

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DEMerval MIZUYAMA**

**APLICAÇÃO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS COMO PREDITOR DE  
RUGOSIDADE EM PROCESSO DE TORNEAMENTO**

**DISSERTAÇÃO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2012**

**DEMerval MIZUYAMA**

**APLICAÇÃO DE REDES NEURais ARTIFICIAIS COMO PREDITOR DE  
RUGOSIDADE EM PROCESSO DE TORNEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica”.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel

**CORNÉLIO PROCOPIO**

**2012**

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

- M685a Mizuyama, Demerval  
Aplicações de redes neurais artificiais como preditor de rugosidade em processo de torneamento / Demerval Mizuyama. – 2012.  
201 f. : il. ; 30 cm
- Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior.  
Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2012.  
Bibliografia: p. 144-150.
1. Motores elétricos de indução. 2. Usinagem. 3. Redes Neurais (Computação). 4. Superfícies (Tecnologia). 5. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Silva Júnior, Carlos Elias da, orient. II. Goedel, Alessandro, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Cornélio Procópio  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Mestrado em Engenharia Elétrica



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS COMO PREDITOR DE RUGOSIDADE EM PROCESSO DE TORNEAMENTO

por

Demerval Mizuyama

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica” e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cornélio Procópio, 23/08/2012

---

Alessandro Goedtel, Prof. Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Carlos Elias da Silva Júnior, Prof. Dr.

---

Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, Prof. Dr.

---

Hélio Voltolini, Prof. Dr.

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso do Programa”

Dedico este trabalho com carinho e estima à minha esposa Sueli e a minha filha Lígia pelo incentivo e paciência durante as pesquisas, estudos e elaboração desse trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve a colaboração de diversas pessoas e instituições e que certamente estes parágrafos não irão atender a todos que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço aos Professores Carlos Elias da Silva Júnior Prof. Dr e Alessandro Goedel Prof. Dr. pela dedicação e pela orientação e co-orientação deste trabalho e, por meio dele, eu me reporto a toda a comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP) pelo apoio incondicional.

Aos colegas Angelo Feracin Neto, Genesio Lopes da Silva, Rodrigo Henrique Lopes da Silva, Conrado Di Raimo, Rogerio Akihide Ikegami, Luiz Marcelo Chiesse da Silva, Rodrigo Rodrigues Sumar, Jefferson Luiz Cesar Salles, Luiz Otavio Correa, Carlos de Nardi, Marisa Marques de Souza e Márcia Andrea de Oliveira. Gostaria de externar minha satisfação de poder conviver com eles durante a realização deste estudo a todos os colegas de trabalho.

Ao Wanderlei Malaquias técnico de laboratório de Processos de Fabricação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – CP pelo auxílio na atividades experimentais.

Aos colegas de pesquisas Clayton Luiz Graciola, Leonardo Bruno Garcia Campanol, Tiago Henrique dos Santos, Wylham Salviano Gongora, Paulo Broniera pelas inúmeras contribuições ao trabalho.

Ao Sr. Rafael Andrade Pasqual Pons (Assistente de Planejamento) da Torcomp Usinagem e Componentes de Cornélio Procópio pela medição de rugosidade no protótipo de corpo de prova.

Agradeço o Sr. Ademar Minato (Diretor Comercial e Industrial) e os colaboradores Alberto Valério (Gerente de Produção Industrial), Ramires dos Santos (Gerente Operacional de Campo) da Indústria COMTRAFO – Transformadores de Cornélio Procópio que contribuíram para a concretização dos resultados alcançados neste trabalho.

Ao CIPECA – Centro integrado de Pesquisa em Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP) pela destinação de espaço físico e apoio administrativo e CEETEPS – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” – ETE Pedro D’Arcádia Neto (Assis – S.P.).

À Fundação Araucária (Processo N<sup>o</sup> 06/56093-3), ao Cnpq (Processo N<sup>o</sup> 474290/2008-5, N<sup>o</sup> 473576/2011-2 e N<sup>o</sup> 552269/2011-5).

"Estratégia é a arte ou ciência de saber identificar e empregar meios disponíveis para atingir determinados fins, apesar de a eles se oporem obstáculos e/ou antagonismos conhecidos." (Sun Tzu).

Ainda que eu tenha o dom de profetizar e conheça todos os mistérios e toda a ciência; ainda que eu tenha tamanha fé, ao ponto de transportar montes, se não tiver amor, nada serei. (1 Coríntios 13,2).

## RESUMO

MIZUYAMA, Demerval. **Aplicação de Redes Neurais Artificiais como Preditor de Rugosidade em Processo de Torneamento**. 2012. 201 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2012.

As máquinas-ferramentas são encontradas em diversas indústrias do setor metal mecânico e oficinas. Estas são acionadas por motores de indução trifásicos, os quais estão sujeitos a problemas relacionados à carga aplicada em seus eixos bem como aos distúrbios da alimentação de energia elétrica na rede. No processo de usinagem os parâmetros relacionados à máquina ferramenta, às propriedades do material da peça, à geometria e ao material da ferramenta e ao próprio processo em si, podem interferir no acabamento superficial das peças usinadas. A rugosidade é considerada um dos principais índices de qualidade do produto final nos processos de usinagem, podendo apresentar variações com as alterações do conjugado eletromagnético no eixo do motor. A proposta deste trabalho é apresentar um preditor de rugosidade superficial de peças baseado exclusivamente na corrente eficaz que alimenta o motor de indução trifásico num processo de torneamento, utilizando redes neurais artificiais para analisar o comportamento da rugosidade em função das condições de usinagem empregadas. Resultados de simulação são apresentados e mostram o desempenho da Rede Neural Artificial (RNA) proposta para diversas situações de operação com desequilíbrios de tensões (entre +10% à -10%) e degraus de torque de carga (25 degraus de 1 em 1 Nm) com erro relativo médio (ERM) de 0,0120%. Os resultados experimentais conforme o método da (RNA) proposta para diversas situações de alimentação da rede elétrica: equilibrado, falta de fase e desequilíbrios de tensões (sobretensão e subtensão), mostram elevada capacidade em aproximar o comportamento da variável de saída (rugosidade  $R_a$ ) com relação aos valores de entrada (correntes RMS das fases A, B e C). O maior erro relativo médio verificado foi de 0,001754%.

**Palavras-chave:** Motores elétricos de indução. Usinagem. Rede neural artificial multicamadas. Predição da rugosidade.

## ABSTRACT

MIZUYAMA, Demerval. **Application of Artificial Neural Networks as a Roughness Predictor in a Turning Process**. 2012. 201 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2012.

The machine tools are found in various metal and mechanical industries as well as garages. They are operated by three phase induction motors, which are subject to problems related to the applied load on their rotors and disturbances concerning to the quality of electrical supply network. Within the machining process the parameters related to the machine tool, the properties of the workpiece material, geometry and material tool and the process itself, may affect the surface completion of the machined parts. The roughness is considered one of the main indexes of the final product quality in machining processes which may produce changes in the electromagnetic torque on the motor shaft. The purpose of this work is to present a predictor of superficial roughness of parts based on the dynamics of the effective current that feeds the induction motor in the turning process using artificial neural networks to analyze the roughness actions according to the machining conditions employed (speed cutting feed and range of the tool tip). Simulation results are presented and show the performance of the Artificial Neural Network (ANN) proposed several operating situations with imbalances of tensions (between +10% to -10%) and load torque steps (25 steps in 1 1 Nm) with mean relative error (MRE) of 0.0120%. Experimental results depending on the method of (RNA) proposed for various situations power grid: balanced, phase loss and voltage imbalances (overvoltage and undervoltage), show high ability to approximate the behavior of the output variable (roughness Ra) with respect to input values (RMS currents of phases a, B and C). The greatest mean relative error of 0.001754% was observed.

**Keywords:** Induction electric motors. Machining Operation. Artificial Multilayer Neural Network. Roughness Prediction

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Exemplo de afundamento de tensão ( <i>sag</i> ).....	34
FIGURA 2	- Exemplo de elevação de tensão ( <i>swell</i> ).....	35
FIGURA 3	- Curvas de tensão e corrente para um sistema elétrico com cargas lineares.....	38
FIGURA 4	- Curvas de tensão e corrente para o caso de carga não linear.....	39
FIGURA 5	- Circuito equivalente de sequência positiva.....	43
FIGURA 6	- Circuito equivalente de sequência negativa.....	43
FIGURA 7	- Topografia da superfície composta de rugosidade, ondulação, os erros de forma e falhas.....	50
FIGURA 8	- Seção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores.....	51
FIGURA 9	- Influência da rugosidade superficial sobre a resistência à fadiga de aços.....	52
FIGURA 10	- Órbita da ferramenta simulada.....	55
FIGURA 11	- Sistema de linha média.....	57
FIGURA 12	- Rugosidade média ( $R_a$ ).....	57
FIGURA 13	- Altura das irregularidades dos 10 pontos ( $R_z$ ).....	59
FIGURA 14	- Altura máxima da rugosidade ( $R_{máx}$ ).....	60
FIGURA 15	- Profundidade média ( $R_p$ ).....	60
FIGURA 16	- Comprimento para avaliação de rugosidade.....	61
FIGURA 17	- Rugosidade e ondulação.....	62
FIGURA 18	- Neurônio artificial.....	66
FIGURA 19	- Função de ativação linear.....	68
FIGURA 20	- Função de ativação logística.....	69
FIGURA 21	- Influência do parâmetro $\beta$ na função de ativação logística....	69
FIGURA 22	- Função de ativação degrau.....	70
FIGURA 23	- Função de ativação tangente hiperbólica.....	70

FIGURA 24	- Influência do parâmetro $\beta$ na função de ativação tangente hiperbólica.....	71
FIGURA 25	- Função de ativação gaussiana.....	71
FIGURA 26	- Rede <i>feedforward</i> de camadas múltiplas.....	73
FIGURA 27	- Ilustração das duas fases de treinamento da rede PMC.....	75
FIGURA 28	- Estrutura do preditor de rugosidade.....	76
FIGURA 29	- Arquitetura da rede neural multicamadas <i>feedforward</i> usada na predição de rugosidade.....	83
FIGURA 30	- Estrutura da validação.....	85
FIGURA 31	- Curvas de validação de rugosidade ( $R_a$ ): condição 1.....	86
FIGURA 32	- Curvas de validação de rugosidade ( $R_a$ ): condição 2.....	86
FIGURA 33	- Representação esquemática da proposta do trabalho.....	88
FIGURA 34	- Regulador de tensão trifásico utilizado.....	89
FIGURA 35a	- Conexão (entrada) da rede trifásica (220 V) ao transformador elevador.....	90
FIGURA 35b	- Conexão (saída) do transformador trifásico (380 V) ao regulador de tensão trifásico.....	90
FIGURA 36	- Torno paralelo universal Nardini MS 205.....	92
FIGURA 37	- Maleta de instrumentação.....	93
FIGURA 38	- Lubrificação convencional dirigida à interface ferramenta-peça.....	94
FIGURA 39	- Geometria do inserto de metal duro utilizada.....	95
FIGURA 40	- Porta-ferramenta contendo o inserto.....	95
FIGURA 41	- Porta-ferramenta de haste quadrada PCLNR 2525M 12.....	96
FIGURA 42a	- Representação esquemática do corpo de prova.....	97
FIGURA 42b	- Corpos de prova usinados.....	98
FIGURA 43	- Termo-higro-anemômetro digital portátil.....	99
FIGURA 44	- Ilustração do apalpador.....	99
FIGURA 45	- Esquema de funcionamento de um rugosímetro.....	100

FIGURA 46	- Rugosímetro modelo SJ201.....	101
FIGURA 47	- Representação esquemática do banco de ensaios para subtensão.....	102
FIGURA 48	- Representação esquemática do banco de ensaios para sobretensão.....	104
FIGURA 49a	- Representação esquemática da fixação da unidade acionadora.....	105
FIGURA 49b	- Fixação da unidade acionadora ao traçador de altura.....	105
FIGURA 50	- Leitura de rugosidade no ponto médio das superfícies 1 e 2 do corpo de prova usinado.....	106
FIGURA 51	- Medição da rugosidade da 1ª superfície do corpo de prova...	106
FIGURA 52	- Medição da rugosidade da 2ª superfície do corpo de prova...	106
FIGURA 53a	- Pontos de medições de rugosidade ao longo perímetro circular do corpo de prova.....	107
FIGURA 53b	- Pontos de medições 1, 2 e 3.....	107
FIGURA 54	- Valores médios de rugosidade das superfícies usinadas.....	108
FIGURA 55	- Configuração da RNA utilizada.....	109
FIGURA 56	- Valores eficazes (RMS) da corrente.....	111
FIGURA 57	- Estrutura do conversor RMS.....	112
FIGURA 58	- Estrutura Treinamento da RNA.....	113
FIGURA 59	- Valores eficazes (RMS) da corrente com filtro mediano de ordem 400.....	113
FIGURA 60	- Estrutura Treinamento da RNA.....	114
FIGURA 61	- Treinamento da RNA com filtro mediano de ordem 2000.....	116
FIGURA 62	- Erro Relativo Médio utilizando o filtro mediano de ordem 2000.....	116
FIGURA 63	- Treinamento da RNA com filtro mediano de ordem 400.....	117
FIGURA 64	- Erro Relativo Médio com o filtro mediano de ordem 400.....	118

FIGURA 65a	- Resultado de treinamento RNA para a 1ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	119
FIGURA 65b	- Resultado do ERM para a 1ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	120
FIGURA 66a	- Resultado de treinamento RNA para a 2ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	120
FIGURA 66b	- Resultado do ERM para a 2ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	121
FIGURA 67a	- Resultado de treinamento RNA para a 3ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	122
FIGURA 67b	- Resultado do ERM para a 3ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	122
FIGURA 68a	- Resultado de treinamento RNA para a 4ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	123
FIGURA 68b	- Resultado do ERM para a 4ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	124
FIGURA 69a	- Resultado de treinamento RNA para a 5ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	125
FIGURA 69b	- Resultado do ERM para a 5ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	125
FIGURA 70a	- Resultado de treinamento RNA para a 6ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	126
FIGURA 70b	- Resultado do ERM para a 6ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase.....	127
FIGURA 71a	- Resultado de treinamento RNA para a 7ª condição: sobretensão.....	127
FIGURA 71b	- Resultado do ERM para a 7ª condição: sobretensão.....	128
FIGURA 72a	- Resultado de treinamento RNA para a 8ª condição: sobretensão.....	129

FIGURA 72b	- Resultado do ERM para a 8ª condição: sobretensão.....	129
FIGURA 73a	- Resultado de treinamento RNA para a 9ª condição: sobretensão.....	130
FIGURA 73b	- Resultado do ERM para a 9ª condição: sobretensão.....	130
FIGURA 74a	- Resultado de treinamento RNA para a 10ª condição: sobretensão.....	131
FIGURA 74b	- Resultado do ERM para a 10ª condição 10 sobretensão.....	132
FIGURA 75a	- Resultado de treinamento RNA para a 11ª condição: sobretensão.....	132
FIGURA 75b	- Resultado do ERM para a 11ª condição: sobretensão.....	133
FIGURA 76a	- Resultado de treinamento RNA para a 12ª condição: sobretensão.....	134
FIGURA 76b	- Resultado do ERM para a 12ª condição: sobretensão.....	134
FIGURA 77	- Resultados de rugosidade para $V_c = 199,5$ m/min, $f = 0,251$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm.....	135
FIGURA 78	- Resultados de rugosidade para $V_c = 398,98$ m/min, $f = 0,251$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm.....	136
FIGURA 79	- Resultados de rugosidade para $V_c = 199,5$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm.....	137
FIGURA 80	- Resultados de rugosidade para $V_c = 398,98$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm.....	137
FIGURA 81	- Resultados de rugosidade para $V_c = 199,5$ m/min, $f = 0,074$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm.....	138
FIGURA 82	- Resultados de rugosidade para $V_c = 398,98$ m/min, $f = 0,074$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm.....	139

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	- Características de alguns distúrbios de qualidade de energia.....	33
QUADRO 2	- Limites de amplitude de <i>sag</i> e <i>swell</i> com faixa de tempo.....	34
QUADRO 3	- Limite dos harmônicos de corrente.....	42
QUADRO 4	- Recomendações de comprimento de amostragem.....	61
QUADRO 5	- Faixas de rugosidade ( $R_a$ ) x processos de usinagem.....	63
QUADRO 6	- Condições de desequilíbrio de tensões.....	84
QUADRO 7	- Parâmetros de desequilíbrios utilizadas na validação.....	85
QUADRO 8	- Erro relativo médio (ERM) e desvio padrão (DP).....	87
QUADRO 9	- Características do motor principal do torno.....	91

## LISTA DE SIGLAS

A	Ampère
AA	<i>Arithmetical Average</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
APEC	<i>Applied Power Electronics Conference</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Carbono
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLA	<i>Center Line Average</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DC	Corrente Contínua
DHT	Distorção Harmônica Total
DIN	<i>Deutscher Industrie Normen</i>
Fmm	Força Magnetomotriz
HSC	<i>High Speed Cutting</i>
HVM	<i>High Velocity Machining</i>
IA	Inteligência Artificial
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LMS	<i>Least Mean Square</i>
mA	Mili Ampère
MIT	Motor de Indução Trifásico
MLP	<i>Multi Layer Perceptrons</i>
Mn	Manganês
Mm	Milímetro
MS	Mili segundos
NBR	Norma Brasileira
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
Nm	Newton metro

Ns	Nano segundos
P	Fósforo
Pu	Por unidade
$R_a$	<i>Roughness average</i>
RBF	<i>Radial basis function</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNA	Rede Neural Artificial
RPM	Rotações por minuto
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Si	Silício
<i>Taps</i>	Derivações
TDH	Taxa de distorção harmônica
V	Volts
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
W	Watts

## LISTA DE ACRÔNIMOS

kHz	Kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
Mpa	Mega Pascal
PMC	<i>Perceptron</i> Multicamadas
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RQE	Registrador de Parâmetros de Qualidade de Energia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{rms}$	valor rms da forma de onda total
$V_{1,rms}$	valor rms da forma de onda do primeiro harmônico
$I_p$	corrente de sequência positiva [Ampère]
$I_n$	corrente de sequência negativa [Ampère]
$\omega_{sm}$	velocidade síncrona [radiano/segundo] mecânicos
$\omega_e$	velocidade angular da fmm [radiano/segundo]
$P$	número de pares de polos do motor
$\omega_{rm}$	velocidade do rotor [radiano/segundo] mecânicos
$S$	escorregamento [%]
$V_{as}, V_{bs}$ e $V_{cs}$	tensões nas fases “ <i>as</i> ”; “ <i>bs</i> ” e “ <i>cs</i> ” do estator [Volt]
$i_{as}, i_{bs}$ e $i_{cs}$	correntes nas fases “ <i>as</i> ”; “ <i>bs</i> ” e “ <i>cs</i> ” do estator [Ampère]
$\lambda_{as}, \lambda_{bs}$ e $\lambda_{cs}$	fluxo nas fases “ <i>as</i> ”; “ <i>bs</i> ” e “ <i>cs</i> ” do estator [Weber]
$r_s$	resistência do estator [Ohm]
$V_{ar}, V_{br}$ e $V_{cr}$	tensões nas fases “ <i>as</i> ”; “ <i>bs</i> ” e “ <i>cs</i> ” do rotor [Volt]
$i_{ar}, i_{br}$ e $i_{cr}$	correntes nas fases “ <i>as</i> ”; “ <i>bs</i> ” e “ <i>cs</i> ” do rotor [Ampère]
$\lambda_{ar}, \lambda_{br}$ e $\lambda_{cr}$	fluxo nas fases “ <i>as</i> ”; “ <i>bs</i> ” e “ <i>cs</i> ” do rotor [Weber]
$r_r$	resistência do rotor [Ohm]
$\lambda_s^{abc}$	fluxo nas fases “ <i>as</i> ”; “ <i>bs</i> ” e “ <i>cs</i> ” concatenado do estator [Weber]
$\lambda_r^{abc}$	fluxo nas fases “ <i>ar</i> ”; “ <i>br</i> ” e “ <i>cr</i> ” concatenado do rotor [Weber]
$i_s^{abc}$	vetor de corrente nas fases “ <i>ar</i> ”; “ <i>br</i> ” e “ <i>cr</i> ” concatenado do estator [Ampère]
$i_r^{abc}$	vetor de corrente nas fases “ <i>ar</i> ”; “ <i>br</i> ” e “ <i>cr</i> ” concatenado do rotor [Ampère]
$L_{ls}$	indutância de dispersão do estator [Henry]
$L_{lr}$	indutância de dispersão do rotor [Henry]
$L_{ss}$	indutância própria do estator [Henry]

$L_{rr}$	indutância própria do rotor [ <i>Henry</i> ]
$L_{sm}$	indutância mútua do estator [ <i>Henry</i> ]
$L_{rm}$	indutância mútua do rotor [ <i>Henry</i> ]
$L_{rs}$	indutância mútua entre rotor e estator [ <i>Henry</i> ]
$v_{qs}^s$	tensão no estator no eixo “ <i>b</i> ” [Volt]
$v_{ag}$	tensão aplicada ao estator nos terminais “ <i>ag</i> ” [Volt]
$v_{bg}$	tensão aplicada ao estator nos terminais “ <i>bg</i> ” [Volt]
$v_{cg}$	tensão aplicada ao estator nos terminais “ <i>cg</i> ” [Volt]
$v_{sg}$	tensão aplicada ao estator nos terminais “ <i>sg</i> ” [Volt]
$v_{ds}^s$	tensão no estator no eixo “ <i>ds</i> ” [Volt]
$v_{0s}$	tensão no estator no eixo “0” [Volt]
$i_{as}$	corrente no estator no ramo “ <i>as</i> ” [Ampère]
$i_{qs}^s$	corrente no estator no eixo “ <i>qs</i> ” [Ampère]
$i_{0s}$	corrente no estator no eixo “0” [Ampère]
$i_{bs}$	corrente no estator no ramo “ <i>bs</i> ” [Ampère]
$i_{ds}^s$	corrente no estator no eixo “ <i>d</i> ” [Ampère]
$v_{qr}'$	tensão no rotor no eixo “ <i>q</i> ” [Volt]
$v_{ar}'$	tensão no rotor nos terminais “ <i>ar</i> ” [Volt]
$v_{br}'$	tensão no rotor nos terminais “ <i>br</i> ” [Volt]
$v_{cr}'$	tensão no rotor nos terminais “ <i>cr</i> ” [Volt]
$v_{an}'$	tensão no rotor nos terminais “ <i>an</i> ” [Volt]
$v_{bn}'$	tensão no rotor nos terminais “ <i>bn</i> ” [Volt]
$v_{cn}'$	tensão no rotor nos terminais “ <i>cn</i> ” [Volt]

