremento do coeficiente de atrito, presente na sua equação mecânica.

Durante a simulação, o coeficiente de atrito foi incrementado para 100 valores distintos, sendo o primeiro em 1,09 vezes e o último em 10 vezes. Esses valores foram atribuídos empiricamente, de modo a contemplar diferentes perturbações nos rolamentos.

Através da figura 6.3 visualizamos o comportamento do diagnóstico fornecido pelo sistema *fuzzy* de acordo com o incremento aplicado ao coeficiente de atrito. Percebe-se que até o incremento de 1,36 vezes, o percentual de diagnóstico chega a, no máximo, 8,5%. A partir de 1,45 vezes, o percentual sobe vertiginosamente para 50% e permanece assim, até o incremento de 4,06 vezes. A partir de 4,15 vezes, o percentual sobe para um patamar superior a 90%. O percentual máximo existente é o de 93% que ocorre a partir do incremento de 8,92 vezes.

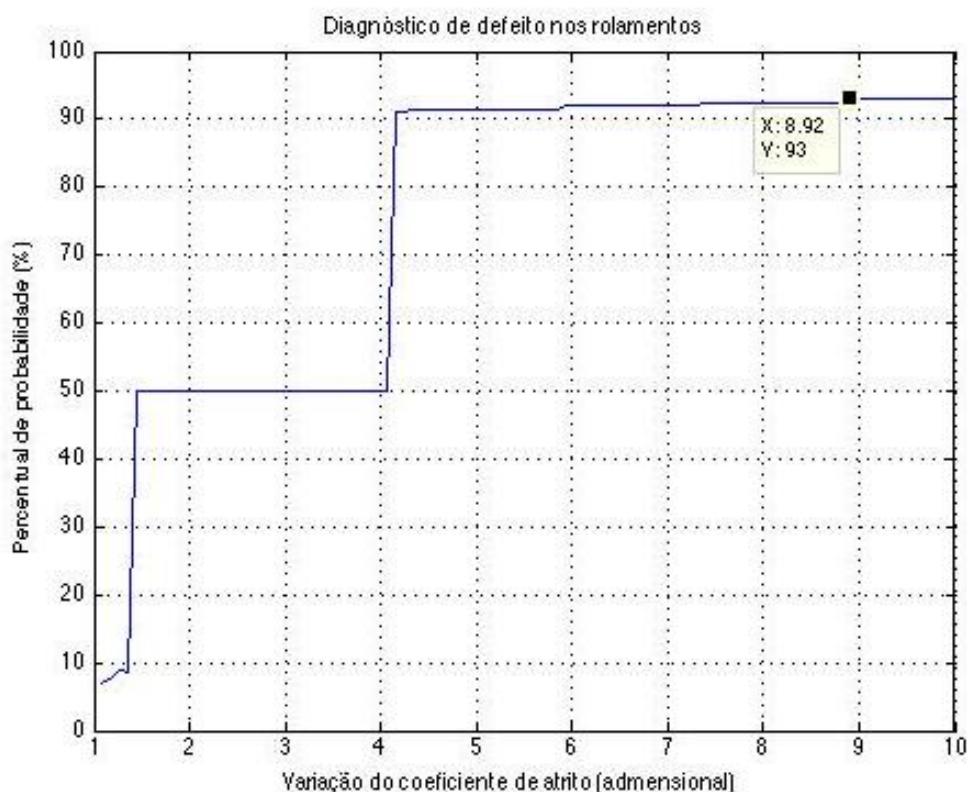


Figura 6.3 – Diagnóstico de defeito nos rolamentos do motor de acordo com o incremento do coeficiente de atrito.

## 6.4. Matriz de Confusão

Conforme visto no capítulo 5, a interface do sistema *fuzzy* permite ao usuário simular o motor com ou sem defeito, além de permitir manipular a intensidade da falha. Como saída, espera-se que o algoritmo *fuzzy* forneça um diagnóstico condizente com a falha atribuída na entrada do programa. Por exemplo, se o usuário introduziu o defeito do tipo barras quebradas, então, o diagnóstico esperado é barras quebradas com um percentual maior que as outras variáveis de saída. Entretanto, em consonância com o que foi visto nas três seções anteriores, dependendo da magnitude da variação das grandezas a serem manipuladas, o diagnóstico não será exatamente o esperado, isto porque, a referida variação pode estar situada numa faixa entre as funções de pertinência Baixa ou Media.