$v'_{rn}$	tensão no rotor nos terminais “rn” [Volt]
$v'_{dr}$	tensão no rotor no eixo “d” [Volt]
$v'_{0r}$	tensão no rotor no eixo “0” [Volt]
$v'_{qr}$	tensão no rotor no eixo “q” [Volt]
$\cos\theta_r(t)$	cosseno do ângulo instantâneo do rotor [radiano]
$\text{sen}\theta_r(t)$	seno do ângulo instantâneo do rotor [radiano]
$v'^s_{dr}$	tensão no rotor no eixo “d” [Volt]
$\theta_r(t)$	ângulo instantâneo do rotor [radiano]
$\omega_r(t)$	velocidade instantânea do rotor [radiano/segundo]
$\theta_r(0)$	valor inicial do ângulo do rotor [radiano/segundo]
$i'^r_{qr}$	corrente no rotor no eixo “q” [Ampère]
$i'^s_{qr}$	corrente no rotor no eixo “q” [Ampère]
$i'^s_{dr}$	corrente no rotor no eixo “d” [Ampère]
$i'_{ar}$	corrente no rotor no ramo “ar” [Ampère]
$i'^r_{qr}$	corrente no rotor no eixo “q” [Ampère]
$i'_{0r}$	corrente no rotor no eixo “0” [Ampère]
$i'_{br}$	corrente no rotor no ramo “br” [Ampère]
$i'_{cr}$	corrente no rotor no ramo “cr” [Ampère]
$\psi^s_{qs}$	fluxo no eixo “q” [Weber]
$\omega_b$	velocidade angular (=2 $\pi$ f) [radiano/segundo]
$v^s_{qs}$	tensão do estator no eixo “q” [Volt]
$r_s$	resistência do estator [Ohm]
$x_{ls}$	reatância indutiva do estator [Ohm]

$\Psi_{mq}^s$	fluxo no estator da máquina [Weber]
$\Psi_{qs}^s$	fluxo no estator no eixo “q” [Weber]
$\Psi_{ds}^s$	fluxo no eixo “d” [Weber]
$\Psi_{qr}^{1s}$	fluxo do rotor no eixo “q” [Weber]
$\Psi_{dr}^{1s}$	fluxo do rotor no eixo “d” [Weber]
$r'_r$	resistência ôhmica do rotor [Ohm]
$x'_{lr}$	reatância indutiva do rotor [Ohm]
$\omega_r$	velocidade angular do rotor [radiano/segundo]
$\Psi_{md}^s$	fluxo da máquina no eixo “d” [Weber]
$xM$	reatância da máquina [Weber]
$T_{em}$	torque eletromagnético da máquina [Nm]
$P$	número de pólos da máquina
$J$	momento de inércia em [Kg.m <sup>2</sup> ]
$T_{mech}$	torque mecânico em [Nm]
$T_{damp}$	torque de amortecimento [Nm]
$T_{1(s)}$	torque no eixo de entrada da engrenagem motora [Nm]
$\theta_{1(s)}$	ângulo de giro [radiano/segundo]
$J_{es}^2$	momento de inércia [Kg.m <sup>2</sup> ]
$D_{es}$	coeficiente de amortecimento viscoso para sistema mecânico em rotação [Nm]
$J_e$	momento de inércia do conjunto motor / engrenagens [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_1$	momento de inércia do motor [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_i$	momento de inércia na carga [Kg.m <sup>2</sup> ]
$N_1$	número de dentes da engrenagem motora
$N_2$	número de dentes da engrenagem movida
$D_i$	coeficiente de atrito viscoso da máquina em [Nm]

$D$	diâmetro da peça [mm]
$N$	rotação da peça [rpm]
$F$	avanço [mm/volta]
$V_c$	velocidade de corte [m/min]
$a_p$	profundidade de corte [mm]
$F_c$	força de corte [N]
$F_f$	força de avanço [N]
$V_f$	velocidade de avanço [mm/min]
$\mu\text{c}$	Mícron
$\beta$	constante real
$C$	parâmetro que define o centro da função gaussiana
$\sigma$	desvio padrão
$R_a$	rugosidade superficial [ $\mu\text{m}$ ]
$M$	sistema de linha média
$r_\epsilon$	raio de ponta da ferramenta [mm]
$M$	número de sinais de entrada do neurônio
$X_i$	$i$ -ésimo sinal de entrada do neurônio
$w_i$	peso associado com o $i$ -ésimo sinal de entrada
$B$	limiar de cada neurônio
$v_j(k)$	resposta do $j$ -ésimo neurônio em $k$
$\varphi_j(\cdot)$	função de ativação do $j$ -ésimo neurônio
$y_j(k)$	sinal de saída do $j$ -ésimo neurônio em $k$
$d_j(k)$	resposta desejada do $j$ -ésimo neurônio de saída
$P$	número de neurônios da saída

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>25</b>
1.1 OBJETIVO.....	26
1.2 MOTIVAÇÃO.....	27
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>28</b>
2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	28
2.1.1 Distúrbios de qualidade de energia.....	31
2.1.2 Transitórios.....	31
2.1.3 Variações de tensão de curta duração.....	32
2.1.4 Variações de tensão de longa duração.....	35
2.1.5 Desequilíbrios de tensão.....	36
2.1.6 Deformações da forma de onda de tensão.....	36
2.1.7 Flutuações de tensão.....	37
2.1.8 Harmônicos.....	37
2.1.8.1 Distorção harmônica total (TDH).....	40
2.1.8.2 Consequências da presença de harmônicos.....	41
2.1.8.3 Efeitos dos harmônicos em motores elétricos.....	41
2.1.9 Circuito equivalente de uma máquina em condições de desequilíbrio.....	43
2.1.10 Efeitos de afundamento de tensão simétrica em motores de indução gaiola de esquilo.....	45
2.1.11 Equações matemáticas de uma forma de onda.....	46
2.1.12 Possíveis causas de alguns eventos de qualidade de energia.....	47
2.2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	48
2.3 ASPECTOS DO PROCESSO DE USINAGEM.....	49
2.4 ASPECTOS DO ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	50
2.4.1 Processo da determinação da rugosidade.....	54
2.4.2 Composição da superfície.....	54
2.4.3 Medição da rugosidade (sistema baseado na profundidade da rugosidade).....	56
2.4.4 Acabamento superficial para diversos processos de usinagem.....	62
2.5 ASPECTOS RELATIVOS AOS SISTEMAS INTELIGENTES.....	63
2.5.1 Sistemas baseados em conhecimento ou especialistas.....	64
2.5.2 Lógica nebulosa ou “Fuzzy”.....	64
2.5.3 Algoritmos genéticos.....	65
2.5.4 Redes neurais artificiais.....	65
2.5.5 O neurônio artificial.....	66
2.5.6 Topologias de rede neural artificial.....	72
2.5.7 Regras de aprendizado.....	73
2.5.8 Processos baseados em modelos de rede neural.....	76
2.5.9 Erros de predição.....	79
2.5.10 Aplicações de rede neural artificial em processos de manufatura.....	80
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>83</b>
3.1 MODELO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL UTILIZADA.....	83
3.1.1 Validação da rede neural na simulação.....	85
3.1.2 Afundamento de tensão ( <i>sag</i> ).....	88
3.1.3 Elevação de tensão ( <i>swell</i> ).....	89
3.1.4 Máquina-ferramenta.....	91
3.1.5 Ensaio preliminares.....	92

3.1.6	Condições de usinagem.....	93
3.1.7	Ferramenta de corte.....	94
3.1.8	Corpo de prova.....	97
3.1.9	Instrumentos de medição.....	98
3.1.9.1	Medições de temperatura e umidade relativa do ar.....	98
3.1.9.2	Medições de rugosidade.....	99
3.1.10	Atividade experimental.....	101
3.1.10.1	Procedimentos de usinagem na condição de subtensão .....	102
3.1.10.2	Procedimentos de usinagem na condição de sobretensão .....	103
3.1.11	Procedimentos de calibração do rugosímetro e medições.....	104
3.1.12	Procedimentos de aferição da rugosidade.....	105
3.1.13	Configuração da rede neural artificial.....	108
3.1.13.1	Processo de aprendizagem.....	110
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>115</b>
4.1	RESULTADO E ANÁLISES PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE AVANÇOS E DE VELOCIDADES.....	115
4.2	RESULTADOS DE GENERALIZAÇÃO DA RNA PARA CADA CONDIÇÃO DE ENSAIO.....	118
4.2.1	Resultado de generalização da RNA para a 1ª condição de ensaios.....	119
4.2.2	Resultado de generalização da RNA para a 2ª condição de ensaios.....	120
4.2.3	Resultado de generalização da RNA para a 3ª condição de ensaios.....	121
4.2.4	Resultado de generalização da RNA para a 4ª condição de ensaios.....	123
4.2.5	Resultado de generalização da RNA para a 5ª condição de ensaios.....	124
4.2.6	Resultado de generalização da RNA para a 6ª condição de ensaios.....	126
4.2.7	Resultado de generalização da RNA para a 7ª condição de ensaios.....	127
4.2.8	Resultado de generalização da RNA para a 8ª condição de ensaios.....	128
4.2.9	Resultado de generalização da RNA para a 9ª condição de ensaios.....	130
4.2.10	Resultado de generalização da RNA para a 10ª condição de ensaios....	131
4.2.11	Resultado de generalização da RNA para a 11ª condição de ensaios....	132
4.2.12	Resultado de generalização da RNA para a 12ª condição de ensaios....	133
4.3	RESULTADOS DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DA MÁQUINA- FERRAMENTA.....	135
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>141</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
5.2	PUBLICAÇÃO RELATIVA AO TRABALHO.....	143
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>144</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>151</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>198</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica tem se tornado um assunto de extrema importância em todos os setores industriais e de serviços, constituindo um fator crucial para a competitividade.

A falta de qualidade de energia elétrica refere-se a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e/ou corrente, afeta o funcionamento dos motores elétricos que acionam as máquinas-ferramentas em um determinado instante e em uma determinada localização em um sistema elétrico de potência.

Estes fenômenos eletromagnéticos são eventos que alteram as características nominais da energia elétrica, independente de sua causa geradora, traz prejuízo ao setor industrial aumentando o seu custo de fabricação devido à necessidade de retrabalhos, desperdício de matéria prima, redução de produtividade, interrupção do processo de fabricação e aumento do custo operador/hora despendida.

Devido à crescente demanda de energia consumida pelos setores industriais, os clientes têm se preocupado com relação a parâmetros de qualidade de energia.

Os principais fatores que fazem da qualidade de energia elétrica um tema de interesse de pesquisadores são:

- ✓ Crescente uso de equipamentos computadorizados e sensíveis às perturbações do sistema elétrico;
- ✓ Exigência por parte de consumidores, de uma energia de melhor qualidade;
- ✓ Aumento do número de cargas de natureza não linear (sistemas micro processados, fontes chaveadas, etc.) em instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais, o que provoca o aumento significativo da ocorrência de deformidades (distúrbios) nas formas de onda da tensão e corrente nos seus sistemas de distribuição;
- ✓ A regulamentação do setor elétrico, no que diz respeito à qualidade de energia elétrica, em fase de implantação.

O aparecimento de distúrbios na rede de energia elétrica tais como harmônicos, inter-harmônicos, flutuações de tensão, afundamentos, transitórios, entre outros, interfere no comportamento dos motores elétricos de indução que acionam as máquinas-ferramentas, causando alterações de torque que podem provocar oscilações da velocidade de corte.

Neste trabalho será abordada a influência da qualidade de energia elétrica em processo de torneamento sobre o acabamento superficial (rugosidade " $R_a$ ") da peça.

A rugosidade superficial ( $R_a$ ) é um parâmetro metrológico que expressa à medição de um conjunto de irregularidades que são as pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície, sendo tradicionalmente utilizada para aferir a qualidade proporcionada por um processo de fabricação.

Assim, a exigência do acabamento superficial aumenta à medida que crescem as exigências de qualidade do projeto as quais devem ser adequadas ao tipo de função que o componente produzido irá exercer.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é investigar a influência da qualidade de energia elétrica que alimenta a máquina-ferramenta, em condições de desequilíbrio de tensão, sobre o acabamento superficial da peça em um processo de torneamento com a utilização de redes neurais artificiais visando classificar o acabamento superficial de peças usinadas no processo de torneamento sem a necessidade de realizar medições de rugosidade, apenas com os parâmetros eficazes de correntes adquiridos.

As condições de desequilíbrio de tensão a serem impostas na rede elétrica que alimenta o motor da máquina-ferramenta serão na faixa entre -10% (subtensão *sag*) à + 10% (sobretensão *swel*) e na condição de falta de fase.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) está presente em muitos setores industriais para realizar o acionamento das máquinas-ferramentas. O funcionamento adequado destes motores depende da Qualidade de Energia Elétrica que os alimenta, podendo interferir na qualidade do acabamento superficial de peças produzidas em um processo de manufatura, como, por exemplo, o torneamento.

Tradicionalmente, o controle de qualidade do acabamento superficial das peças produzidas é moroso e caro, pois implica em medir cada peça selecionada do lote produzido separadamente por meio de um rugosímetro.

A utilização de redes neurais artificiais (RNA) no processo de torneamento como preditor de rugosidade, é capaz de reduzir o tempo que seria dispendido na análise da qualidade superficial da peça produzida e, portanto, na redução de custos finais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica relata o que tem sido feito por pesquisadores no contexto de qualidade de energia elétrica para a predição de rugosidade superficial em processo de usinagem por torneamento utilizando redes neurais artificiais.

### 2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Devido à crescente demanda de energia elétrica do setor industrial, as concessionárias de energia elétrica tem se preocupado com a qualidade da energia elétrica fornecida a este setor, responsável por cerca de 40% do consumo total de energia (APEC, 2008).

Deformidades nas formas de onda da tensão e corrente caracterizam a falta de qualidade da energia elétrica que são definidas pelo *International Electrotechnical Commission*, IEC-91 (IEC) como fenômenos eletromagnéticos ou simplesmente distúrbios, entre os quais se destacam os harmônicos, inter-harmônicos, flutuações de tensão, afundamentos, transitórios, entre outros. Ocorreram modificações e complementações na classificação do IEC, pela norma IEEE (IEEE-95), com a inclusão da definição da categoria de distorção da forma de onda da corrente (CA), ruído e elevação de tensão.

Estes distúrbios de tensão na frequência fundamental, distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão, atuam simultaneamente na rede elétrica. Os efeitos destes distúrbios, atuando nas três fases de alimentação no motor de indução, causam perdas adicionais no ferro e no cobre, aumentando assim a temperatura. Ainda, de forma complementar, surge outras consequências, tais como vibrações, oscilações de torque e velocidade, aumento da magnitude da corrente e conseqüentemente, afetando a vida útil destes motores (DUARTE; KAGAN, 2010).

Em Cummings (1985) são propostas as equações (1 e 2) aproximadas que quantificam o aumento de perdas adicionais nos enrolamentos do estator do motor de indução, que são causados por distorções harmônicas de tensão.

$$P_{\text{harmônica}} \approx P_{\text{nominal}} \cdot \Delta W \quad (1)$$

onde:

$P_{\text{harmônica}}$  é a potência harmônica [W];

$P_{\text{nominal}}$  é a potência nominal [W];

$$\Delta W \approx \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[ \frac{V_n}{V_1} \right]^2 \quad (2)$$

onde:

$n$  é a ordem harmônica;

$V_n$  é a tensão harmônica de ordem  $n$ ;

$V_1$  é a tensão fundamental.

O acionamento de um motor trifásico pode produzir grandes depressões simétricas ocasionadas pela alta corrente de partida. Porém, as falhas elétricas de uma linha-terra, fase-fase ou duas fases-terra devido a descargas atmosféricas e outros tipos de acidentes, bem como a energização de grandes transformadores, podem causar quedas assimétricas de tensão.

Devido a crescente utilização de cargas não lineares, tais como retificadores controlados e não controlados (conversão CA-CC), inversores, ciclo conversores, fontes chaveadas, etc., ocorre a degradação da qualidade de energia ao longo do sistema de energia elétrica não só pela geração de reativos, mas principalmente pelas correntes com elevado conteúdo harmônicos. Estes harmônicos de corrente gerados pela conexão de cargas não lineares na rede elétrica, ao interagirem com a impedância da linha, acarretam o aparecimento de harmônicos e quedas de tensão, afetando a qualidade da forma de onda de alimentação a outros usuários conectados ao mesmo ponto de acoplamento comum (PAC) do sistema elétrico. Os efeitos podem ser constatados pelo aquecimento excessivo de transformadores, aumento de ruído na frequência audível e em motores causam vibrações mecânicas.

Portanto, a qualidade de energia não está vinculada apenas com a qualidade da tensão fornecida, mas também com a qualidade da corrente elétrica drenada da rede elétrica pelos diversos tipos de cargas existentes.

A Resolução 0505/2001 (MARAFÃO, 2000) da agência reguladora estabelece limites para variação de tensão de longa duração, divididos em faixas; ou seja, adequada, precária e crítica, tanto para valores inferiores ou superiores com relação à tensão nominal. Os valores eficazes devem ser adequados, sempre que a tensão varia entre -8,5% e -5% da tensão nominal. Os desvios maiores de 5% por longos períodos de tempo são considerados altos e intoleráveis para muitos motores, principalmente se eles geram desequilíbrio de tensão de sequência negativa para fornecimento de carga trifásica única (HYDRO-QUÉBEC, 1996; NEMA, 1993).

O termo qualidade de energia elétrica é aplicado a uma grande variedade de fenômenos eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica e que têm sido interesse de muitos pesquisadores (DUGAN et al., 2002).

Para Bollen et al. (2009) o termo qualidade de energia elétrica (QEE) compreende a qualidade das formas de onda da tensão e da corrente elétrica em um sistema elétrico.

Os sistemas elétricos de Corrente Alternada (CA) são projetados para operarem com tensão senoidal de frequência e amplitudes determinadas. Assim, qualquer desvio significativo na frequência, na amplitude, na forma de onda ou na simetria de fases pode ser encarado como um problema de QEE.

Em um estado regular, a qualidade de energia deve atender requisitos mínimos para garantir o bom funcionamento de equipamentos, onde os conceitos básicos de níveis de compatibilidade são estabelecidos na norma IEC 61000-2-2. 2002. Este conceito é aplicável a todos os tipos de estado estacionário de qualidade de energia, não sendo aplicável a distúrbios tais como afundamentos de tensão (quedas), interrupções e transitórios (IEEE, 2011).

Em termos de confiabilidade, os eventos típicos em qualidade de energia dizem respeito a:

- a) eventos de curta duração, como afundamentos ou sobre tensões que duram poucos ciclos até alguns segundos causados por faltas em alimentadores ou pelo acionamento de grandes cargas;
- b) eventos que durem menos de um ciclo, tais como transientes causados pelo chaveamento de capacitores, descargas elétricas, etc.;
- c) eventos de longa duração como harmônicos e *flickers* (IEEE, 1997).

### 2.1.1 Distúrbios de Qualidade de Energia

Distúrbio de qualidade de energia elétrica é caracterizado por uma anormalidade em um sinal de tensão do sistema de potência. Em um sistema trifásico este distúrbio pode aparecer em qualquer uma das fases do sistema elétrico, sendo mais comum o aparecimento de um distúrbio de desbalanceamento que na subcategoria dos distúrbios o qual trata de afundamento (redução) de tensão (*sag*) (FERREIRA et al., 2008). Os distúrbios de qualidade de energia elétrica que podem ocorrer em sistemas elétricos (tanto em sistemas de transmissão como de distribuição de energia) e apresentam características próprias por isso, podem causar diferentes falhas nos equipamentos ligados à rede elétrica.

Segundo Dugan et al. (2002) estes distúrbios são decorrentes de uma variedade de causas e podem ter diferentes soluções para melhorar a qualidade de energia e desempenho dos equipamentos.

O distúrbio de alta frequência refere-se a tensões que têm componentes de frequência superiores à fundamental de 60 Hz. A frequência efetiva de um evento pode variar na faixa de centenas de Hertz até milhões de Hertz.

As principais características são elencadas a seguir:

- ✓ Picos no nível de tensão;
- ✓ Conteúdo de energia (área compreendida pelo sinal);
- ✓ Razão de mudança da tensão com o tempo:  $dv/dt$ ;
- ✓ Ângulo de fase (local da ocorrência na onda senoidal);
- ✓ Frequência da ocorrência.

### 2.1.2 Transitórios

O termo transitório tem sido muito utilizado na análise da variação de sistema de potência para indicar um evento momentâneo indesejável, ou seja, para caracterizar a ocorrência de um evento de curta duração no sistema elétrico. Tal termo é utilizado também como referência ao tempo em que o sistema necessita

para restaurar seu funcionamento em regime permanente após uma alteração planejada em sua configuração de funcionamento.

Os consumidores finais usam frequentemente a palavra transitória para descrever qualquer anomalia que pode ser observada na rede de alimentação, da subtensão à sobretensão. Há muitas ambiguidades possíveis com a palavra transitórios em QEE e seu uso deve ser evitado a menos que se tenha definido especificamente a que se refere (DUGAN et al., 2002).

Normalmente os fenômenos transitórios de interesse para a qualidade de energia são impulsivos e causados por descargas atmosféricas caracterizadas pelo tempo de subida e de descida do impulso ou oscilatórios com rápida variação nos valores e na polaridade da tensão e corrente.

### 2.1.3 Variações de tensão de curta duração

As variações de tensão de curta duração são caracterizadas pela elevação (*swell*), ou redução (*sag*) da amplitude da tensão no sistema à frequência nominal (60 Hz) da rede elétrica. A redução da amplitude da tensão a valores inferiores a 0,1 pu (por unidade) caracteriza uma interrupção momentânea do sistema. Os limites de tempo de ocorrência e os intervalos de variação da amplitude da tensão para estes eventos são mostrados no Quadro 1.

Categoria	Conteúdo espectral	Duração típica	Amplitude típica
<b>Transitórios</b>			
<b>Transitórios Impulsivos</b>	Tempo de subida entre 5 ns e 0,1 ms	< 1 ms	
<b>Transitórios Oscilatórios</b>	Até 5 MHz	5 $\mu$ s – 50 ms	0 – 8 pu
<b>Variações de curta duração</b>			
<b>Sag (afundamento)</b>		0,5 ciclo – 1 min	0,1 – 0,9 pu
<b>Swell (sobretensão)</b>		0,5 ciclo – 1 min	1,1 – 1,8 pu
<b>Interrupção</b>		< 1 min	< 0,1 pu
<b>Variações de longa duração</b>			
<b>Subtensão</b>		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
<b>Sobretensão</b>		> 1 min	1,1 – 1,2 pu
<b>Interrupção sustentada</b>		> 1 min	0 pu
<b>Distorções da forma de onda</b>			
<b>Dc offset</b>		Regime permanente	0 – 0,1%
<b>Harmônicos</b>	0 – 100% harmônico	Regime permanente	0 – 20%
<b>Inter-harmônicos</b>	0 – 6 kHz	Regime permanente	0 – 2%
<b>Notching</b>		Regime permanente	
<b>Ruído</b>	Toda banda	Regime permanente	0 – 1%
<b>Outros distúrbios</b>			
<b>Desbalanceamento de tensão</b>		Regime permanente	0,5 – 2%
<b>Flutuação de tensão (flicker)</b>	< 25 Hz	Intermitente	0,1 – 7%
<b>Variações na frequência fundamental</b>		< 10 s	

**Quadro 1 - Características de alguns distúrbios de qualidade de energia**

Fonte: Trindade (2005)

Segundo a norma IEEE 1159 - 1995, a qual regulamenta as práticas recomendadas na monitoração da qualidade de energia elétrica, o *sag* é o decréscimo entre 0,1 e 0,9 por unidade da tensão nominal (pu) na tensão ou corrente *rms*, na frequência nominal, com tempo de duração entre 0,5 ciclos à 1 minuto. Ainda, na mesma norma, *swells* é definido como o aumento entre 1,1 pu e 1,8 pu na tensão ou corrente *rms*, em frequência nominal, com tempo de duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto.

O Quadro 2 apresenta a menor amplitude de um *sag* ou o maior valor de um *swell* e é relacionada a uma faixa de tempo em que o equipamento deve operar sem problema.

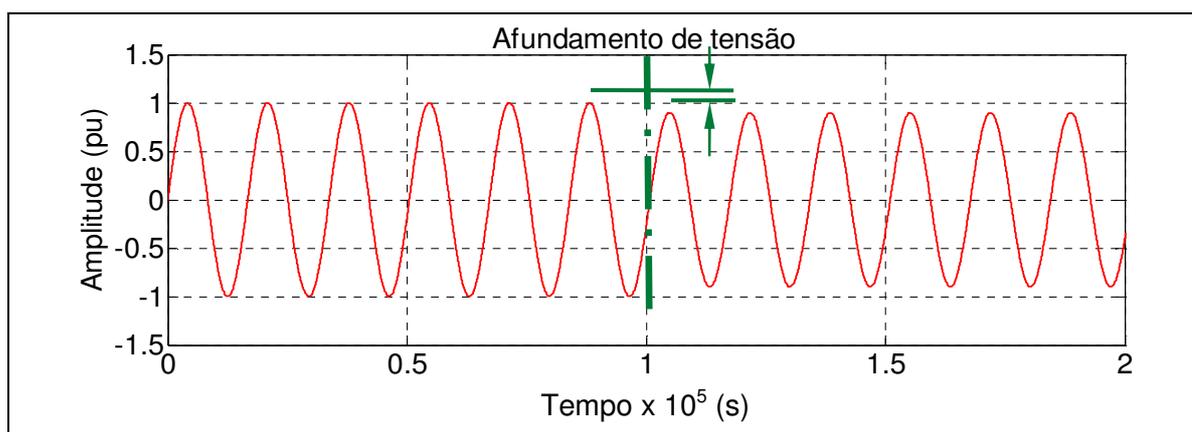
Duração (ms)	Limites de amplitude
8 – 50	- 30%; 20%
50 – 500	- 20%; 15%
> 500	± 5% (residencial); ± 10% (industrial)

**Quadro 2 - Limites de amplitude de *sag* e *swell* com faixa de tempo**

Fonte: Aldabó (2001)

O *sag* é transitório (ocorrência momentânea) e apresenta redução da amplitude da tensão num período curto de tempo, causado pelo acionamento de cargas pesadas tais como motores ligados à rede elétrica ou falha de linha-terra ou fase-terra (KUSKO; THOMPSON, 2007). Se o afundamento em uma das três fases é inferior a 7%, então há situação de curto-circuito que serão valores maiores que 85% nas três fases são devido à energização de transformador ou partida do motor de indução. Contudo, se o afundamento for entre 70% e 85%, o mais provável é a assimetria de curto circuito. Essas cargas drenam correntes de ligação (*inrush*) que afundam o sinal de tensão por curtos períodos. A recuperação do nível de tensão depende do tamanho do motor, do seu momento de inércia e da impedância da rede de alimentação.

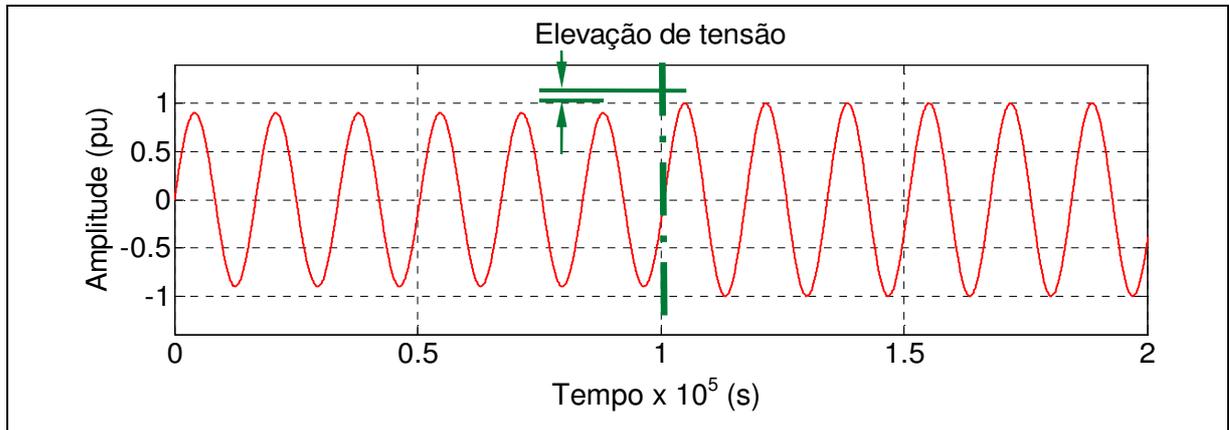
A Figura 1 ilustra o distúrbio de afundamento de tensão (*sag*), cuja duração não ultrapassa 2 (dois) segundos.



**Figura 1 - Exemplo de afundamento de tensão (*sag*)**

Fonte: Autoria própria

O rápido aumento da tensão (*sweI*) é resultado da operação inversa da diminuição de tensão (*sag*), ou seja, o desligamento de cargas pesadas da rede elétrica. Neste caso, o nível de tensão aumenta. A Figura 2 ilustra um exemplo de distúrbio de tensão (*sweI*), cuja duração não ultrapasse 2 (dois) segundos.



**Figura 2 - Exemplo de elevação de tensão (*sweI*)**

**Fonte: Autoria própria**

#### 2.1.4 Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração são caracterizadas pela alteração do valor *rms* da tensão na frequência fundamental do sistema por um período maior que 1 minuto.

Estas variações podem ser positivas, caracterizando a sobretensão, ou negativas, caracterizando a subtensão. Sobretensão é o aumento na tensão CA *rms* superior a 110% do valor nominal, com duração superior a 1 minuto. Tal efeito pode ser resultado da baixa regulação no sistema elétrico, regulador desajustado ou por flutuação nas cargas demandadas. A sobretensão pode causar falha em equipamentos eletrônicos.

Este fenômeno pode ser causado por instalação mal dimensionada, *taps* incorretos de transformadores, reguladores de tensão desajustados ou sobrecarga não intencional na rede elétrica. A subtensão pode resultar em operação errática ou baixo desempenho dos equipamentos. Motores drenam mais correntes, operam com aquecimento excessivo e com menos eficiência sob condição de subtensão.

As flutuações de tensão CA em intervalos significativos são conhecidas como subtensões e sobre tensões. Variações de curta duração são chamadas de *sags* e *surges* (ALDABÓ, 2001).

#### 2.1.5 Desequilíbrios de tensão

O desequilíbrio, ou o desbalanceamento de tensão, pode ser definido utilizando-se componentes simétricas; ou seja, a relação entre a componente de tensão de sequência negativa ou a componente de sequência zero pela componente de sequência positiva que pode ser utilizada para especificar o nível do desequilíbrio do sistema.

O distúrbio na tensão provoca aumento de temperatura do motor e, em motores de alta eficiência podem ser mais sensíveis a problemas com tensões desequilibradas devido a menores valores de reatância de sequência negativa (IEEE, 2011).

#### 2.1.6 Deformações da forma de onda de tensão

As distorções das formas de onda de tensão são definidas como os desvios da forma senoidal na frequência fundamental do sistema. Estas distorções se apresentam em regime permanente no sistema e são causadas, em sua maioria, pela presença de tensão de *offset*, harmônicos, inter-harmônicos (harmônicos não múltiplos de 60 Hz), *notches* (afundamento abrupto da tensão causado por curtos circuitos momentâneos que ocorrem durante intervalos de comutação de semicondutores de potência de circuitos retificadores) e ruídos no sistema elétrico.

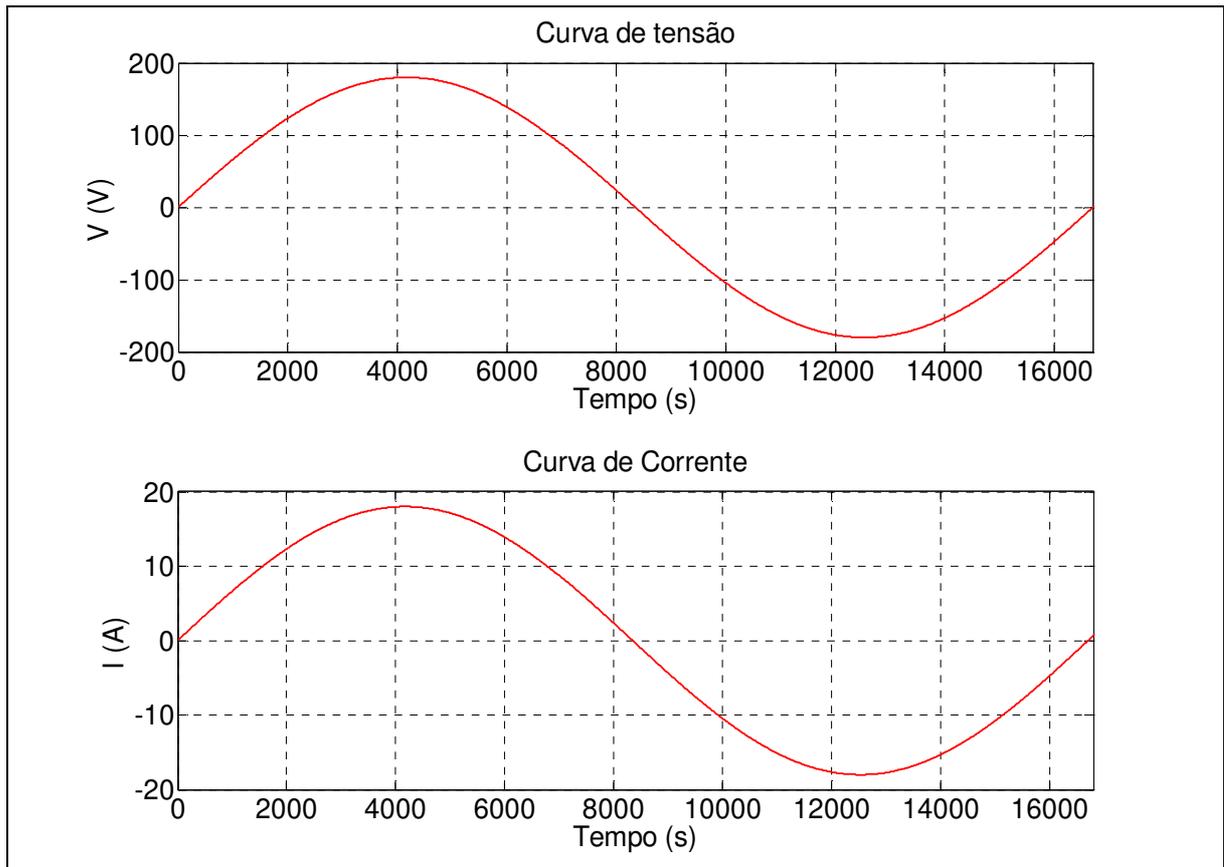
### 2.1.7 Flutuações de tensão

A flutuação de tensão caracteriza-se por variações contínuas ou aleatórias na amplitude da alimentação que se situa entre 0,9 e 1,1 pu. Um exemplo de flutuação de tensão é referido como *flicker* que é causado principalmente pela operação de fornos a arco.

### 2.1.8 Harmônicos

Harmônicos podem ser definidos como o conteúdo de um sinal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema.

A energia elétrica gerada no subsistema de geração possui a forma de onda senoidal. Cargas resistivas conectadas a uma fonte de tensão drenam correntes também na forma senoidal. Na Figura 3 é mostrado que quando a forma de onda da corrente espelha a forma da tensão aplicada (ambas senoidais), não há presença de harmônicos (EUVEO, 2003).

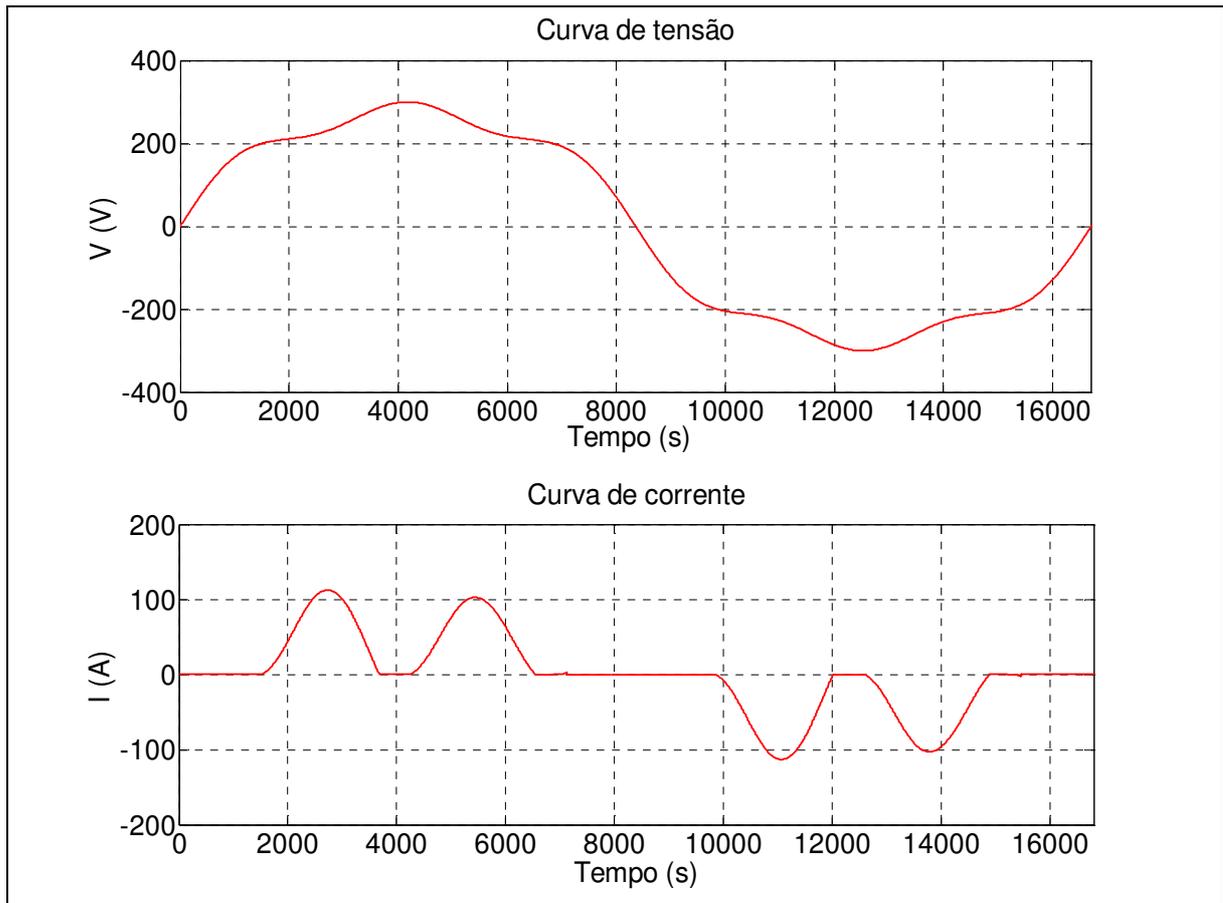


**Figura 3 - Curvas de tensão e corrente para um sistema elétrico com cargas lineares**

**Fonte: Autoria própria**

Harmônicos são integrais múltiplas da frequência de origem e formas de onda não lineares são constituídas de componentes de alta frequência. Para a onda senoidal de 60 Hz, os harmônicos de ordem ímpar são a terceira (180 Hz), a quinta (300 Hz), a sétima (420 Hz) e assim por diante.

Quase todos os equipamentos eletrônicos são fontes de corrente harmônica (Figura 4) onde a curva de corrente não é senoidal e como consequência, a curva de tensão de alimentação fica distorcida, tornando-se achatada na região próxima ao seu valor máximo (EUVEO, 2003).



**Figura 4 - Curvas de tensão e corrente para o caso de carga não linear**

**Fonte: Autoria própria**

A simples presença de harmônicos numa instalação não representa um problema. Entretanto, a sua interação com o sistema de distribuição causa distorções e perdas.

Quando a distorção de tensão alcança nível elevado, podem ocorrer diferentes tipos de problemas nos equipamentos eletrônicos. Se os picos de tensão são suprimidos, as fontes de tensão podem não acumular a energia suficiente para suprir *sags* momentâneos. Se os picos de tensão são amplificados, detectores de sobretensão podem atuar desligando a carga. Há ainda outros tipos de problemas, tais como aquecimento e vibração excessiva em motores, aquecimento e ruídos excessivos em transformadores, erros de frequência, nível de tensão elevado entre neutro e terra e campos magnéticos significativos na vizinhança de transformadores e disjuntores.

### 2.1.8.1 Distorção harmônica total (DHT)

É a porcentagem (%) que a onda pode se afastar em relação àquela puramente senoidal. Quando a distorção de tensão aumenta, a DHT para a forma de onda da corrente decresce. Isto ocorre porque a distorção de tensão força o aumento no tempo do fluxo de corrente. Tal relação é expressa na equação (3).

$$DHT = \sqrt{\frac{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}{V_{1,rms}^2}} \quad (3)$$

onde:

DHT é a taxa de distorção harmônica;

$V_{rms}$  é o valor *rms* da forma de onda total;

$V_{1,rms}$  é o valor *rms* da forma de onda do primeiro harmônico.

Na ocorrência de harmônicos, normalmente as de ordem ímpar prevalecem sobre as de ordem par. Contudo, o harmônico de ordem par tem um grande impacto em instalações elétricas porque criam resquícios de tensão CC em dispositivos tais como motores e transformadores (ALDABÓ, 2001).

A norma IEEE 519 a qual regulamenta o controle de harmônicos em sistemas elétricos especifica o limite de 25% para harmônicos de ordem par e proíbe o uso de conversores meia onda para evitar condições de aparecimento de tensão CC no barramento.

Nas cargas conectadas em estrela, um tipo particular de harmônicos de terceira ordem é aditivo e retornam em grande quantidade pelo retorno. A corrente de neutro também interage com a impedância da fiação causando tensões elevadas entre neutro e terra.

### 2.1.8.2 Consequências da presença de harmônicos

Os harmônicos no sistema elétrico causam vários problemas os quais são citados a seguir:

- ✓ Condutores de neutro sobreaquecidos e com corrente elevada;
- ✓ Incompatibilidade dos projetos de equipamentos sensíveis em uso com a operação em sistemas elétricos distorcidos;
- ✓ Interferência em sistemas de telecomunicações, devido ao acoplamento mútuo entre o sistema elétrico e o sistema de comunicações nas frequências harmônicas;
- ✓ Mal funcionamento de equipamentos de controle e proteção;
- ✓ Motores e transformadores com falhas frequentes e trabalhando com temperatura elevada;
- ✓ Sobreaquecimento ou falhas de bancos de capacitores;
- ✓ Comprometimento da precisão em equipamentos de medição de energia;
- ✓ Mal funcionamento de relés microprocessados e de relés que dependem de valores de pico ou de passagem por zero das ondas de corrente ou tensão para a sua operação;
- ✓ Baixo fator de potência na instalação.

### 2.1.8.3 Efeito dos harmônicos em motores elétricos

Nos motores elétricos devido a presença de harmônicos na rede elétrica, afetam a eficiência da máquina e o torque são afetados, bem como o aumento do ruído audível comparado com a alimentação senoidal.

A Norma IEC 61000-3-2 (edição 3.0 de 2005) estabelece os valores limites dos harmônicos de corrente para equipamentos que consomem  $\leq 16$  A de corrente por fase, conforme a Quadro 3.

Ordem dos Harmônicos (n)	Classe A (A)	Classe B (A)	Classe C (% da corrente de entrada fundamental)	Classe D (mA/W)
<b>Harmônicos ímpares</b>				
3	2,3	3,45	30 x Fator de Potência	
5	1,14	1,71	10	3,4
7	0,77	1,155	7	1,9
9	0,40	0,60	5	1,0
11	0,33	0,495	3	0,5
13	0,21	0,315	3	0,35
15 ≤ n ≤ 39	0,15 x 15/n	0,225 x 15/n	3	3,85/13
<b>Harmônicos pares</b>				
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,645	-	-
6	0,30	0,45	-	-
8 ≤ n ≤ 40	0,23 x 8/n	0,345 x 8/n	-	-

**Quadro 3 - Limite de harmônicos de corrente**

Fonte: Norma IEC 61000-3-2

O Quadro 3 é dividida em 4 classes de dispositivos eletroeletrônicos os quais são explicitados como segue:

**Classe A**

- ✓ Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada;
- ✓ Aparelhos de uso doméstico, excluindo os da classe D;
- ✓ Ferramentas, exceto as portáteis;
- ✓ *Dimmers* para lâmpadas incandescentes;
- ✓ Equipamentos de áudio;
- ✓ Demais não inclusos nas outras classes.

**Classe B**

- ✓ Ferramentas portáteis;
- ✓ Equipamento de solda não profissional.

**Classe C**

- ✓ Dispositivos de iluminação.

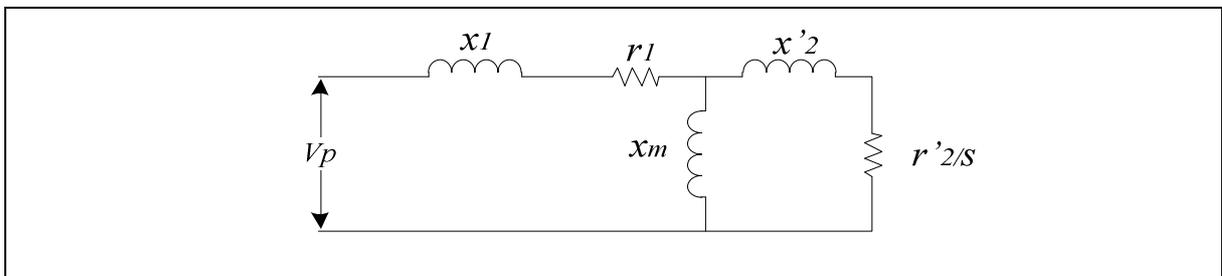
**Classe D**

- ✓ Computadores pessoais;
- ✓ Obs.: 75 W < potência < 600 W.