Deste modo, foram realizados um total de 400 testes com o nosso sistema, levando-se em consideração, os intervalos de variação das grandezas contidos nas seções 6.1, 6.2 e 6.3. Para saber qual o resultado do diagnóstico, eles foram subdivididos da seguinte forma: 100 testes para o caso do motor ser simulado *sem defeito*, mais 100 testes para o caso do motor ser simulado com *barras quebradas*, mais 100 testes para o caso do motor ser simulado com *curto-circuito nas espiras do estator* e mais 100 testes para o caso do motor ser simulado com *defeito nos rolamentos*. O resultado está na tabela 6.1 que mostra a matriz de confusão.

Tabela 6.1 – Matriz de confusão.

		Falhas detectadas			
		Sem defeito	Barras quebradas	Curto-circuito nas espiras	Defeito nos Rolamentos
Falhas produzidas	Sem defeito	100%	0%	0%	0%
	Barras quebradas	15%	85%	0%	0%
	Curto-circuito nas espiras	12%	0%	88%	0%
	Defeito nos Rolamentos	4%	0%	0%	96%

Observando a tabela 6.1, percebe-se que em todos casos em que o motor foi simulado sem defeito, em 100% deles o sistema *fuzzy* diagnosticou-o como sem defeito. Já para o caso de barras quebradas, em 85% dos testes o sistema concluiu que o motor se encontrava com barras quebrada, enquanto que em 15% deles, a

conclusão foi de que o motor não apresentava defeito. No caso de curto-circuito nas espiras do estator, esses números foram 88% e 12%, respectivamente. E no caso de defeito nos rolamentos, em 96% dos testes, o sistema diagnosticou esta falha, mas, em 4% deles, afirmou que o motor encontrava-se sem falhas.

Vale ressaltar que estes números não indicam que existem problemas no algoritmo *fuzzy*, pois variações muito pequenas nas grandezas manipuladas para produzir a falha, resultam em alterações praticamente inexpressivas no diagrama fasorial da rede e na velocidade do motor, o que implica numa “baixa” sensibilidade ao sistema. Sem falar que a matriz em questão foi concebida, considerando-se o intervalo de valores das variações contidos nas seções 6.1, 6.2 e 6.3. Se forem trabalhos apenas os valores que resultam em elevados índices de probabilidade no diagnóstico (observar as figuras 6.1, 6.2 e 6.3), então, a nova matriz de confusão apresentará resultados melhores ainda do que os já alcançados na tabela 6.1.

## 6.5. Conclusão

Neste capítulo, vimos o desempenho do diagnóstico, dado pelo sistema *fuzzy*, a partir das variações das variáveis usadas para a simulação de falhas. Foi constatado que dependendo da alteração promovida nessas variáveis, a resposta do sistema *fuzzy* se modifica, isto é, o diagnóstico pode ser alterado, ou pode ser mantido, mas, com um outro grau de porcentagem.

No caso de barras quebradas, o diagnóstico passa a ter um grau de porcentagem satisfatório, a partir de um incremento de 22% na impedância do rotor. No caso de curto-circuito nas espiras do estator, isto ocorre quando a impedância do estator é reduzida à 31% ou menos, do seu valor nominal. E no caso de defeito nos rolamentos, o diagnóstico tem um percentual elevado a partir de um incremento de 4,15 vezes do coeficiente de atrito em relação ao seu valor nominal.

Vimos também que a matriz de confusão indica um bom desempenho do sistema *fuzzy*, uma vez que o mesmo conseguiu acertar o diagnóstico de uma falha, em no mínimo, 85% dos casos. Destacamos que todos os valores aqui obtidos foram extraídos a partir do motor da tabela 4.1.

O capítulo seguinte será dedicado às considerações finais.