### 2.1.9 Circuito equivalente de uma máquina em condições de desequilíbrio

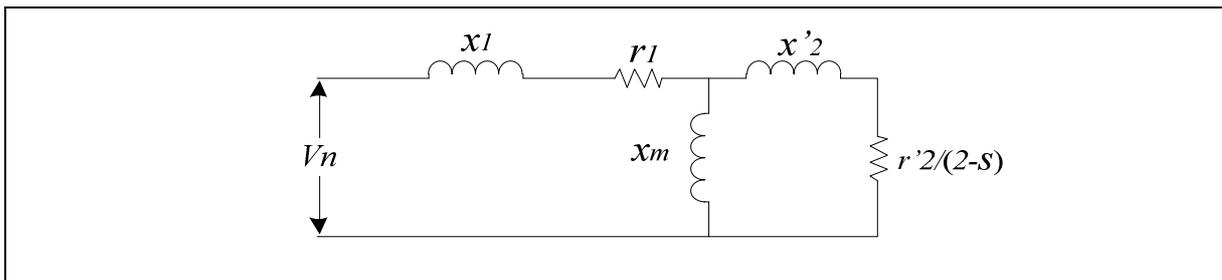
O circuito equivalente de uma máquina em condições de desequilíbrio em regime permanente é constituído por dois circuitos de sequência ligados em paralelo. O comportamento do circuito de sequência positiva é o mesmo que a operação em tensão equilibrada. Já a corrente de sequência negativa gera um campo eletromagnético inverso. Se o escorregamento do rotor na sequência positiva é representado por  $s$ , na sequência negativa será  $2s$ . Os circuitos de sequência positiva e negativa equivalente ao motor de indução são ilustrados nas Figuras 5 e 6.

O comportamento do motor é determinado pela composição dos dois circuitos equivalentes, uma com a rotação do campo eletromagnético com escorregamento  $s$  e tensão nos terminais  $V_p$  e outro com a rotação do campo eletromagnético com escorregamento  $(2-s)$  e tensão nos terminais  $V_n$  (KIANINEZHAD et al., 2009). Nas Figuras 5 e 6 representam os circuitos equivalentes de sequência positiva e sequência negativa.



**Figura 5 - Circuito equivalente de sequência positiva**

Fonte: Kianinezhad et al. (2009)



**Figura 6 - Circuito equivalente de sequência negativa**

Fonte: Kianinezhad et al. (2009)

A potência de saída do motor quando da tensão de alimentação de sequência positiva é similar à operação com tensão equilibrada (KIANINEZHAD, 2009).

$$PM = I_p^2 r_2 \frac{(1-s)}{s} - I_n^2 r_2 \frac{(1-s)}{(2-s)} \quad (4)$$

onde:

$PM$  é a potência do motor [W];

$I_p$  é a corrente de sequência positiva [A];

$I_n$  é a corrente de sequência negativa [A];

$r_2$  é a resistência do rotor [ $\Omega$ ];

$s$  é o escorregamento.

A redução de potência de saída devido a corrente de sequência negativa pode ser obtida através da equação abaixo (KIANINEZHAD, 2009).

$$T = r_2 \frac{\left[ \frac{I_p^2}{s} - \frac{I_n^2}{(2-s)} \right]}{\omega_{syn}} \quad (5)$$

onde:

$T$  é o torque eletromagnético [Nm];

$\omega_{syn}$  é a velocidade síncrona [rad/s].

As correntes de sequência negativa e positiva estão relacionadas às tensões sucessivas dos parâmetros do motor e o escorregamento. As variáveis  $I_p$  e  $I_n$  são obtidas pelas equações (6) e (7):

$$I_p = \frac{V_p}{\sqrt{\left\{ \left[ r_1 + \left( \frac{r_2'}{s} \right) \right]^2 + (x_1 + x_2')^2 \right\}}} \quad (6)$$

$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{\left\{ \left[ r_1 + \left( \frac{r_2'}{2-s} \right) \right]^2 + (x_1 + x_2')^2 \right\}}} \quad (7)$$

onde:

$I_p$  é a corrente de sequência positiva [A];

$I_n$  é a corrente de sequência negativa [A];

$V_p$  é a tensão de sequência positiva [V];

$V_n$  é a tensão de sequência negativa [V];

$r_1$  é a resistência do estator [ $\Omega$ ];

$r_2'$  é a resistência do rotor [ $\Omega$ ];

$x_1$  é a reatância de dispersão do estator [H];

$x_2'$  é a reatância de dispersão do rotor [H];

$s$  é o escorregamento.

#### 2.1.10 Efeitos de afundamento de tensão simétrica em motores de indução gaiola de esquilo e rotor bobinado

No funcionamento normal do motor de indução, há rotação do campo magnético no entreferro proporcionado pelos enrolamentos do estator e rotor gaiola de esquilo.

Quando dos afundamentos de tensão (*sag*) ou interrupção de energia elétrica, dois fenômenos ocorrem: o rotor desacelera (dependendo da inércia da carga) e a amplitude do campo magnético diminui.

Quando a tensão no estator é restaurada, dependendo do tempo de interrupção, o campo magnético produzido pelo estator causa declínio do campo no entreferro e o rotor pode ficar defasado devido ao enfraquecimento do campo.

### 2.1.11 Equações matemáticas de uma forma de onda

A equação (8) mostra a representação matemática de uma forma de onda qualquer através da Série de Fourier. Tal sinal é decomposto pela somatória de uma componente CC e uma sequência infinita de sinais CA senoidais formados pela frequência fundamental e seus múltiplos (SILVA, 1989).

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos \omega t + \dots + b_1 \text{sen} \omega t + b_2 \text{sen} \omega t + \dots$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \text{sen} n\omega t)$$
(8)

onde:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) d\omega t$$
(9)

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t$$
(10)

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \text{sen}(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) \text{sen}(n\omega t) d\omega t$$
(11)

A análise pode ser simplificada considerando a simetria das formas de onda, ou seja, as equações (8) e (9) podem ser reescritas pelas equações (12) e (13), respectivamente (SILVA, 1989):

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (f(t) + f(-t)) \cos(n\omega t) dt$$
(12)

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (f(t) - f(-t)) \text{sen}(n\omega t) dt$$
(13)

Assim sendo, a análise pode ser simplificada se forem consideradas as características das ondas simétricas (SILVA, 1989), ou seja:

- ✓ Simetria ímpar:  $f(t) = -f(-t)$ , sendo assim, na equação (11)  $a_n = 0$ ;
- ✓ Simetria par:  $f(t) = f(-t)$ , sendo assim, na equação (12)  $b_n = 0$ ;
- ✓ Simetria de meia onda: Não existem harmônicas de ordem par.

#### 2.1.12 Possíveis causas de alguns eventos de qualidade de energia.

Todo evento de qualidade de energia se relaciona com a operação do sistema elétrico, bem como com condições adversas como é o caso das descargas atmosféricas.

As características de algumas cargas conectadas ao sistema de potência podem causar distúrbios elétricos que comprometem a qualidade da energia mesmo durante a operação normal da carga, como nos casos onde há a presença de *notches*. Este fenômeno se caracteriza pelo afundamento abrupto da tensão causado por curtos circuitos momentâneos que ocorrem durante intervalos de comutação de semicondutores de potência dos retificadores e está relacionado com o acionamento de cargas através de dispositivos chaveados conectados ao sistema.

Este tipo de distúrbio é uma característica intrínseca dos sistemas de acionamento, que ao resolverem um problema, como o controle de velocidade de motores, causa “distorção” na rede elétrica. O funcionamento de dispositivos sensíveis à presença de *notches* como equipamentos microprocessados pode ser afetado.

Outro problema de qualidade de energia é a influência da seção transversal do condutor da rede de alimentação e que algumas vezes não é feito o dimensionamento de forma adequado (SINGH; TRIPATHI, 2010).

Considerando a situação apresentada acima, muitas vezes uma falha de operação pode ser associada a determinado equipamento cuja causa se encontra na operação normal de outro equipamento. O Quadro 1 apresenta um resumo dos eventos mais comuns de qualidade de energia apontados (TRINDADE, 2005) e suas prováveis causas, o conhecimento do tipo de evento causado por determinado tipo

de carga é de extrema importância para a análise de problemas de qualidade de energia.

A partir das informações contidas nos Quadros 1 e 2, é possível observar a grande quantidade de eventos de qualidade de energia que podem ocorrer em um sistema elétrico.

## 2.2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os motores elétricos são os principais elementos de conversão de energia elétrica em mecânica motriz. A máquina, objeto de estudo desta seção é o de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo bastante comum em aplicações industriais.

O motor de indução é, sem dúvida, o mais utilizado na indústria para as mais variadas aplicações devido as suas características como robustez, baixo custo, baixo relação peso-potência e pouca necessidade de manutenção. Estes aspectos o tornam mais atrativo para diversos setores da economia.

A máquina assíncrona apresenta as seguintes características importantes:

- Utilização generalizada como motor, embora possa funcionar como gerador;
- As tensões no seu rotor são do tipo induzidas, isto é, são impressas no rotor por meio de acoplamento magnético com o estator e não possui contato físico (sistema escova/comutador ou escova/anéis);
- Gera conjugado não nulo para qualquer rotação diferente da síncrona.

Assim, faz-se necessária a modelagem matemática do MIT e sua implementação em ambiente computacional para a simulação do comportamento da máquina frente a distúrbios causados por problemas de qualidade de energia elétrica.

## 2.3 ASPECTOS DO PROCESSO DE USINAGEM

Usinagem é a denominação genérica dos processos industriais que, pela ação de corte exercida por uma ferramenta, conferem à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzindo cavaco (FERRARESI, 1977).

Segundo Ezugwu et al. (2009) as peças são tipicamente moldadas pela remoção de materiais indesejados. Estes processos produzem falhas de superfície, ondulação e rugosidade que podem influenciar o desempenho do componente.

No cenário houve uma evolução significativa das indústrias em termos de processos de usinagem, com o desenvolvimento de novos materiais e geometrias para ferramentas de corte, além de máquinas mais precisas e eficientes. Estas novas tecnologias estão sendo empregadas nos processos industriais (materiais de dureza maior) para atender à crescente demanda do mercado e exigência cada vez maior quanto à qualidade do produto e redução de custos de fabricação.

A tendência atual é a usinagem com máquinas de altas velocidades (*High Velocity Machining* – HVM), na menor faixa o HSC (*High Speed Cutting*) no qual a alta capacidade de remoção de metal é o mais importante, usados para operações de desbaste e acabamento em metais leves tais como o cobre, grafite e plásticos. Entretanto, na usinagem de aços e ferros fundidos só podem ser utilizadas nas operações de acabamento e pré-acabamento. A usinagem com altíssimas velocidades (*High Speed Machining* – HSM) é utilizada para capacidade moderada de remoção de metal, porém com velocidades de corte muito elevadas (SHUTZER; SHULZ, 2003).

Os novos materiais para ferramentas de elevada dureza apresentam maior resistência ao desgaste em altas temperaturas e rotações que garantem maior regularidade do acabamento superficial.

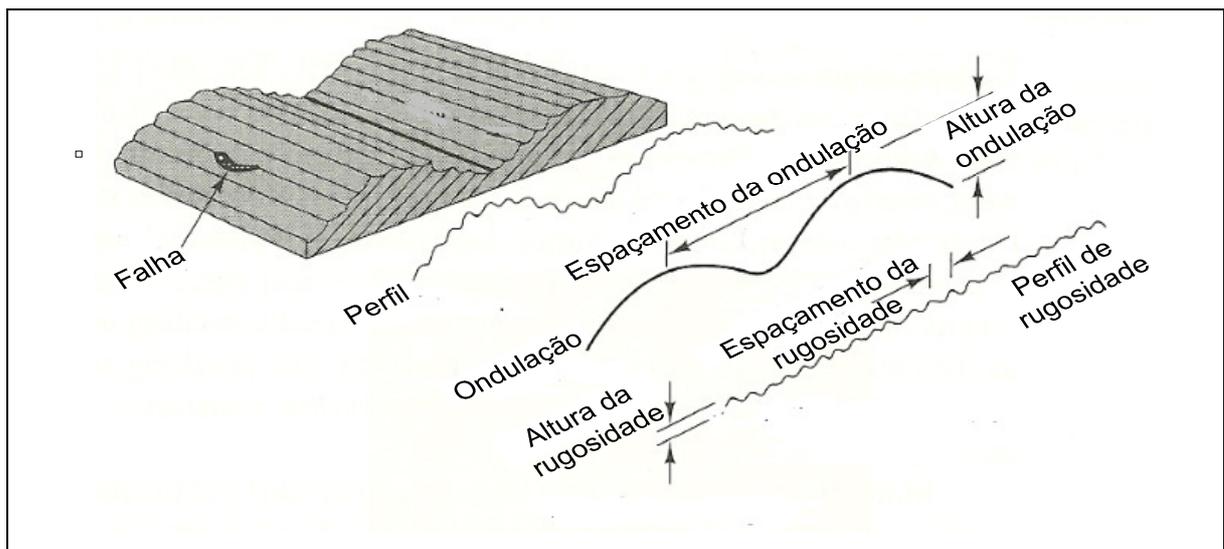
## 2.4 ASPECTOS DO ACABAMENTO SUPERFICIAL

A usinagem para obtenção de uma peça com geometria específica pode produzir alterações da superfície do material, as quais por sua vez, produzem alterações no desempenho (DeGARMO et al., 2008).

A rugosidade superficial contém componentes periódicos e o perfil gerado depende da geometria da ação do corte, ou seja, resulta da ação simultânea da geometria da ferramenta em conjunto com os parâmetros de corte (ZHANG; KAPOOR, 1999).

O termo integridade superficial foi criado por Field e Kahles em 1964, o qual está relacionado à natureza da condição da superfície no processo de fabricação, considerando os cinco componentes do processo que podem alterar as propriedades da superfície. São eles: peça, ferramenta, máquina-ferramenta, variáveis de processo e meio ambiente. A integridade da superfície tem dois aspectos: topografia e características da camada superficial.

A topografia é composta de rugosidade da superfície e a ondulação representa os erros de formas e falhas (DeGARMO et al., 2008). Tais aspectos da superfície são apresentados na Figura (7).

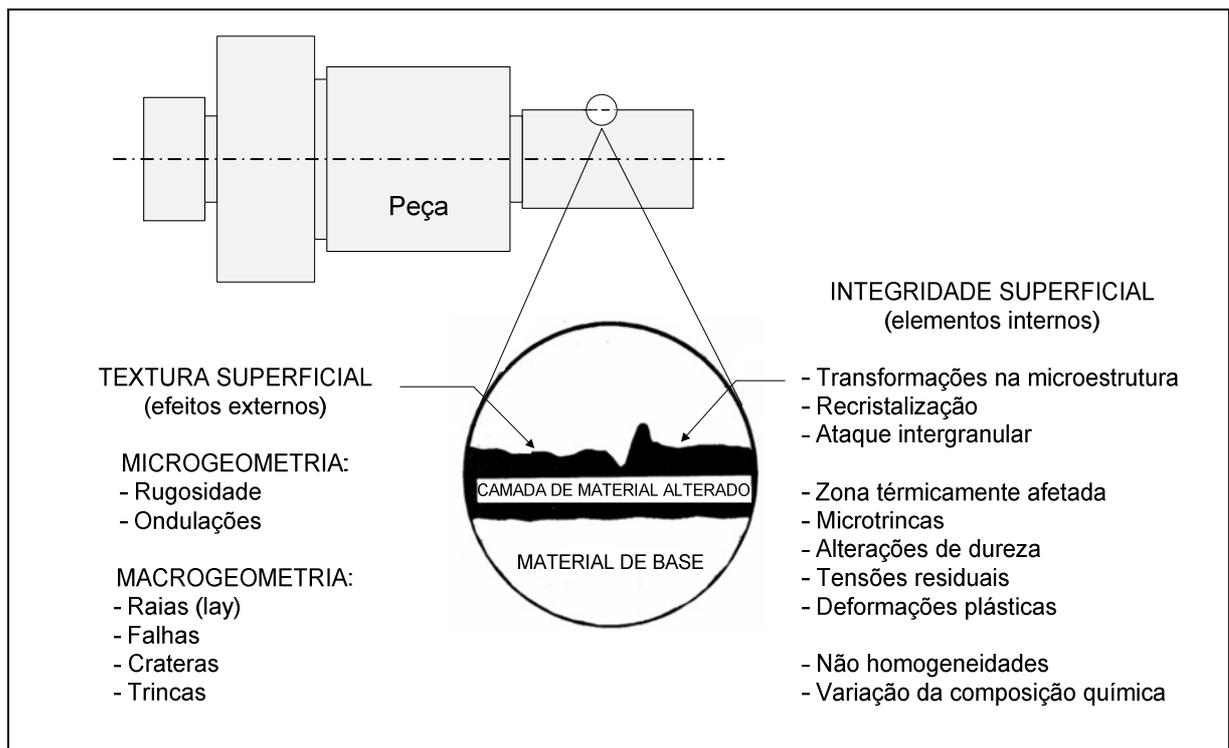


**Figura 7 – Topografia da superfície composta de rugosidade, ondulação, os erros de forma e falhas.**

**Fonte: DeGarmo et al. (2008)**

A qualidade e a integridade da superfície no torneamento são preocupações frequentes devido ao seu impacto na apresentação do produto, em termos de comportamento funcional e qualidade dimensional (POULACHON et al., 2005).

A Figura 8 ilustra as alterações possíveis devido ao processo de usinagem por torneamento.



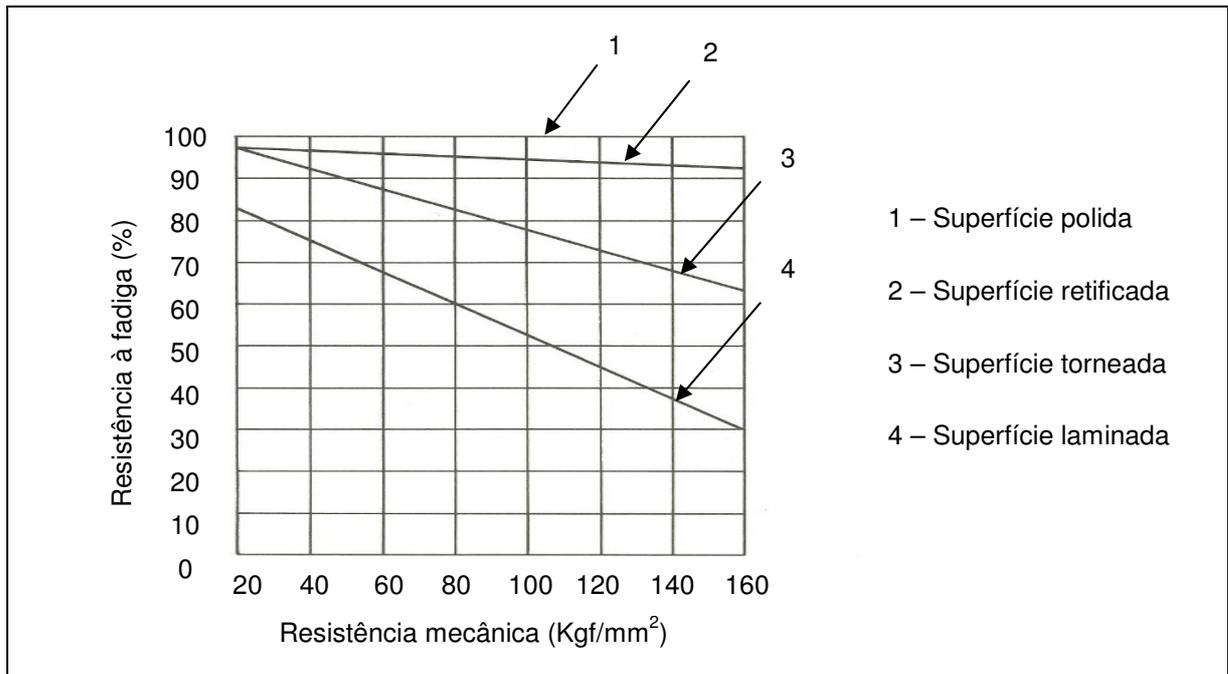
**Figura 8 - Seção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores**

Fonte: SME (1987)

A integridade superficial gerada por um processo de usinagem, além da rugosidade superficial e sua forma geométrica, envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas (MACHADO; SILVA, 2004).

Os parâmetros de entrada mais importantes que afetam a vibração do sistema de usinagem, podendo prejudicar o acabamento superficial da peça usinada são: material de trabalho e a sua geometria, material da ferramenta e sua geometria, rigidez da máquina ferramenta, condições de usinagem (velocidade de corte –  $V_c$ , avanço –  $f$  e profundidade de usinagem  $a_p$ ) e desgaste da ferramenta (EZUGWU et al., 2009). Segundo Capello (2005), a velocidade de avanço e o raio de ponta da ferramenta exercem influência sobre as tensões residuais na superfície da peça.

A qualidade da superfície desempenha um papel muito importante no desempenho do torneamento. Uma boa qualidade de superfície melhora significativamente a resistência à fadiga, à corrosão e a vida útil quanto a deformação (NATARAJAN et al., 2011). A Figura 9 mostra que a resistência à fadiga de aços será maior quanto melhor for o acabamento superficial.



**Figura 9 - Influência da rugosidade superficial sobre a resistência à fadiga de aços**

Fonte: Agostinho et al. (1977)

Durante o processo de usinagem as propriedades físicas e mecânicas do metal na sua camada superficial são modificadas, devido aos seguintes fatores:

- ✓ Pressão da ferramenta contra a peça;
- ✓ Atrito da superfície de folga da ferramenta com a peça;
- ✓ Atrito interno do metal na região de deformação plástica;
- ✓ Calor gerado no processo de corte;
- ✓ Fenômenos específicos do processo de formação do cavaco;
- ✓ Vibração da ferramenta e da máquina.

A peça usinada, além de apresentar irregularidades geométricas, sofre modificações na estrutura cristalográfica da sua camada superficial e decarbonetação (tipo de tratamento térmico). Quanto mais dúctil for o material,

maior será a modificação das propriedades da camada superficial da peça (FERRARESI, 1977).

Quanto maior a exigência de ajuste entre as peças a serem acopladas, maior o aumento da precisão requerida para o acabamento superficial.

O que determina a qualidade da superfície usinada é o movimento de corte relativo entre a ponta da ferramenta e a peça. Na prática, o trajeto da ferramenta desvia da trajetória ideal devido a fatores cinemáticos ou dinâmicos de corte, erros de movimento da ferramenta e vibrações (ZHOU; CHENG, 2008).

As superfícies, por mais perfeitas que sejam, apresentam irregularidades denominadas de rugosidade ou também denominado erro micrométrico. Estas se caracterizam por pequenas saliências e reentrâncias na superfície as quais podem ser avaliadas com o emprego de um aparelho eletrônico conhecido por rugosímetro (Figura 46). Segundo Agostinho et al. (1977) a rugosidade superficial é definida como a soma das diferenças de forma que resultam da ação inerente ao processo de usinagem.

A rugosidade da superfície é um parâmetro amplamente utilizado para classificar a qualidade da peça e na maioria dos casos, uma exigência técnica para os produtos mecânicos. Obter uma superfície desejada é importante para o comportamento funcional de uma peça (BERNARDOS; VOSNIAKOS, 2003).

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, uma vez que exerce influência na (SOUZA, 2011):

- ✓ Qualidade de deslizamento;
- ✓ Resistência ao desgaste;
- ✓ Transferência de calor;
- ✓ Qualidade de superfícies ópticas;
- ✓ Possibilidade de ajuste forçado do acoplamento;
- ✓ Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- ✓ Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- ✓ Resistência à corrosão e à fadiga;
- ✓ Vedação;
- ✓ Aparência.

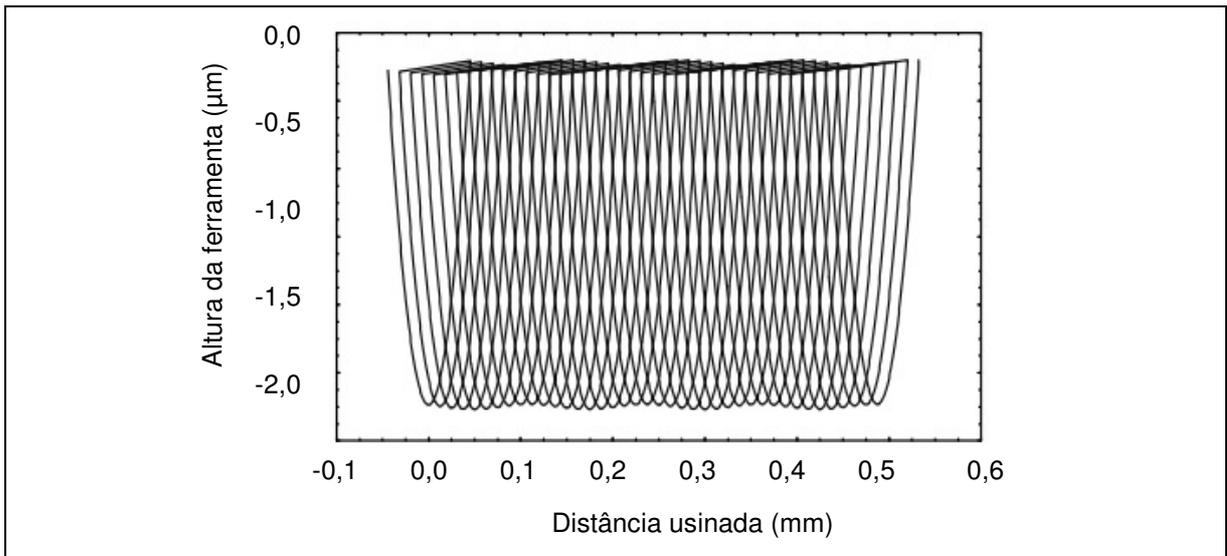
#### 2.4.1 Processo de determinação da rugosidade

Esse processo consiste basicamente em percorrer um trecho da superfície usinada do material com um apalpador de formato normalizado, acompanhado do patim em relação ao qual ele se move verticalmente. Enquanto o apalpador acompanha a rugosidade, o patim acompanha as ondulações da superfície. O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e registrado no mostrador e no gráfico.

#### 2.4.2 Composição da superfície

O perfil de rugosidade da superfície é formado por movimentos sucessivos dos perfis da ferramenta em intervalos de avanço da ferramenta o material de corte ao longo do lugar geométrico da peça. A rugosidade da superfície depende da localização das arestas de corte sucessivas que se iniciam a partir remoção do cavaco do perfil da superfície formado pelas arestas de corte anteriores.

Uma vez que o perfil de aresta de corte mínima abaixo dos pontos de intersecção de cada perfil da ferramenta constitui a rugosidade da superfície, um perfil de rugosidade da superfície podem ser construídos por corte das linhas acima dos pontos de intersecção. A Figura 10 ilustra o movimento da ponta da ferramenta em cada posição de avanço da ferramenta através da peça de trabalho. Tal movimento pode ser visualizada como movimentos sucessivos de perfis da ferramenta sobre a peça (CHENG, 2009).



**Figura 10 - Órbita da ferramenta simulada**

**Fonte: Cheng (2009)**

Descrição de cada elemento do perfil que compõem a textura superficial da peça usinada:

- A) Rugosidade ou textura primária: conjunto de irregularidades (erros micro métricos) causadas pelo processo de produção, cujas impressões são produzidas pela ferramenta (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.);
- B) Ondulação ou textura secundária: conjunto de irregularidades (erros geométricos) causadas por vibrações e deflexões da ferramenta e/ou da peça devido a forças de corte, temperatura de corte ou erros de fixação da peça ou da ferramenta;
- C) Erro de forma: corresponde à direção geral dos componentes da textura, os quais são classificados da seguinte maneira:
  - ✓ Orientação ou perfil periódico: quando o sulco tem direções definidas;
  - ✓ Orientação ou perfil aperiódico: quando o sulco não tem direções definidas.

Na operação de torneamento, a máxima rugosidade é encontrada geralmente na direção de avanço, isto é, a rugosidade transversal é a que a caracteriza:

- D) Passo das irregularidades (designado pela frequência de irregularidades): é a média das distâncias entre as saliências.

D1- Passo das irregularidades da textura primária;

D2- Passo das irregularidades da textura secundária.

E) Altura das irregularidades ou amplitude das irregularidades.

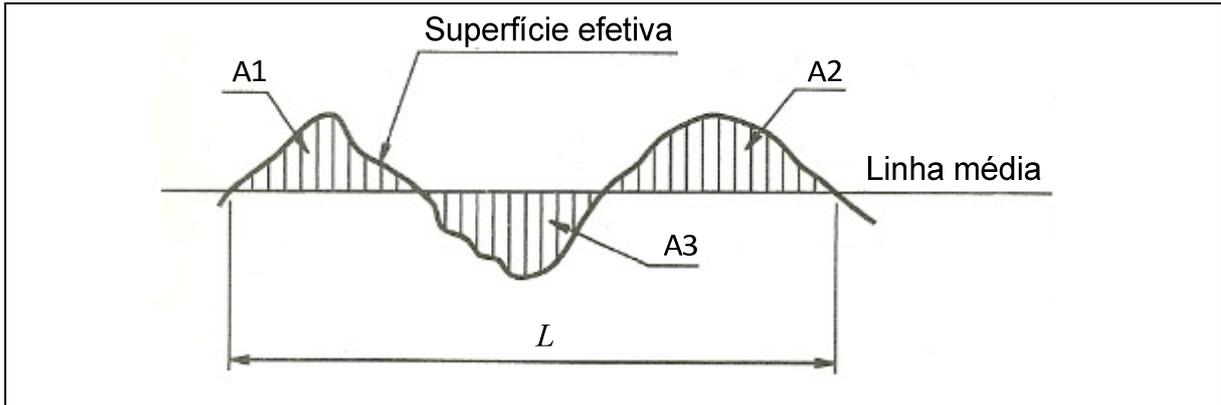
Há também falhas, que são as interrupções na topografia típicas da superfície de uma peça, causadas por defeitos inerentes ao processo de produção do material, tais como: inclusões, trincas e bolhas as quais podem surgir também durante o processo de corte. Estas interrupções devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros de fabricação.

#### 2.4.3 Medição da rugosidade (Sistema baseado na profundidade da rugosidade)

Normalmente uma superfície usinada é examinada apenas em termos de dimensões e rugosidade superficial. A peça é examinada depois da operação de usinagem ou mesmo durante a operação, de acordo com as tolerâncias dimensionais e rugosidade especificada do projeto. O sistema de medição da rugosidade baseado na textura da linha média, tem os seguintes parâmetros: i) Desvio médio aritmético ( $R_a$ ), ii) Desvio médio quadrático ( $R_q$ ), iii) Altura das irregularidades dos 10 pontos ( $R_z$ ), iv) Altura máxima das irregularidades ( $R_{máx}$ ), v) Profundidade média ( $R_p$ ) e vi) Comprimento de amostragem (*Cut-off*).

No Brasil é adotado o sistema M pelas normas ABNT NBR 6405/1988 e NBR 8404/1984 (Figura 11).

Linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem ( $L$ ).



**Figura 11 - Sistema de linha média**

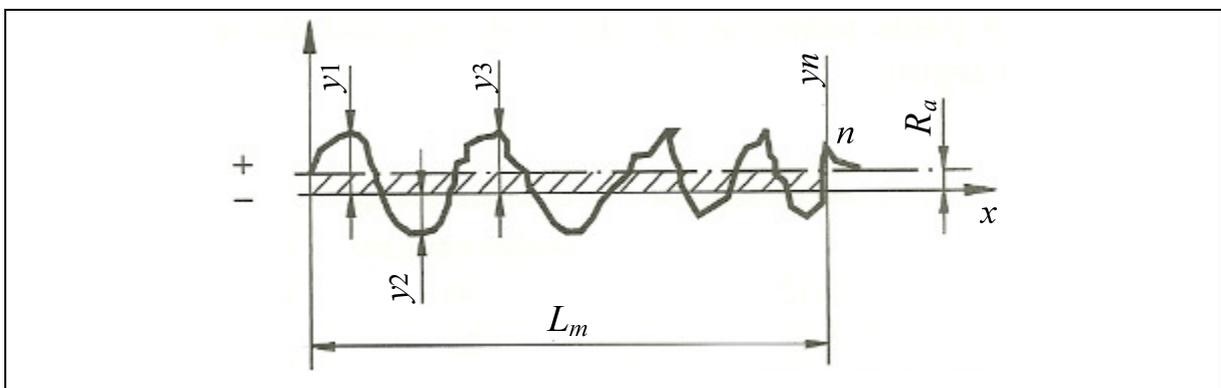
Fonte: Rosa (2007)

Neste sistema considera-se  $A1$  e  $A2$  as áreas acima da linha média e  $A3$  àquela que se encontra abaixo da linha média. Desta forma a soma de  $A1$  e  $A2$  é igual a  $A3$  ( $A1 + A2 = A3$ ).

Os sistemas de medição da rugosidade baseados na textura da linha média, são:

✓ Desvio médio aritmético –  $R_a$  (*Roughness average*)

Corresponde à média aritmética dos valores absolutos de afastamentos  $y_n$ , ou seja, os  $n$  pontos do perfil  $y$  de rugosidade em relação à linha média, num comprimento de medição  $L_m$  que é a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação (Figura 12).



**Figura 12 - Rugosidade média ( $R_a$ )**

Fonte: Espanhol (2008)

A expressão matemática do desvio aritmético, definido em Agostinho et al. (1977) é a seguinte:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (14)$$

onde:

$L$  é o comprimento de amostragem;

$n$  é o número de ordenadas consideradas;

$y$  é a amplitude da ordenada.

O parâmetro  $R_a$  é usado na maioria dos processos de fabricação para controle contínuo de rugosidade nas linhas de produção onde as superfícies de acabamento apresentam sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresamento, etc.). Entretanto, o valor de  $R_a$  não define a forma das irregularidades do perfil. Assim, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando esse defeito.

A avaliação de rugosidade adotada pela norma brasileira é feita usando-se os valores de  $R_a$ .

✓ Desvio médio quadrático –  $R_q$

Corresponde à raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média em um comprimento de amostragem.

A expressão matemática do desvio médio quadrático, definido em Agostinho et al. (1977) é a seguinte:

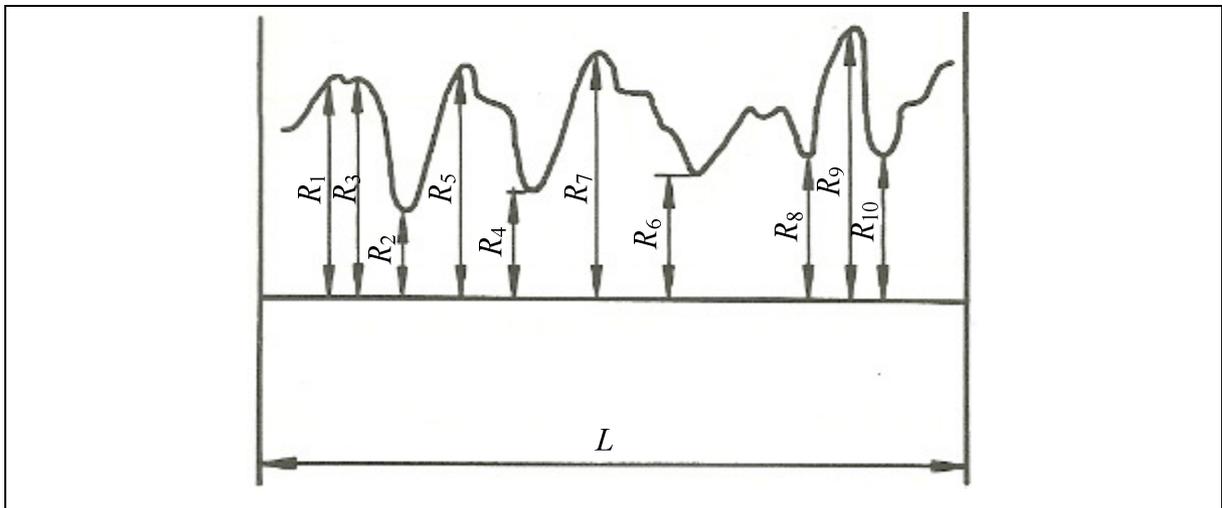
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \cong \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (15)$$

O valor de  $R_q$  (*rms*) é da ordem de 11% maior que o valor de  $R_a$  (AA – *Aritmetical Average*, CLA – *Center Line Average*) e esta diferença passa a ser importante em muitos casos pelo fato de ser mais sensível aos picos e vales do que

$R_a$ . Este parâmetro é empregado em superfícies onde o acabamento apresenta os riscos de usinagem bem orientados e principalmente em superfícies onde o parâmetro  $R_a$  tem pouca resolução.

✓ Altura das irregularidades dos 10 pontos ( $R_z$ )

Corresponde à diferença entre o valor médio das ordenadas dos 5 (cinco) pontos mais salientes e o valor médio das ordenadas dos 5 pontos mais reentrantes, medidas a partir de uma linha paralela à linha média, não interceptando o perfil, e no comprimento de amostragem  $L$  (Figura 13).



**Figura 13 - Altura das irregularidades dos 10 pontos  $R_z$**

Fonte: Agostinho et al. (1977)

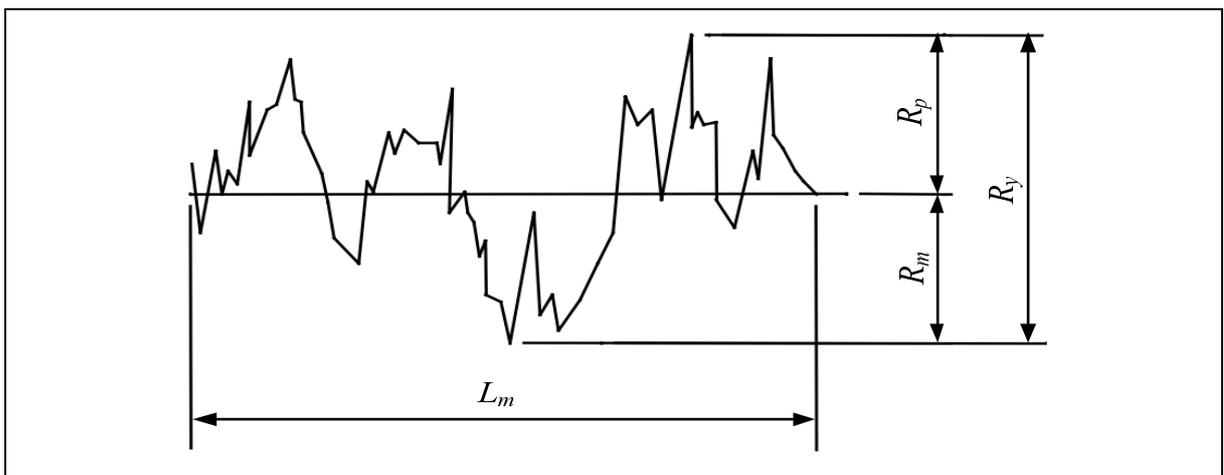
A expressão matemática definida em Agostinho et al. (1977) é a seguinte:

$$R_z = \frac{R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9}{5} - \frac{R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10}}{5} \quad (16)$$

✓ Altura máxima das irregularidades ( $R_{máx}$ )

Corresponde à distância entre duas linhas paralelas à linha média e que tangenciam a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda, medida no comprimento da amostragem. Trata-se do critério adotado pelas normas alemãs (DIN 4762 de 1984). Um parâmetro semelhante ao  $R_{máx}$  para medição de rugosidade

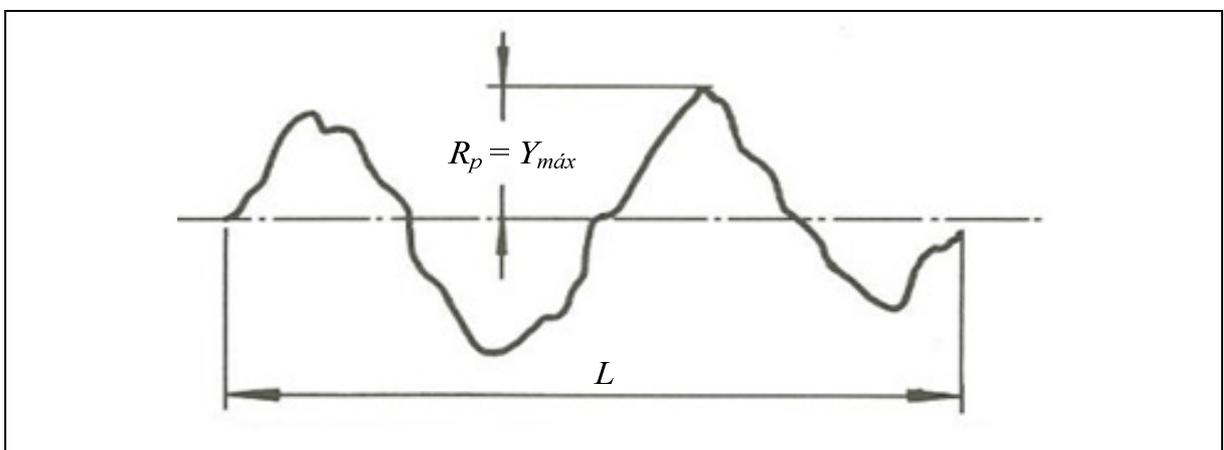
superficial na Alemanha, designada por  $R_y$ , é a máxima distância entre o pico mais alto e o vale mais fundo, ou seja, a soma de  $R_p$  mais  $R_m$  dentro do comprimento de avaliação  $L$ . A  $R_p$  é a altura máxima do pico mais elevado da rugosidade, situado acima da linha média e  $R_m$  é a máxima profundidade do vale mais profundo da rugosidade, situado abaixo da linha média. Pode ser utilizável quando se dispõe de aparelhos traçadores de perfil denominados perfilógrafos (Figura 14).



**Figura 14 - Altura máxima da rugosidade  $R_{máx}$**   
 Fonte: Agostinho et al. (1977)

✓ Profundidade média ( $R_p$ )

Corresponde à ordenada da saliência mais pronunciada ( $Y_{máx}$ ), com origem na linha média, no comprimento da amostragem conforme Figura 15.



**Figura 15 - Profundidade média  $R_p$**   
 Fonte: Agostinho et al. (1977)

✓ Comprimento de amostragem (*Cut-off*)

No perfil efetivo de uma superfície,  $L_m$  corresponde ao comprimento total de avaliação, e  $L$  ao comprimento de amostragem (NBR 6405/1988). Assim, o comprimento de amostragem para rugosímetro é chamado de *cutt-off* ( $L$ ). O Quadro 4 ilustra os valores mínimos de comprimento de amostragem recomendados na medição de rugosidade.

Rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento mínimo para amostragem $L$ ( <i>cut off</i> ) (mm)
Menor que 0,02	0,08
de 0,02 a 0,1	0,25
de 0,1 a 2,0	0,80
de 2,0 a 10,0	2,50
Maior que 10,0	8,00

Quadro 4 - Recomendações de comprimento de amostragem

Fonte: ISO 4288/1996

A norma NBR 6405/1988 recomenda que os rugosímetros devam medir por amostragem os picos e vales da superfície usinada, devendo indicar o valor médio de rugosidade (Figura 16).

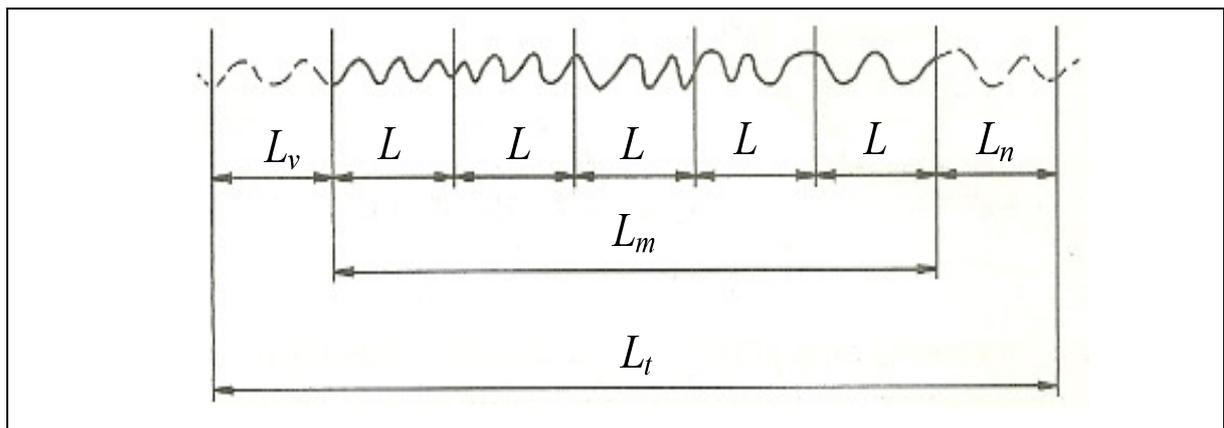
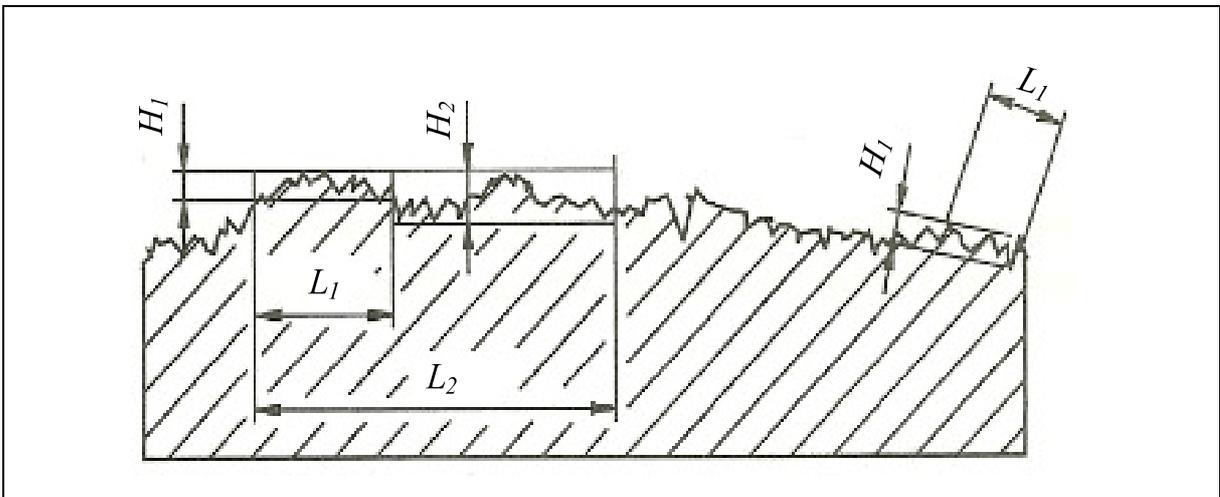


Figura 16 - Comprimentos para avaliação de rugosidade

Fonte: Rosa (2007)

A distância percorrida pelo apalpador deverá ser igual a  $5L$  mais a distância para atingir a velocidade de medição  $L_v$  e para a parada do apalpador  $L_n$ . Como o

perfil apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação (Figura 17).