---

## Capítulo 7

# Considerações Finais e Trabalhos Futuros

---

Os motores de indução se constituem numa peça fundamental no processo industrial atual. Paradas em situações inoportunas ou até mesmo para manutenção corretiva, demandam tempo e custo elevados, sendo cada vez mais necessário, o desenvolvimento de técnicas avançadas para a manutenção preditiva *online*. Por isso, a detecção e o diagnóstico em tempo real para falhas em motores de indução, tem motivado inúmeras pesquisas. A Assinatura de Corrente do Motor e a Análise de Vibração, entre outras, se consolidam como técnicas tradicionais na detecção dessas falhas, enquanto que, algoritmos baseados em Inteligência Artificial se solidificam como basilares para o diagnóstico.

As falhas as quais os motores estão submetidos têm origens diferentes e variadas, que vão desde um ambiente insalubre, passando por uma má utilização da máquina. Independentemente da causa, a experiência mostra que a maior parte dessas falhas concentram-se no estator, no rotor ou nos rolamentos, e caracterizam-se por serem incipientes, o que fortalece a necessidade e a relevância de um sistema *online* que as percebam e as classifiquem para que intervenções especializadas possam ser feitas em momentos oportunos.

O estudo do comportamento dinâmico da máquina é importante por ajudar a compreender melhor o seu funcionamento, assim como, entender os efeitos durante a ocorrência de uma falha. Parâmetros como potência, torque e velocidade, demonstram distúrbios específicos, mediante falhas peculiares. Entretanto, sinais de tensão e de corrente apresentam como principal vantagem o fato de poderem ser facilmente monitorados. Assim, o diagrama fasorial de tensão e correntes de linha apresenta-se como promissor na detecção de falhas, uma vez que demonstram comportamentos típicos para falhas particulares.

O uso do diagrama fasorial como agente de detecção, é na verdade, uma das grandes contribuições deste trabalho, pois em outras pesquisas, também haviam

sinais de correntes sendo extraídos, mas, com a necessidade de uso de técnicas de conversão para o domínio da frequência. Aqui, não há esta exigência. Além do mais, o diagrama fasorial mostrou-se muito adequado para o problema proposto, pois apresentou modificações exclusivas durante a ocorrência de falhas específicas.

A velocidade do motor é outra variável de entrada muito importante, pois além poder ser coletada sem muita dificuldade, mostrou-se susceptível à existência das falhas aqui estudadas.

A lógica *fuzzy* – consolidada como uma das técnicas mais utilizadas para diagnósticos – mostrou-se apropriada à nossa proposta por possuir características como capacidade de inferência e multivalência.

O sistema proposto conseguiu expressar o diagnóstico correto em um número expressivo de casos: 100% para a condição *sem defeito*, 85% para a condição *barras quebradas*, 88% para a condição *curto-circuito nos enrolamentos do estator* e 96% para a condição *defeito nos rolamentos*. Isto demonstra uma certa eficiência e confiabilidade da nossa proposta.

## 7.1. Trabalhos Futuros

Como forma de aprofundar e aperfeiçoar a pesquisa, listamos algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar o aperfeiçoamento da modelagem da máquina elétrica, incluindo variáveis não consideradas no presente modelo, como, saturação da máquina, efeito térmico, entre outros;
- Aprimorar e/ou acrescentar a relação de falhas associados aos parâmetros do circuito equivalente do motor;
- Aperfeiçoar o sistema proposto de modo que alterações de carga mecânica e variações na tensão da rede não interfiram na detecção e no diagnóstico de uma falha existente;
- Utilizar uma rede neural artificial ou um sistema *neurofuzzy* em substituição à lógica *fuzzy* para o reconhecimento de padrões;
- Testar o sistema proposto a partir de uma máquina real;
- Verificar o comportamento do sistema quando o motor for acionado por um inversor de frequência e estiver funcionando a uma frequência distinta da nominal.