**Figura 17 - Rugosidade e ondulação**

Fonte: Cordeiro (2004)

A rugosidade  $H_2$  é maior, pois  $L_2$  incorpora ondulação. A rugosidade  $H_1$  é menor, pois, como o comprimento  $L_1$  é menor, o mesmo filtra a ondulação.

#### 2.4.4 Acabamento superficial para diversos processos de usinagem

Há inúmeras variáveis que devem ser consideradas quando da especificação do acabamento superficial a ser obtido num determinado processo de usinagem. Assim, para um mesmo processo de usinagem o acabamento superficial pode variar de acordo com as seguintes condições:

- a) Rigidez da máquina;
- b) Dureza superficial da peça sendo usinada;
- c) Geometria da ferramenta;
- d) Fixação correta da peça a fim de evitar trepidações.

O quadro 5 mostra os valores do acabamento superficial possível de ser atingido por diversos processos de fabricação.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,03
Moldagem primária	██████████											
Fund. matriz à quente	██████████											
Extrusão à frio		██████████										
Estampagem a fundo				██████████								
Torneamento			██████████									
Furação	██████████											
Mandrilagem					██████████							
Fresamento	██████████											
Retífica					██████████							
Corrosão							██████████					
██████████ Campo usual de aplicação												

Quadro 5 - Faixas de rugosidade ( $R_a$ ) x processos de usinagem

Fonte: Klocke (2011)

## 2.5 ASPECTOS RELATIVOS AOS SISTEMAS INTELIGENTES

Inteligência artificial é a parte da ciência da computação que trata de sistemas inteligentes, capazes de se adaptar a novas situações, raciocinar, compreender relações entre fatos, descobrir significados e reconhecer padrões, ou seja, o desenvolvimento de programas de computador que tentam imitar a inteligência humana e funções de tomada de decisão, obtendo raciocínio e outras características humanas.

A partir de 1950, muitas ferramentas foram desenvolvidas com aplicações bem definidas em diversos campos do conhecimento humano, inclusive o da engenharia e especificamente na manufatura. As principais ferramentas de sistemas inteligentes conforme Pham (1999) são as seguintes:

- ✓ Sistemas baseados em Conhecimento ou Especialistas;
- ✓ Lógica Nebulosa ou “Fuzzy”;
- ✓ Algoritmos Genéticos;
- ✓ Redes Neurais Artificiais.

### 2.5.1 Sistemas baseados em Conhecimento ou Especialistas

São programas de computador que carregam um núcleo de conhecimento sobre um domínio restrito e, portanto, se tornam aptos a resolver problemas dentro deste domínio. Um sistema especialista normalmente é composto de uma base de conhecimento de domínio o qual pode ser representado através de regras “se então”, fatos, objetos e procedimentos e, mecanismo de inferência que manipula o conhecimento armazenado na base para gerar soluções aceitáveis para os problemas.

Os sistemas especialistas são uma ferramenta mais amadurecida devido ao volume de aplicações comerciais conhecidas como “*shells*” (ALMEIDA, 2006).

A desvantagem destes sistemas especialistas é a incapacidade de lidar com situações novas, ou seja, tratar situações externas àquelas cobertas por sua base de conhecimento e conseqüentemente gerarem conclusões ainda aceitáveis (ALMEIDA, 2006).

### 2.5.2 Lógica Nebulosa ou “*Fuzzy*”

A lógica *fuzzy*, que reflete a natureza inexata do raciocínio humano, pode vir a ser uma resposta à deficiência dos sistemas especialistas. Na lógica *fuzzy* o valor exato de uma variável é substituído por uma descrição lingüística, o qual representa um conjunto *fuzzy*.

O conhecimento num sistema computacional utilizando lógica *fuzzy* pode ser expresso em forma de regras qualitativas, como: “se a velocidade de corte é alta, então, ajuste o avanço para baixo para manter a potência consumida”. A vantagem neste caso é que o sistema pode realizar inferência sobre que ação tomar, se, por exemplo, a velocidade de corte é levemente menor que alta.

A lógica *fuzzy* tem inúmeras aplicações em engenharia, inclusive manufatura como, por exemplo, controle de máquinas CNC, determinação de formações ótimas

de células de manufatura, classificação de pulsos em eletroerosão, entre outros (ALMEIDA, 2006).

### 2.5.3 Algoritmos genéticos

Trata-se de um processo de otimização estocástico inspirado na evolução natural. Este procedimento pode obter uma solução ótima global, espaço de pesquisa multimodal complexo, sem possuir um conhecimento específico sobre o mesmo. Entretanto, para que um algoritmo genético possa ser aplicado, soluções potenciais de problemas devem ser representadas na forma de cadeias de números (normalmente sistema binário), conhecidos na nomenclatura como cromossomos.

As aplicações de algoritmos genéticos na engenharia são normalmente encontradas em problemas de otimização multiparâmetros e análise combinatória complexa (ALMEIDA, 2006).

### 2.5.4 Redes neurais artificiais

Mcculloch e Pitts (1943) apresentaram um dos primeiros trabalhos sobre modelamento matemático do neurônio biológico sendo este a primeira concepção do neurônio artificial.

O primeiro método de treinamento para redes neurais artificiais foi proposto por Hebb (1949) baseado em hipóteses e observações de caráter neurofisiológico, denominado regra de aprendizado Hebb.

Em 1958, Frank Rosenblat desenvolveu o primeiro neurocomputador denominado *Mark I – Perceptron*.

Widrow e Hoff (1960) desenvolveram uma rede denominada *Adaline* (*Adaptative Linear Element*) e posteriormente a *Madaline*, a *Adaline* múltipla cujo aprendizado é fundamentado na chamada regra Delta (*LMS – least mean square*).

Entretanto, no período de 1969 a 1982 a neurocomputação sofreu um revés onde Minsky e Papert (1969) demonstraram a impossibilidade de as redes

realizarem a correta classificação de padrões para classes não linearmente separáveis. A retomada das pesquisas relacionadas com as redes neurais artificiais ocorreu em 1982, quando Hopfield apresentou as redes recorrentes baseadas em funções de energia.

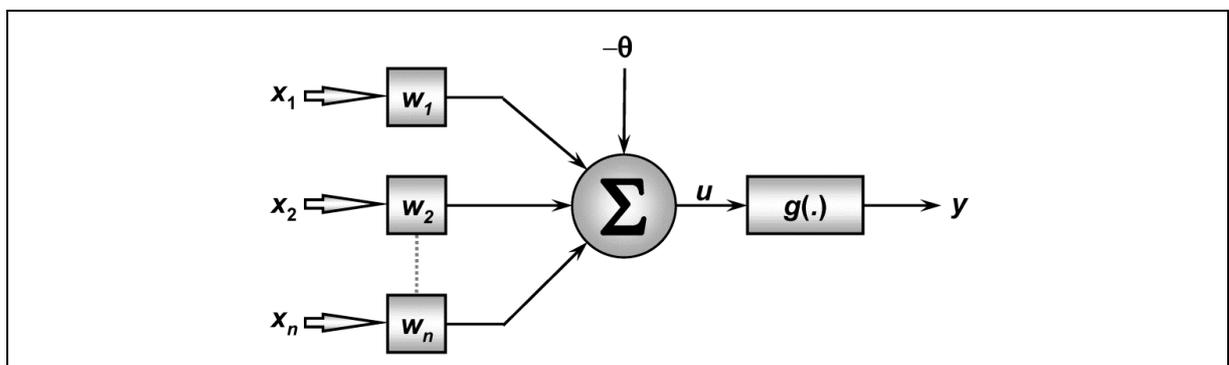
Hagan e Menhaj (1994) propuseram algoritmos de aprendizado baseados no método de *Levenberg-Marquardt*, permitindo-se incrementar a eficiência do treinamento de redes neurais artificiais em diversas aplicações.

Assim, pode-se definir as redes neurais artificiais como modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos com capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento baseado em informações (SILVA et al., 2010).

### 2.5.5 O neurônio artificial

A estrutura das redes neurais artificiais foi desenvolvida a partir de modelos conhecidos de sistemas nervosos biológicos e do próprio cérebro humano (SILVA et al., 2010).

Os neurônios utilizados nos modelos de redes neurais artificiais não lineares, fornecem saídas tipicamente contínuas e realizam funções simples tais como coletar os sinais existentes em suas entradas, agregá-los de acordo com a sua função operacional e produzir uma resposta na sua saída, levando em consideração sua função de ativação (Figura 18).



**Figura 18 - Neurônio artificial**

Fonte: Silva et al. (2010)

Na Figura 18, os diversos sinais de entradas advindos do meio externo (aplicação) são representados pelo conjunto  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , que são análogos aos impulsos elétricos externos.

As ponderações são exercidas pelo conjunto de pesos sinápticos  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ . A cada uma das entradas  $\{x_i\}$  do neurônio são ponderadas todas as informações externas que chegam a ele. A saída denotada por  $u$ , é a soma ponderada de suas entradas. Conforme a Figura 18, o neurônio artificial é constituído de:

a) Sinais de entrada  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

São sinais ou medidas advindas do meio externo e que representam os valores assumidos pelas variáveis de uma aplicação específica. Os sinais de entrada são usualmente normalizados visando incrementar a eficiência computacional dos algoritmos de aprendizagem;

b) Pesos sinápticos  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$

São valores que servirão para ponderar cada uma das variáveis de entrada da rede, permitindo-se quantificar suas relevâncias em relação à funcionalidade do respectivo neurônio;

c) Combinador linear  $\{\Sigma\}$

Sua função é agregar todos os sinais de entrada que foram ponderados pelos respectivos pesos sinápticos a fim de produzir um valor de potencial de ativação;

d) Limiar de ativação  $\{\theta\}$

É uma variável que especifica qual será o patamar apropriado para que o resultado produzido pelo combinador linear possa gerar um valor de disparo em direção à saída do neurônio;

e) Potencial de ativação  $\{u\}$

É o resultado produzido pela diferença do valor produzido entre o combinador linear e o limiar de ativação. Se tal valor é positivo, ou seja, se  $u \geq \theta$  então o neurônio produz um potencial excitatório; caso contrário, o potencial será inibitório;

f) Função de ativação  $\{g\}$

Seu objetivo é limitar a saída do neurônio dentro de um intervalo de valores razoáveis a serem assumidos pela sua própria imagem funcional;

## g) Sinal de saída {y}

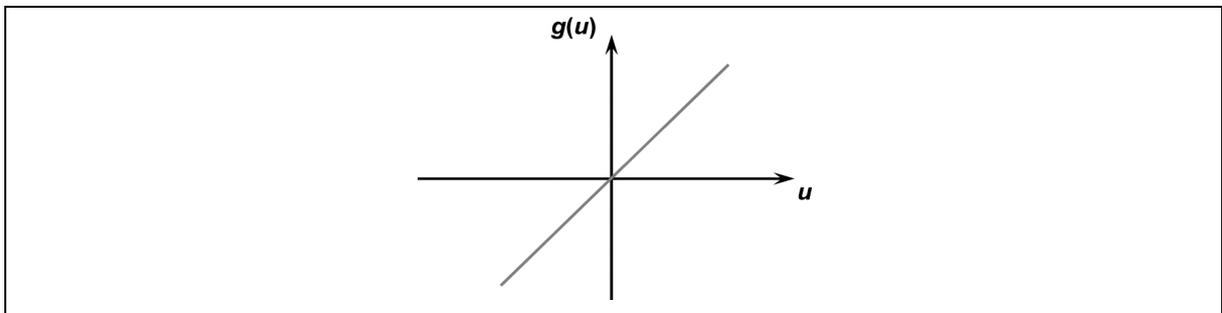
Consiste no valor final produzido pelo neurônio em relação a um determinado conjunto de sinais de entrada, podendo ser também utilizado por outros neurônios que estão sequencialmente interligados.

As funções de ativação são uma descrição de como o fluxo de informação se dá por meio da rede neural. Assim, um neurônio para atingir certo grau de atividade ou estado de ativação, deve combinar todos os sinais recebidos numa soma ponderada. Existem variadas funções de ativação, contudo as mais importantes para problemas relacionados à modelagem de processos de fabricação são apresentadas abaixo (SILVA et al., 2010):

## ✓ Função linear

A função de ativação linear ou identidade (Figura 19) produz resultados de saída idênticos aos valores do potencial de ativação { $u$ }, tendo sua expressão matemática definida por:

$$g(u) = u \quad (17)$$



**Figura 19 - Função de ativação linear**

Fonte: Silva et al. (2010)

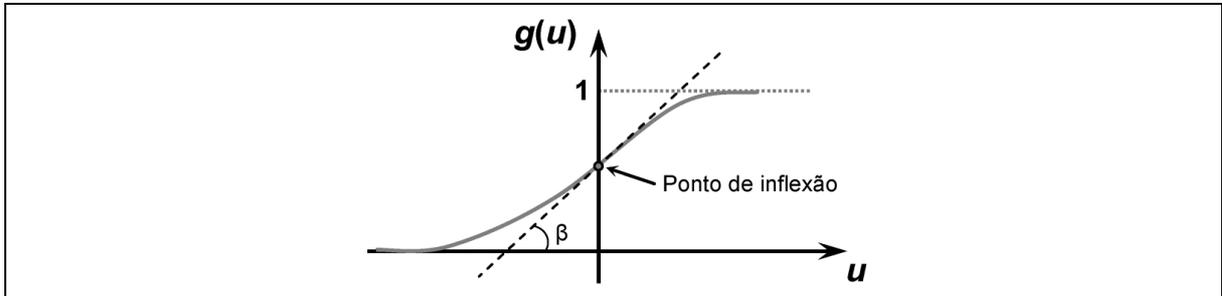
## ✓ Função logística

O resultado de saída produzido pela aplicação da função logística assumirá sempre valores reais entre zero e um, cuja expressão matemática é dada pela equação 18:

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (18)$$

onde:

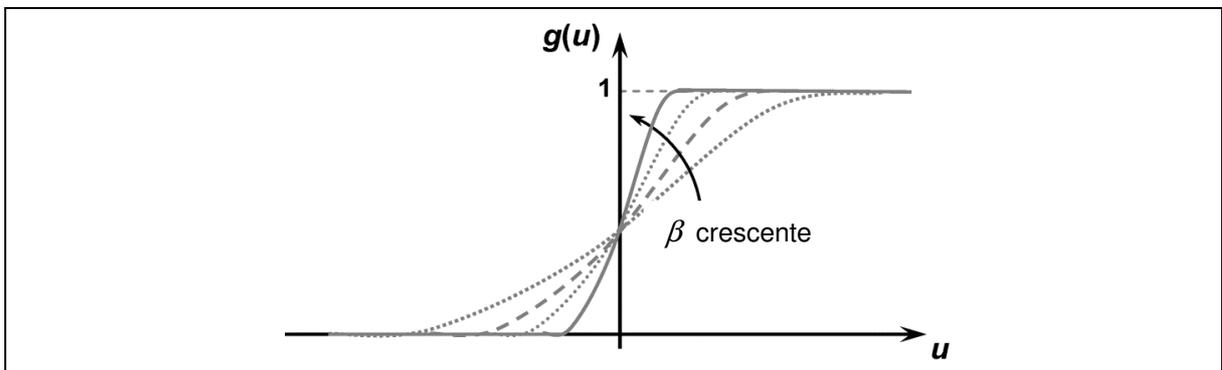
$\beta$  é a constante real associada ao nível de inclinação da função logística frente ao seu ponto de inflexão (Figura 20).



**Figura 20 - Função de ativação logística**

Fonte: Silva et al. (2010)

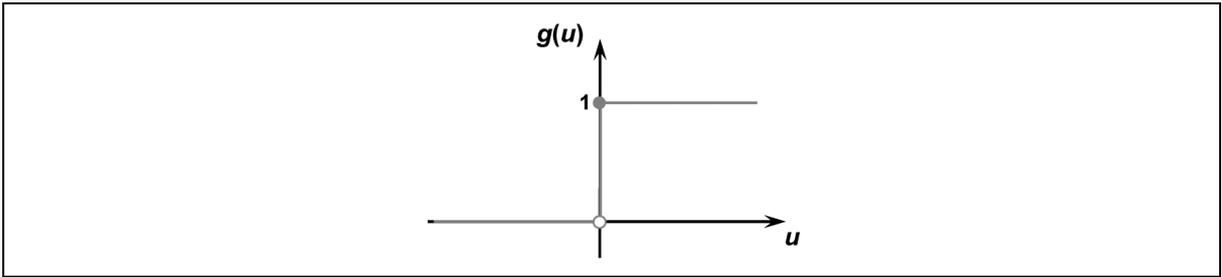
A Figura 21 abaixo ilustra o comportamento da função de ativação logística em relação à variação do parâmetro de inclinação  $\beta$ .



**Figura 21 - Influência do parâmetro  $\beta$  na função de ativação logística**

Fonte: Silva et al. (2010)

Conclui-se a partir da análise da Figura 21 que o formato geométrico da função de ativação logística tenderá a ser similar àquele da função degrau (Figura 22) quando o parâmetro  $\beta$  for muito elevado (tender ao infinito). Entretanto, em contraste com a função degrau, a função logística é totalmente diferenciável em todo o seu domínio de definição.



**Figura 22 - Função de ativação degrau**

Fonte: Silva et al. (2010)

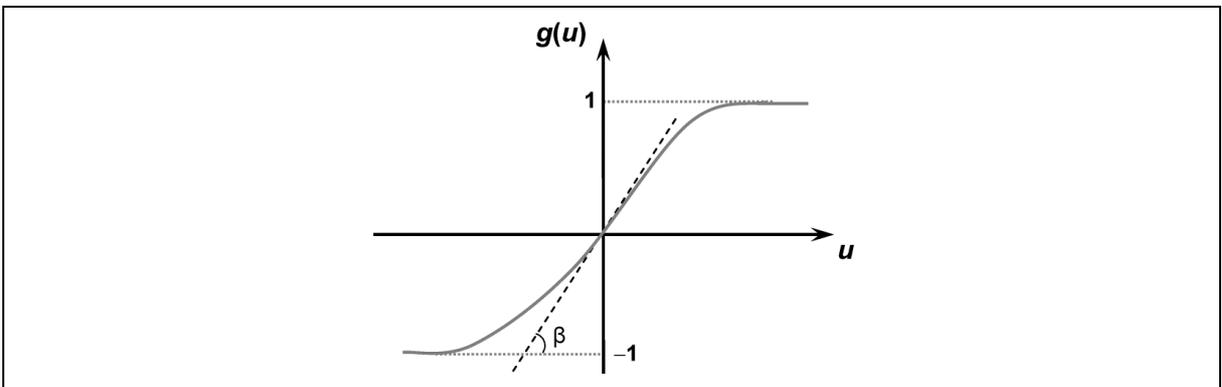
✓ Função tangente hiperbólica

O resultado de saída, diferentemente da função logística, sempre assumirá valores reais entre -1 e 1, cuja expressão matemática é definida pela equação 19:

$$g(u) = \frac{1 - e^{-\beta \cdot u}}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (19)$$

onde:

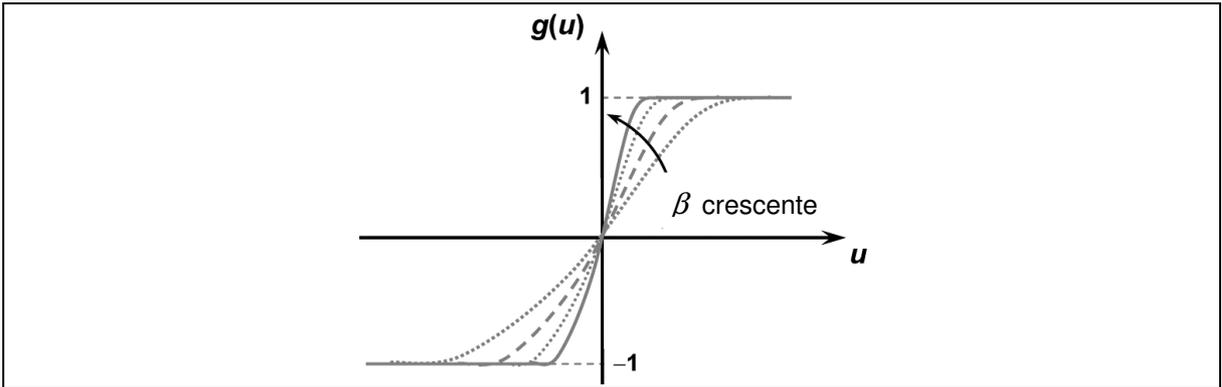
$\beta$  é a constante associada ao nível de inclinação da função tangente hiperbólica em relação ao seu ponto de inflexão (Figura 23).



**Figura 23 - Função de ativação tangente hiperbólica**

Fonte: Silva et al. (2010)

A Figura 24 ilustra o gráfico da função tangente hiperbólica para diversos valores atribuídos ao parâmetro  $\beta$ .



**Figura 24 - Influência do parâmetro  $\beta$  na função de ativação tangente hiperbólica**

Fonte: Silva et al. (2010)

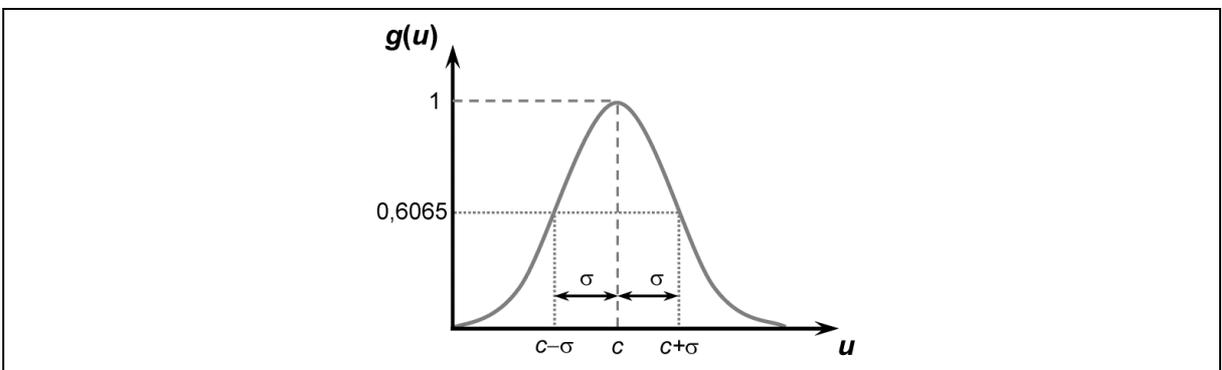
✓ Função gaussiana

Na função de ativação gaussiana, a saída do neurônio produzirá resultados iguais para aqueles valores de potencial de ativação  $\{u\}$  que estejam posicionados a uma mesma distância de seu centro (média), sendo que a curva é simétrica em relação a este. A equação 20 descreve esta função de ativação e a Figura 25 a ilustra através de um gráfico.

$$g(u) = e^{-\frac{(u-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (20)$$

onde:

$c$  é o parâmetro que define o centro da função gaussiana e  $\sigma$  denota o desvio-padrão associado à mesma.



**Figura 25 - Função de ativação gaussiana**

Fonte: Silva et al. (2010)

De acordo com a figura anterior, o valor do desvio-padrão  $\{\sigma\}$  está diretamente associado com o ponto de inflexão da função gaussiana, sendo que  $\sigma^2$  indica a sua respectiva variância.

As funções de ativação são as responsáveis por determinar a forma e a intensidade de alterações dos valores transmitidos de um neurônio a outro.

### 2.5.6 Topologias de rede neurais artificiais

A topologia de uma rede neural artificial contempla sua estrutura básica, composta pelo número de camadas, o número de elementos de processamentos por camada, o tipo de função de ativação e o algoritmo de aprendizagem.

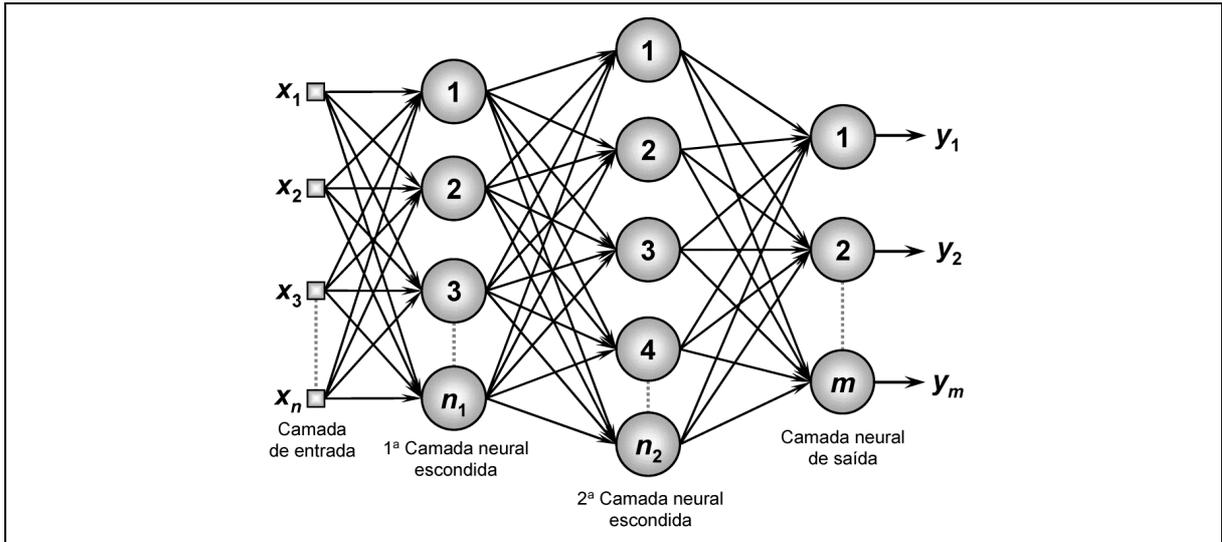
Basicamente, uma rede neural artificial pode ser dividida em três partes, denominadas camadas, as quais são nomeadas da seguinte forma:

- a) Camada de entrada;
- b) Camadas escondidas, intermediárias, ocultas ou invisíveis;
- c) Camada de saída.

As principais arquiteturas de redes neurais artificiais, considerando a disposição de seus neurônios, assim como as formas de interligação entre eles e a constituição de suas camadas, podem ser divididas em:

✓ *Feedforward* de múltiplas camadas (“*Multi Layer Perceptrons*” - *MLP*)

São constituídas de uma ou mais camadas escondidas de neurônio que realizam os cálculos, os quais processam as ativações recebidas a partir dos dados de entrada entre as camadas de entrada e saída. São sistemas empregados na solução de diversos tipos de problemas, tais como aqueles relacionados à aproximação de funções, classificação de padrões, identificação de sistemas, otimização, robótica, controle de processos, entre outros. A Figura 26 ilustra a estrutura da *Perceptron* multicamada (PMC).



**Figura 26 - Rede *feedforward* de camadas múltiplas**

Fonte: Silva et al. (2010)

A Figura 26 ilustra a entrada composta de  $n$  sinais, duas camadas neurais escondidas constituídas respectivamente de  $n_1$  e  $n_2$  neurônios e, finalmente uma camada neural de saída composta de  $m$  neurônios representando os respectivos valores de saída da aplicação.

### 2.5.7 Regras de aprendizado

O fato relevante das redes neurais artificiais está na capacidade de aprender a partir da apresentação de amostras (padrões) que exprimem o comportamento do sistema. A rede é capaz de generalizar soluções após ter aprendido o relacionamento entre as entradas e saídas, podendo, portanto, produzir uma saída próxima daquela esperada (desejada) a partir de quaisquer sinais inseridos em suas entradas.

Existem dois tipos básicos de algoritmos de aprendizado mais comumente utilizados: i) supervisionado e ii) não-supervisionado.

#### ✓ Aprendizado supervisionado

Neste algoritmo, um conjunto de dados de treinamento (composto pelos sinais de entrada) e seus correspondentes valores de saída são apresentados à

rede. Estes dados de entrada geram uma resposta que é então comparada com o vetor de saída desejado.

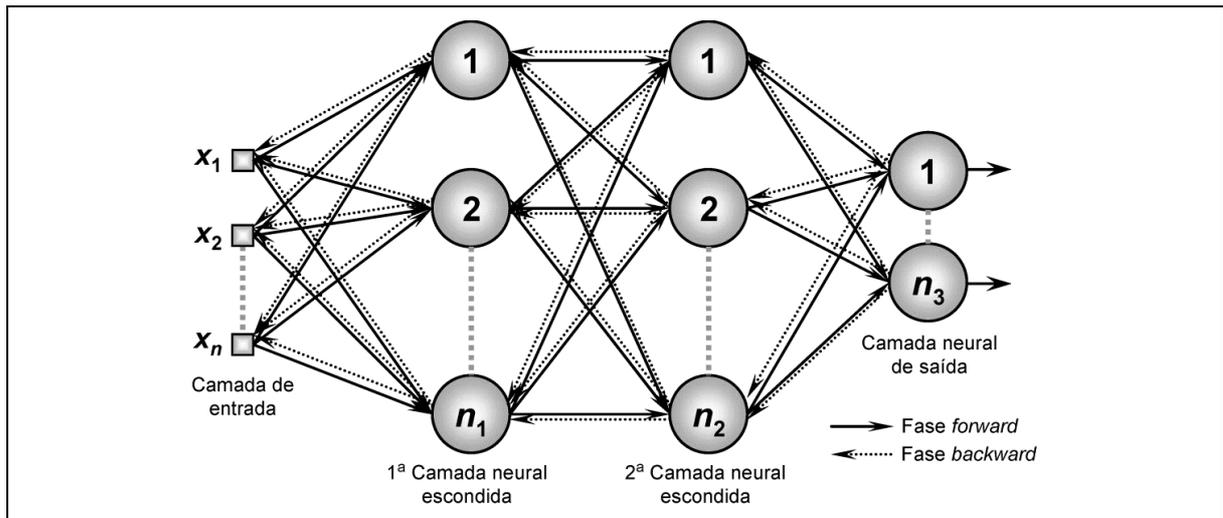
Os pesos sinápticos e limiares são então continuamente ajustados mediante a aplicação de ações comparativas, executadas pelo próprio algoritmo de aprendizagem que supervisionam a defasagem entre as respostas produzidas pela rede em relação às desejadas, sendo esta diferença usada no procedimento de ajuste. A rede será considerada treinada quando tal defasagem estiver dentro de valores aceitáveis, levando-se em consideração os propósitos de generalização de soluções.

✓ **Aprendizado não supervisionado**

Durante a aplicação do algoritmo para aprendizado, não existem as respectivas saídas desejadas. Consequentemente, a própria deve se auto-organizar em relação às particularidades existentes entre os elementos componentes do conjunto total de amostras, identificando subconjuntos (*clusters*) que contenham similaridades. Os pesos sinápticos e limiares dos neurônios da rede são então ajustados pelo algoritmo de aprendizado de forma a refletir esta representação dentro da própria rede.

✓ **Método de retropropagação (*Backpropagation*)**

O treinamento de redes PMC utilizando o algoritmo *backpropagation* é conhecido também como regra Delta generalizado. Consiste nas aplicações sucessivas de duas fases bem específicas. A Figura 27 ilustra uma configuração PMC constituída de duas camadas escondidas, composta de  $n$  sinais em sua camada de entrada, tendo ainda  $n_1$  neurônios na primeira camada neural escondida,  $n_2$  neurônios na segunda camada neural escondida e  $n_3$  sinais associados à camada neural de saída.



**Figura 27 - Ilustração das duas fases de treinamento da rede PMC**

Fonte: Silva et al. (2010)

Na primeira fase denominada de propagação adiante (*forward*), os sinais  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  de uma amostra do conjunto de treinamento são inseridos nas camadas da rede e são propagados camada a camada até a produção das respectivas saídas com o objetivo de obter as respostas da rede, considerando-se apenas os valores atuais de pesos sinápticos e limiares de seus neurônios, os quais permanecerão inalterados durante cada execução desta fase.

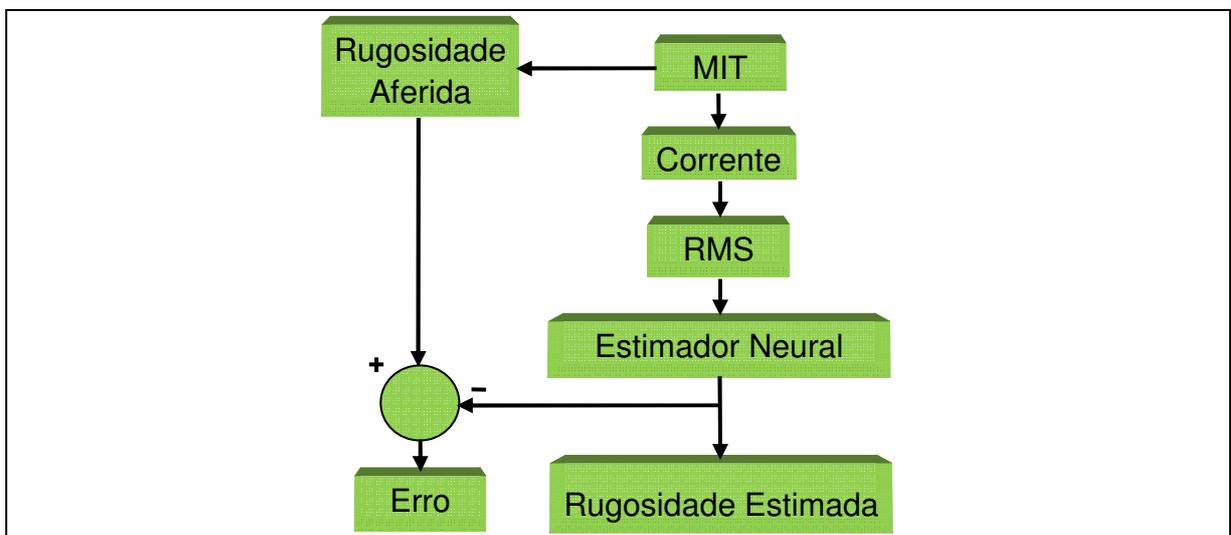
Em seguida, os respectivos desvios entre as respostas desejadas e aquelas produzidas pelos neurônios de saída da rede são então calculados, os quais serão subsequentemente utilizados para ajustar os pesos e limiares de todos os seus neurônios.

Na segunda fase, aplicam-se os valores de erros obtidos anteriormente denominada de propagação reversa (*backward*). Nesta fase, as alterações (ajustes) dos pesos sinápticos e limiares de todos os neurônios da rede são executados no decorrer desta fase.

Portanto, as aplicações sucessivas das fases *forward* e *backward* fazem com que os pesos sinápticos e limiares dos neurônios se ajustem automaticamente em cada iteração, implicando na gradativa diminuição da soma dos erros produzidos pelas respostas da rede frente a aquelas desejadas.

### 2.5.8 Processos baseados em modelos neurais

Na metodologia para treinamento e validação da estrutura neural proposta neste trabalho, os parâmetros de entrada da RNA PMC são formados por valores eficazes (RMS) da corrente de linha da alimentação do MIT. A saída da RNA é a rugosidade estimada. A saída deste estimador neural é comparada com o valor desejado, gerando-se assim o sinal de erro, conforme mostra a figura 28.



**Figura 28 - Estrutura do preditor de rugosidade**

**Fonte: Autoria própria**

O neurônio artificial pode ser modelado matematicamente como segue:

$$v_j(k) = \sum_{i=1}^m X_i \cdot w_i + b \quad (21)$$

$$y_j(k) = \varphi_j(v_j(k)) \quad (22)$$

onde:

$m$  é o número de sinais de entrada do neurônio;

$X_i$  é o  $i$ -ésimo sinal de entrada do neurônio;

$w_i$  é o peso associado com o  $i$ -ésimo sinal de entrada;

$b$  é o limiar de cada neurônio;

$v_j(k)$  é a resposta do  $i$ -ésimo neurônio em  $k$ ;

$\varphi_j(\cdot)$  é a função de ativação do  $i$ -ésimo neurônio;

$y_j(k)$  é o sinal de saída do  $i$ -ésimo neurônio em  $k$ .

O treinamento é o processo pelo qual os pesos sinápticos das conexões entre os neurônios das diversas camadas são adaptados por meio de um processo de estímulo pelo ambiente no qual a rede está inserida, de modo a armazenar o conhecimento apresentado à rede.

Cada neurônio artificial, baseado nos sinais de entrada, é capaz de computar a respectiva saída por intermédio do ajuste dos seus pesos. A função de ativação de cada neurônio da primeira camada escondida é a função tangente hiperbólica, enquanto a função de ativação do neurônio de saída é a função identidade. O processo de ajuste dos pesos da rede ( $w_j$ ) associados ao  $j$ -ésimo neurônio de saída é feito pelo cálculo do sinal de erro  $e_j(k)$  (entre a resposta desejada e a resposta estimada) em relação a  $k$ -ésima iteração ou  $k$ -ésimo vetor de entrada. Este sinal de erro é calculado utilizando a equação 23:

$$e_j(k) = d_j(k) - y_j(k) \quad (23)$$

onde:

$d_j(k)$  é a resposta desejada do  $j$ -ésimo neurônio de saída.

Somando-se todos os erros quadráticos produzidos pelos neurônios de saída da rede em relação a  $k$ -ésima iteração, tem-se:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p e_j^2(k) \quad (24)$$

onde:

$p$  é o número de neurônios da saída.

Para uma configuração de pesos ótima,  $E(k)$  é minimizado por intermédio do ajuste dos pesos sinápticos  $w_{ji}$ . Os pesos associados à camada de saída da rede são recalculados usando-se a seguinte expressão:

$$w_{ji}(k) = w_{ji}(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{ji}(k)} \quad (25)$$

O peso sináptico  $w_{ji}$  está conectando ao  $j$ -ésimo neurônio da camada considerada ao  $i$ -ésimo neurônio da camada anterior, sendo  $\eta$  a constante que determina a taxa de aprendizado do algoritmo *backpropagation* (algoritmo supervisionado) que utiliza pares de entradas e saídas desejadas para ajustar os pesos da rede por um mecanismo de correção de erros.

A taxa de aprendizagem  $\eta$  da rede neural atua como fator multiplicador na correção dos pesos das conexões entre os neurônios, indica a rapidez com que os pesos sinápticos são ajustados, ou em outras palavras, a velocidade de aprendizagem da rede.

À medida que a taxa de aprendizagem aumenta, o tempo necessário para a rede neural adquirir certo volume de conhecimento tende a diminuir. No entanto, um aumento excessivo na taxa de aprendizagem, pode acarretar instabilidade, pois os pesos seriam corrigidos abruptamente prejudicando a convergência da rede, isto é, a minimização do erro.

O aprendizado ocorre em duas etapas conhecidas como fase de treinamento e fase de teste. Na primeira fase, os sinais de entrada são apresentados à rede, propagados pelas diversas camadas até a camada de saída, onde é comparado com a saída desejada. O erro gerado pela saída é então retropropagado e então os pesos das conexões são reajustados.

Na segunda fase, com os pesos das conexões da rede já ajustados são apresentados às entradas da rede e obtém-se a resposta (sem a realização de ajuste de pesos).

### 2.5.9 Erros de predição

O Erro Relativo Médio (ERM) estima o erro como sendo igual à diferença entre a saída desejada e a saída obtida, sendo assim uma medida de erro mais realista para problemas de previsão do que o erro padrão de estimativa (ANDRADE et al., 1997). Enquanto o erro padrão de estimativa apresenta um valor médio do erro para toda a série de previsões realizadas, o erro relativo médio, desprezando a unidade, sugere uma proporção que promove diferentes erros para valores altos e baixos desta série. A equação 26 calcula o ERM.

$$\text{ERM} = \left| \frac{\text{referência} - \text{estimado}}{\text{referência}} \right| \cdot 100 \quad (26)$$

onde:

ERM é o erro relativo médio [%];

*referência* é o valor medido;

*estimado* é o valor estimado pela RNA.

Os parâmetros de correntes adquiridos por superfície foram filtrados, obtendo-se o valor eficaz das correntes.

O bloco mede o valor quadrático médio de um sinal instantâneo de corrente ligada à entrada do bloco. O valor RMS do sinal de entrada é calculado através de uma janela média de execução de um ciclo da frequência especificada fundamental.

Como o bloco utiliza uma janela média de execução contínua, um ciclo de simulação precisa ser concluído antes que a saída forneça o valor correto. A versão discreta do bloco permite especificar a magnitude inicial de entradas. No primeiro ciclo de simulação, a saída é realizada para o valor RMS da entrada inicial especificada (equação 27).

$$\text{RMS}(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t f(t)^2} \quad (27)$$

Fonte: *Matlab/Simulink*

onde:

$(f(t))$  é o sinal de entrada;

$T$  é o período do sinal.

O ajuste dos pesos pertencentes às camadas escondidas é feito de forma análoga. Os passos para o ajuste destes pesos são detalhados na bibliografia consultada (HAYKIN, 2008).

A rede neural artificial usada para a predição de rugosidade é a multicamadas *feedforward* contendo duas camadas, sendo uma de entrada com parâmetros RMS de correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  e na camada de saída o parâmetro de Rugosidade ( $R_a$ ). Na geração de dados de treinamento baseado no modelo do MIT foram consideradas variações de tensão de -10 a +10% e o conjugado de carga variando de 1 a 25,18 Nm. Portanto, a metodologia foi aplicada para nove condições de desequilíbrio de tensão aplicada ao MIT durante o regime permanente considerando vinte cinco degraus de torque eletromagnético para cada uma das faixas de tensão.

#### 2.5.10 Aplicações de rede neural artificial em processos de manufatura

Muitos pesquisadores utilizaram as redes neurais artificiais na previsão da rugosidade da superfície, da vida da ferramenta e outros parâmetros de usinagem (AZOUZI; GUILLOT, 1997).

Aguiar, et al. (2011) utilizaram a RNA na determinação do desgaste de flanco médio da ferramenta de corte. Os parâmetros de velocidade, avanço e profundidade de usinagem constituíram as entradas da rede neural.

Trabalho recente utilizou modelos preditores para inferir os níveis de rugosidade das peças durante o processo de fabricação. As técnicas convencionais utilizam os valores do avanço, do raio de ponta da ferramenta e da velocidade de corte para a predição de rugosidade, conforme Ozel et al. (2009). O resultado do acabamento superficial obtido por meio da RNA, comparado com os valores teóricos

são muito próximos, o que mostram que os modelos de rede neural são adequados para inferir padrões de rugosidade superficial para uma série de condições de corte.

No trabalho de Azouzi e Guillot (1997) foi examinada a viabilidade de uma fusão de sensores com a RNA para estimar a rugosidade superficial e desvios dimensionais durante a usinagem. Este estudo concluiu que a velocidade de corte, a velocidade (rotação) e profundidade de corte são parâmetros de corte. Já o fluxo do fluido de corte, o estado de desgaste da ferramenta, o diâmetro da peça e a variação de propriedades do material são as condições do processo são as informações necessárias que devem ser integradas em modelos de redes neurais para prever a rugosidade da superfície com êxito.

Além desses parâmetros, Risbood et al. (2003) acrescentaram as vibrações radiais do suporte da ferramenta como um parâmetro adicional para prever a rugosidade da superfície. Durante seus experimentos, eles observaram que a superfície de usinagem em primeiro momento melhora com o aumento do avanço (mm/volta), mas depois a rugosidade começa a se deteriorar com o aumento da velocidade. Bernardos e Vosniakos (2003) fizeram uma extensa revisão da literatura sobre a predição da rugosidade em usinagem e confirmaram a eficácia da rede neural nas abordagens propostas.

Feng e Wang (2003) compararam os modelos de regressão com um modelo de rede neural *feed-forward*, usando dados experimentais esparsos obtidos para torneamento tradicional. Segundo os autores, os resultados obtidos indicaram que a modelagem através da RNA proporcionou melhor previsão para todas as condições de corte que participaram do treinamento. No entanto, os autores concluíram que os modelos de regressão poderiam ter um melhor desempenho quando os dados experimentais forem gerados a partir de delineamento experimental.

Özel e Karpát (2005) utilizaram a análise de regressão e modelos de redes neurais para predição da rugosidade superficial e do desgaste da ferramenta, no torneamento de acabamento de aço endurecido. Eles demonstraram que o preditor neural pode inferir o padrão de rugosidade da superfície no processo de torneamento.

Karpát e Özel (2005, 2006a, 2006b) apresentaram o estudo por meio da RNA para a seleção dos parâmetros de usinagem objetivando o melhor acabamento, desgaste da ferramenta e tempo de usinagem. Em geral, com baixas taxas de

avanço, melhora a vida útil do inserto e melhora o acabamento superficial das peças usinadas combinado com maior velocidade de corte. Tais pesquisadores utilizaram (equação 28) como parâmetros de entrada da rede a velocidade de corte ( $V_c$ ), o avanço ( $f$ ) e raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) e, na saída ( $R_a$ ).

$$R_a = 9,8963V_c^{-0,15819} f^{1,1904} r_\epsilon^{-0,92248} \quad (28)$$

onde:

$R_a$  é a rugosidade superficial [ $\mu\text{m}$ ];

$V_c$  é a velocidade de corte [m/min];

$f$  é o avanço [mm/volta];

$r_\epsilon$  é o raio de ponta da ferramenta [mm].

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os aspectos metodológicos relativos ao trabalho, bem como os resultados de simulação e experimental.

Devido à natureza multidisciplinar desta pesquisa, a experimentação foi dividida em duas etapas, sendo a primeira etapa referente aos ensaios práticos de usinagem realizada em um torno paralelo universal. A segunda etapa, consistiu no procedimento de modelagem da rede neural artificial e sua implementação.

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) câmpus Cornélio Procópio. As aferições da rugosidade dos corpos de prova foram feitas no Laboratório de Metrologia da mesma instituição.