---

# Referências Bibliográficas

---

- ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O., **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 3ª Edição. Volume Único. São Paulo: McGraw-Hill, 2008, 901 p., pp 370-386.
- ARAÚJO, Romero de Souza, **Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência**. UFMG, Belo Horizonte, 2011.
- BALLAL, Makarand S.; KHAN, Zafar J.; SURYAWANSHI, Hiralal M.; SONOLIKAR, Ram L., **Adaptive Neural Fuzzy Inference System for the Detection of Inter-Turn Insulation and Bearing Wear Faults in Induction Motor**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, Fevereiro de 2007.
- BENBOUZID, Mohamed El Hachemi; VIEIRA, Michelle; THEYS, Céline., **Induction Motors' Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques**. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No. 1, Janeiro de 1999.
- BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K., **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting**. 3ª Ed. Volume 2, Gulf Professional Publishing, Houston, 1999.
- BONALDI, E. L.; SILVA, L. E. Borges da; TORRES, G. Lambert; OLIVEIRA, L. E. L., **A Rough Sets Based Classifier for Induction Motors Fault Diagnosis**. WSEAS Transactions on Systems, Londres, 2002, v. 2, n. 2, p. 230-237.
- BONNET, Austin H.; SOUKUP, George C., **Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction Motors**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 6, Novembro e Dezembro de 1988, pp 1124-1130
- BRITO, Jorge Nei, **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002, 214 pp.
- BRITO, Jorge Nei; FILHO, Paulo César Monteiro Lamim; PEDERIVA, Robson, **Detecção de Falhas em Motores Elétricos Através da Análise de Fluxo Magnético**. X Seminário Brasileiro de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamento, 2004.
- BRITO, Jorge Nei; FILHO, Paulo César Monteiro Lamim; PEDERIVA, Robson, **Utilização da Lógica Nebulosa Para Detecção de Defeitos em Motores de Indução Trifásicos**. 8º Congresso Iberoamericano em Engenharia Mecânica, Outubro de 2007.

- CHO, K. Rae; LANG, Jeffrey H.; UMANS, Stephen D., **Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and Parameter Estimation**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 3, Maio e Junho de 1992.
- CHOW, Mo-yuen; YEE, Sui Oi, **Methodology for On-line Incipient Fault Detection in Single-Phase Squirrel-Cage Induction Motors Using Artificial Neural Networks**. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, Setembro de 1991.
- CHOW, Mo-Yuen, **Guest Editorial Special Section on Motor Fault Detection and Diagnosis**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, Outubro de 2000, pp 982-983.
- EMATSU, Márcio Yoshikazu, **Análise Espectral da Corrente de Partida de Motores de Indução Para Detecção de Falhas nas Barras do Rotor**. UFSC, Florianópolis, 2008, 88 pp.
- GAZZANA, Daniel da Silva; PEREIRA, Luís Alberto; PEREIRA, Luís F. A., **Motor Current Signature Analysis and Fuzzy Logic Applied to the Diagnosis of Short-Circuit Faults in Induction Motors**. 2005, pp 275-280.
- GAZZANA, Daniel da S.; PEREIRA, Luís A.; FERNANDES, Dênis; SILVA, Jonas dos Santos, **Método da Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA) Aplicado a Detecção de Falhas de Curto-Circuito do Enrolamento do Estator de Motores de Indução**. CINDUSCON: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas – MG, 2008.
- GUEDES, Manuel Vaz, **O Motor de Indução Trifásico: Seleção e Aplicação**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.
- HAN, Tian; YANG, Bo-Suk; CHOI, Won-Ho; KIM, Jae-Sik, **Fault Diagnosis System of Induction Motors Based on Neural Network and Genetic Algorithm Using Stator Current Signals**. International Journal of Rotating Machinery, 2006, Article ID 61690, Pages 1–13.
- HATTANGADI, A. A., **Plant and Machinery Failure Prevention**. McGraw-Hill, 2005.
- HE, Qing; DU, Dong-Mei, **Fault Diagnosis of Induction Motor Using Neural Networks**. Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Hong Kong, 19-22 August 2007
- IEEE Power Engineering Society, **IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis**. Nova York, 2007.
- ISERMANN, Rolf, **Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**. Berlin, 2006.
- JUNG, Jee-Hong; LEE, Jong-Jae; KWON, Bong-Hwan, **Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 6, Dezembro de 2006.
- KABAODLU, Nihat; AKAN, Aydyn, **Detection of Machinery Failure by Using Time-Frequency Analysis**. Journal of Electrical & Electronics, Vol. 1, No 2, 2001.

- KOLLA, Sri; VARATHARASA, Logan, **Identifying Three-Phase Induction Motor Faults Using Artificial Neural Networks**. ISA Transactions, Vol. 39, 2000, pp 433-439.
- LE MOS, J. W.; GEHRKE, C. S.; SALVADORI, F.; CAMPOS, M. de; CAMARGO, R. F. de; OLIVEIRA, A. C., **Sistema Híbrido para Monitoramento, Diagnóstico e Detecção de Falhas em Motores de Indução**. CINDUSCON: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas – MG, 2008.
- LI, Bo; GODDU, Gregory; CHOW, Mo-Yuen., **Detection of Common Motor Bearing Faults Using Frequency-Domain Vibration Signals and a Neural Network Based Approach**. Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, Junho de 1998, pp. 2032-2036.
- LI, Lingxin; MECHEFSKE, C. K.; LI, Weidong, **Electric Motor Faults Diagnosis Using Artificial Neural Networks**. Vol. 46, No. 10, Outubro de 2004.
- MARÇAL, Rui F. M.; SUSIN, Altamiro A., **Detectando Falhas Incipientes em Máquinas Rotativas**. Revista Gestão Industrial, v. 01, n 021: pp 087-096, 2005.
- NANDI, Subhasis; TOLIYAT, Hamid A.; LI, Xiaodong, **Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review**. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, Dezembro de 2005, pp 719-729.
- ONG, Chee-Mun, **Dynamic Simulation of Electric Machinery**. New Jersey: Prentice-Hall, 1998, 626 p.
- PEREIRA, Luís Alberto, **Introdução à Máquina de Indução**. PUCRS, 1999.
- PINHEIRO, Hélio Henrique Cunha; MAITELLI, André Laurindo.; SALAZAR, Andrés Ortiz. **Sistema para Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução Utilizando Fasores e Lógica Fuzzy**. Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional (CBIC 2011), Novembro de 2011, Fortaleza, CE, Brasil.
- Premrudeepreechacharn, Suttichai; Utthiyoung, Tawee; Kruepengkul, Komkiat; Puongkaew, Pongsatorn, **Induction Motor Fault Detection and Diagnosis Using Supervised and Unsupervised Neural Networks**. IEEE ICIT'02, Bangkok, Tailândia, 2002.
- REIS, Aderson Jamier Santos, **Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos Utilizando Redes Neurais**. UFRN, Natal, 2010.
- RILEY, Caryn M.; LIN, Brian K.; HABETLER, Thomas G.; KLIMAN, Gerald B., **Stator Current Harmonics and Their Causal Vibrations: A Preliminary Investigation of Sensorless Vibration Monitoring Applications**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 1, Janeiro e Fevereiro de 1999.
- RODRÍGUEZ, Pedro Vicente Jover; NEGREA, Marian; ARKKIO, Antero, **A Simplified Scheme for Induction Motor Condition Monitoring Mechanical Systems and Signal Processing**. 2008, pp. 1216-1236.

- SCHOEN, Randy R.; LIN, Brian K.; HABETLER, Thomas G.; SCHLAG, Jay H.; FARAG, Samir., **An Unsupervised, On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 6, Novembro e Dezembro de 1995.
- SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy, **Controle e Modelagem Fuzzy**. 1ª Edição. Volume Único. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1999, 165 p.
- SIDDIQUE, Arfat; YADAVA, G. S.; SINGH, Bhim., **A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors**. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, Março de 2005, pp 106-114.
- TRUTT, Frederick C.; CRUZ, Carlos Santa; KOHLER, Jeffery L.; SOTTILE, Joseph., **Prediction of Electrical Behavior in Deteriorating Induction Motors**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 6, Novembro e Dezembro de 1993, pp 1239-1243.
- WALLISER, R. F.; LANDY, C. F., **Determination of Interbar Current Effects in the Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors**. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, Março de 1994.
- YANG, Jia-Qiang; HUANG, Jin; LIU, Tong., **Diagnosis of Stator Faults in Induction Motor Based on Zero Sequence Voltage After Switch-off**. Journal of Zhejiang University Science, 2007, pp. 165-172.
- YE, Zhongming; WU, Bin; SADEGHIAN, Alireza., **Current Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, No. 6, Dezembro de 2003.
- ZERAOULIA, M.; MAMOUNE, A.; MANGEL, H.; BENBOUZID, M. E. H., **A Simple Fuzzy Logic Approach for Induction Motors Stator Condition Monitoring**. J. Electrical Systems 1-1 (2005): 15-25.