#### 3.1 MODELO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL UTILIZADA

Neste trabalho, a rugosidade superficial é estimada através de uma rede neural multicamadas *feedforward* ilustrado na Figura 29. Os dados de entrada são os valores eficazes das correntes e a rugosidade na saída.

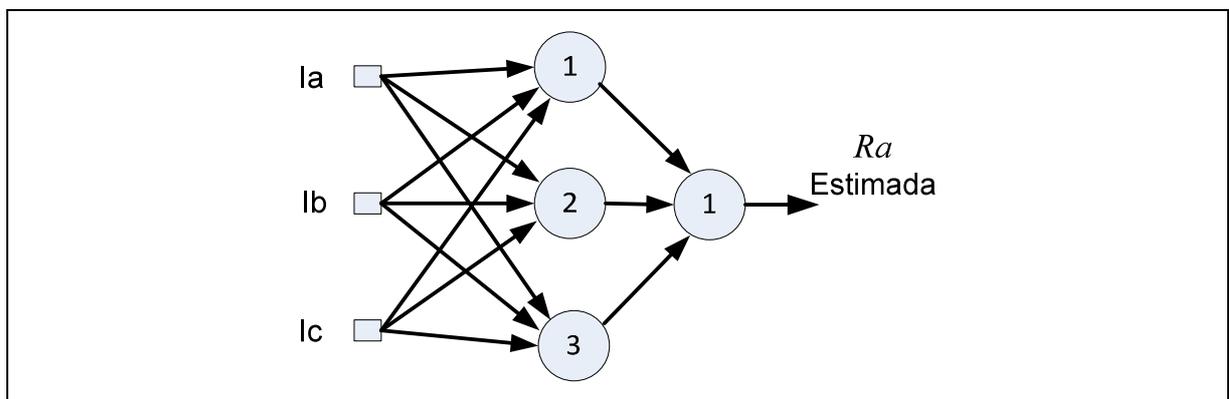


Figura 29 – Arquitetura da rede neural multicamadas *feedforward* usada na predição de rugosidade

Fonte: Autoria própria

A rede neural artificial usada para a predição de rugosidade é a multicamadas *feedforward* contendo a entrada com parâmetros *RMS* de correntes ( $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ ) e duas camadas. A camada escondida é composta de 3 neurônios e um neurônio na saída com os valores de rugosidade ( $R_a$ ) estimada.

As correntes elétricas eficazes (obtidas da simulação do motor) são as variáveis usadas no processo de treinamento da rede neural que neste caso são consideradas como uma carga do processo de usinagem acoplada ao eixo do rotor.

Os dados de treinamento considerados para as condições de desequilíbrio de tensões empregadas são apresentados no Quadro 6.

Condição	$V_a$ (%)	$V_b$ (%)	$V_c$ (%)
1	0	0	0
2	+5	0	0
3	+5	+5	0
4	+5	-5	0
5	+10	0	0
6	+10	+5	0
7	+10	-5	0
8	+10	+10	0
9	+10	-10	0

**Quadro 6 – Condições de desequilíbrio de tensões**

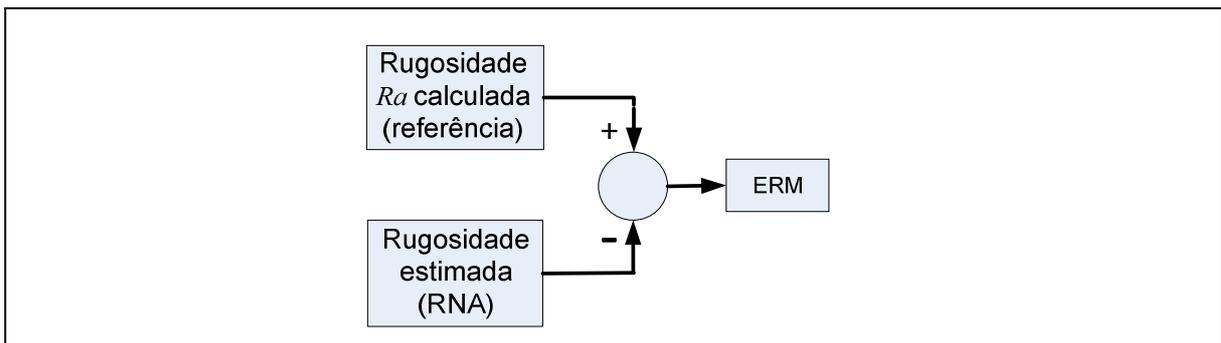
Fonte: Autoria própria

Para as 9 condições citadas, foram aplicados degraus de carga no motor de 4 CV (torque nominal de 25,18 Nm) de 1 Nm até 25,18 Nm, gerando assim 259 curvas de simulação.

Com o objetivo de gerar os dados de treinamento do estimador neural de velocidade do motor de indução em diversos pontos de operação de velocidade, foram realizadas várias simulações utilizando a ferramenta computacional *Matlab/Simulink*.

### 3.1.1 Validação da rede neural na simulação

A Figura 30 mostra a estrutura para validação, onde o ERM resultante é a diferença entre a rugosidade ( $R_a$ ) calculada por meio do modelo matemático (equação 28) e a rugosidade estimada pela RNA (Figura 29).



**Figura 30 – Estrutura da validação.**

Fonte: Autoria própria

Para a validação, foram utilizadas duas condições de valores diferentes de desequilíbrio de tensão quando comparados com as utilizadas no processo de treinamento, conforme ilustrados no Quadro 7. Essas duas condições foram escolhidas aleatoriamente.

Condição	$V_a$ (%)	$V_b$ (%)	$V_c$ (%)
1	+8	-3	0
2	+6	-9	0

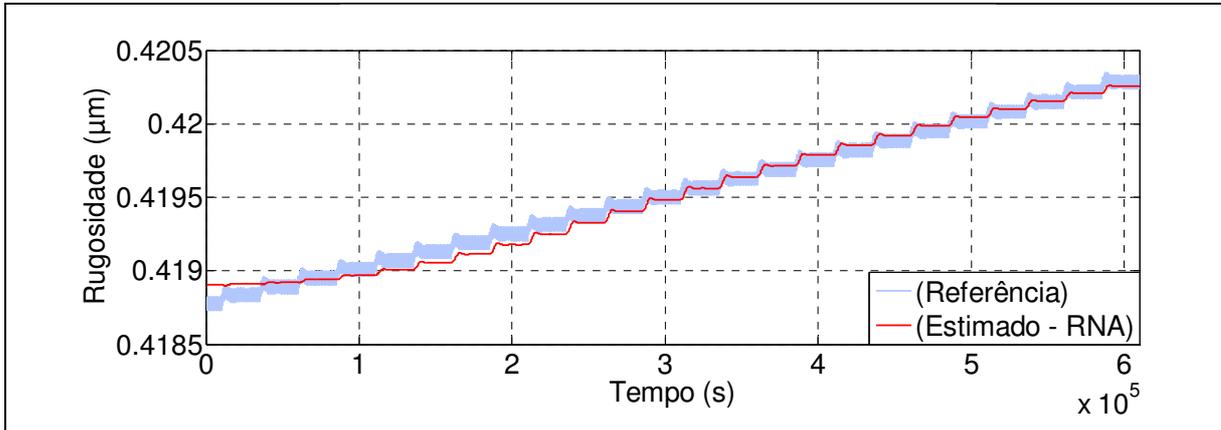
**Quadro 7 - Parâmetros de desequilíbrios utilizados na validação.**

Fonte: Autoria própria

No processo de validação, a rede opera de forma *on-line* com o processo de usinagem estimando  $R_a$  para as duas condições citadas no Quadro 7. As Figuras 31 e 32 mostram os resultados de validação da RNA para a rugosidade nas condições 1 e 2, respectivamente, onde os valores estimados pela RNA praticamente acompanham a rugosidade de referência (obtida da simulação). O menor erro

percentual de erro relativo médio foi para a condição 1 cujo valor foi de 0,0115%, já para a condição 2, o valor foi de 0,0120%.

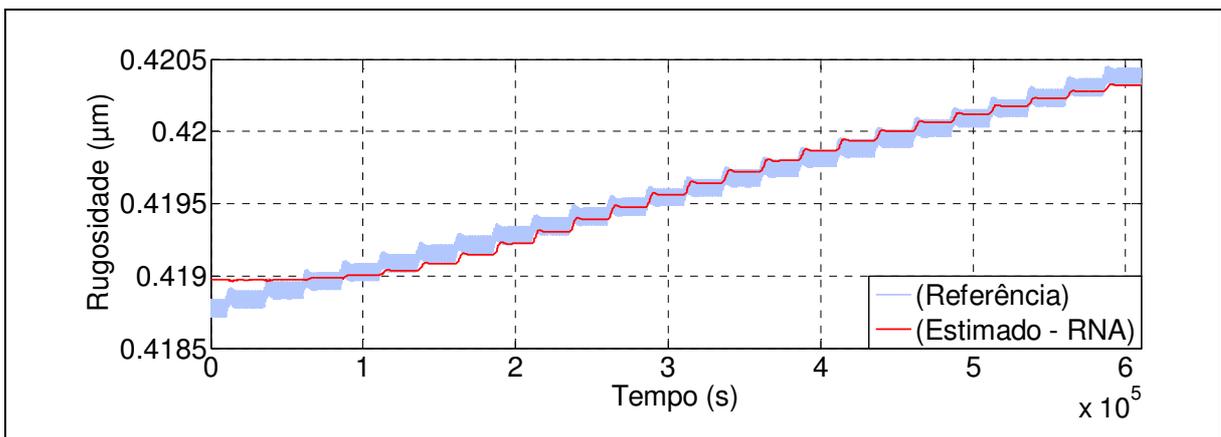
Resultado da curva de validação da RNA para a condição 1 (Figura 31), para tensão:  $V_a$  (+8%),  $V_b$  (-3%) e  $V_c$  (0%)



**Figura 31 – Curvas de validação de rugosidade ( $R_a$ ): condição 1**

Fonte: Autoria própria

Resultado da curva de validação RNA para a condição 2 (Figura 32), para tensão:  $V_a$  (+6%)  $V_b$  (-9%) e  $V_c$  (0%)



**Figura 32 – Curvas de validação de rugosidade ( $R_a$ ): condição 2**

Fonte: Autoria própria

O Quadro 8 apresenta o erro relativo médio (ERM) e o desvio padrão (Dp) calculado entre os valores de rugosidade ( $R_a$ ) de referência e os obtidos pela rede neural.

Condição	ERM (%)	Dp (%)
1	0,0115	0,0044
2	0,0120	0,0046

**Quadro 8 – Erro relativo médio (ERM) e desvio padrão (Dp)**

Fonte: Autoria própria

A metodologia foi aplicada para 9 (nove) condições de desequilíbrio de tensão aplicada ao MIT durante o regime permanente, em 25 graus de torque eletromagnético.

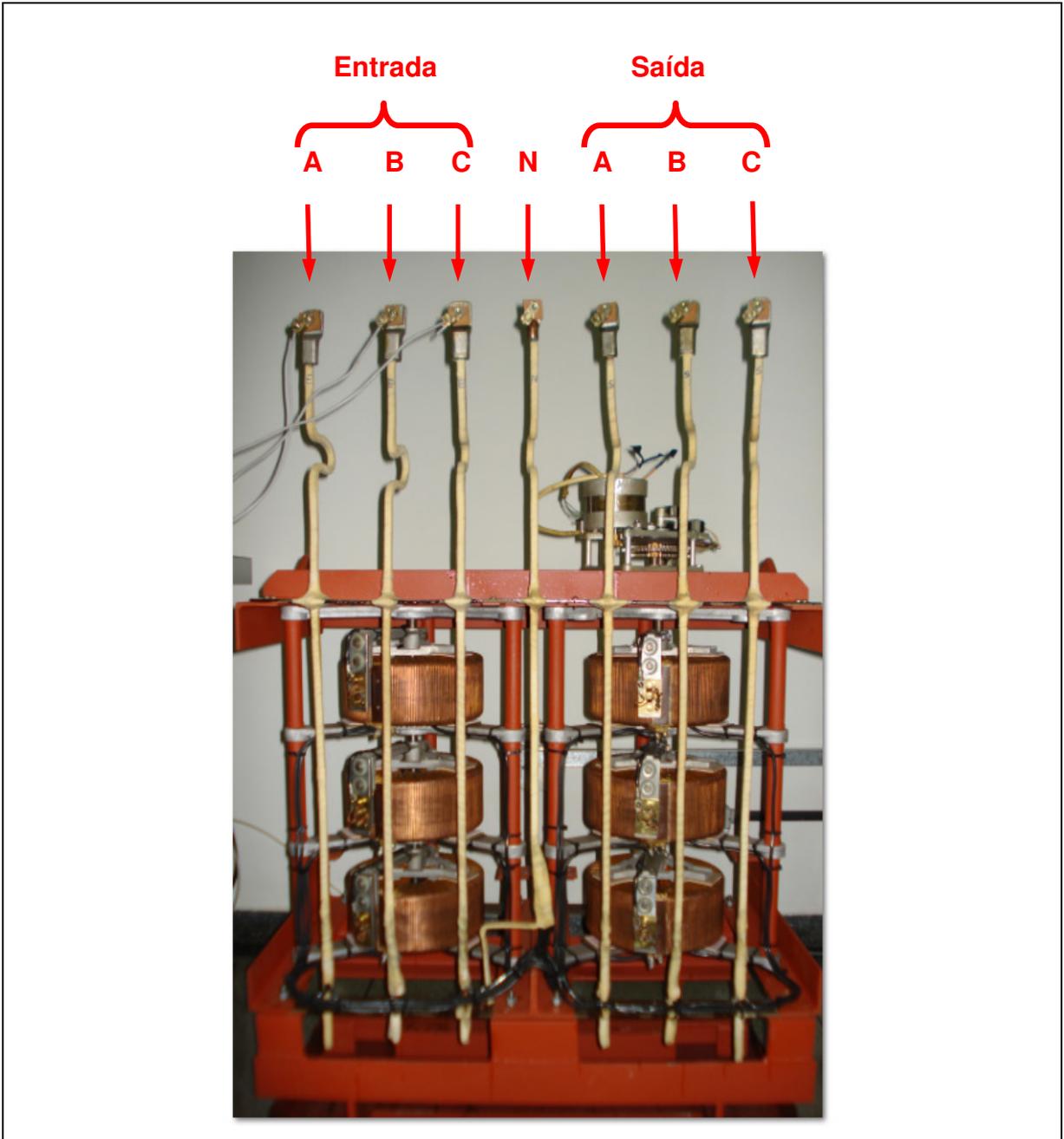
Para as condições de  $V_c = 345$  m/min,  $r_\epsilon = 0,4$  mm,  $f = 0,075$  mm/volta e diâmetro da peça  $d = 98$  mm, o resultado de rugosidade obtido foi  $R_a = 0,418$   $\mu\text{m}$ , sendo que a rugosidade teórica é  $R_a = 0,4188$   $\mu\text{m}$ .

Na validação da rede neural utilizou-se 3 neurônios na camada escondida e os parâmetros de desequilíbrios utilizados estão relacionados conforme o quadro 6.

A fim de investigar a influência da qualidade de energia elétrica sobre o acabamento superficial dos corpos de prova usinados, foram impostas duas condições de desequilíbrio em uma das fases “C” da rede de alimentação trifásica (tensão de fase de 220 V) do motor da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de usinagem (torno). As condições foram de 0% a -10% (tipo de afundamento de tensão: *sag*), de 0% a +10% (tipo de elevação de tensão: *swell*) com variação da tensão de 1% em 1% em ambas as situações e a condição de falta de fase.

A Figura 33 apresenta a representação esquemática da proposta do trabalho





**Figura 34 - Regulador de tensão trifásico utilizado**

**Fonte: Autoria própria**

### 3.1.3 Elevação de tensão (*swell*)

Para produzir os desequilíbrios de tensão de 1% a 10% em uma fase (condição de sobretensão), foi necessário acoplar um transformador trifásico

elevador de 220 V para 380 V (Figuras 35a e 35b) conectado ao regulador de tensão trifásico.



**Figura 35a – Conexão (entrada) da rede trifásica (220 V) ao transformador elevador**

**Fonte: Aatoria própria**



**Figura 35b – Conexão (saída) do transformador trifásico (380 V) ao regulador de tensão trifásico**

**Fonte: Aatoria própria**

### 3.1.4 Máquina-ferramenta

Os ensaios de usinagem foram realizados em um torno universal modelo MS 205, fabricado pela Indústria Nardini S.A., conforme mostra a Figura 36. Pode-se assim, considerar o equipamento novo e com pouco uso. O motor principal do torno é da marca Weg de duas velocidades (*Dahlander*) 8/4 pólos. As características deste motor são mostradas no Quadro 9.

Motor trifásico	8 Pólos	4 Pólos
Potência	6,3 [CV]	4,0 [CV]
Resistência do estator	1,00301 [ $\Omega$ ]	0,24981 [ $\Omega$ ]
Resistência do rotor	0,75038 [ $\Omega$ ]	0,22359 [ $\Omega$ ]
Indutância de dispersão do enrolamento do estator (L)	$7,25 \times 10^{-3}$ [H]	$1,64 \times 10^{-3}$ [H]
Indutância de dispersão do enrolamento do rotor (L)	$6,72 \times 10^{-3}$ [H]	$1,348 \times 10^{-3}$ [H]
Indutância de magnetização (L)	$6,81 \times 10^{-2}$ [H]	$6,248 \times 10^{-2}$ [H]
Momento de inércia do motor (J)	0,073787 [kgm <sup>2</sup> ]	0,073787 [kgm <sup>2</sup> ]
Velocidade síncrona ( $\omega_s$ )	94,24 [rad/s]	188,49 [rad/s]
Escorregamento nominal (s)	4,1 [%]	4,7 [%]
Torque nominal (Tn)	3,34 [kgfm]	2,57 [kgfm]

Quadro 9 – Características do motor principal do torno

Fonte: Weg S.A. (2006)



**Figura 36 - Torno paralelo universal Nardini MS 205**

**Fonte: Nardini S/A (2008)**

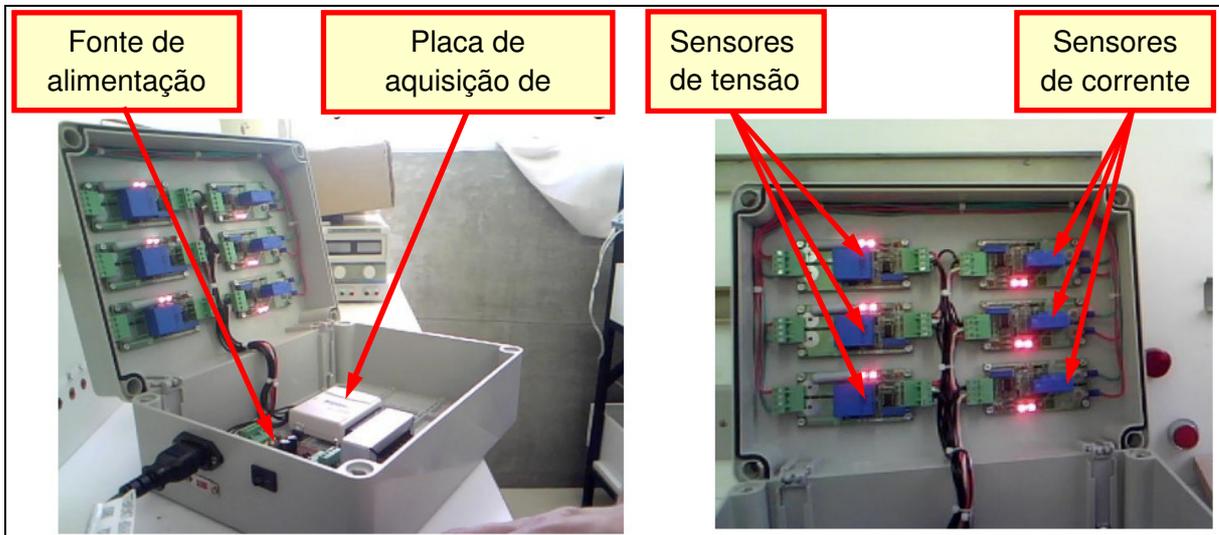
### 3.1.5 Ensaios preliminares

Antes da realização dos ensaios definitivos, foi realizada uma série de ensaios preliminares para a definição das melhores condições de usinagem e verificação da funcionalidade dos equipamentos empregados no banco de ensaios.

Nesta fase, os valores da tensão e da corrente elétrica de alimentação do motor acionador da máquina-ferramenta foram continuamente monitorados e registrados por meio de uma placa de aquisição de dados. A taxa de aquisição dos valores de tensão e de corrente foi de 6k amostras/segundo utilizando sensores de efeito Hall.

A aquisição dos parâmetros de tensão e corrente do motor da máquina ferramenta durante o processo de usinagem foi feita por meio de uma maleta de instrumentação, mostrada na Figura 37, contendo sensores Hall de tensão e de corrente e uma placa de aquisição de dados NI-DAQ USB 6009 conectada ao computador.

Os dados foram adquiridos com uma taxa de amostragem constante e concatenados sob a forma de matrizes, as quais foram registradas por meio do programa *Matlab*.



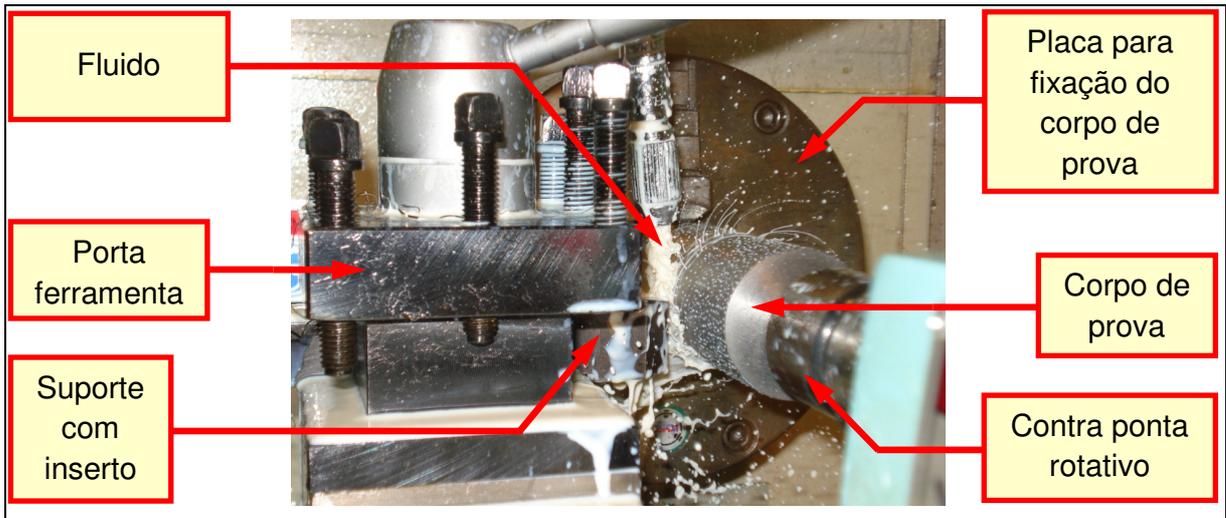
**Figura 37 – Maleta de instrumentação**

Fonte: Graciola, et al. (2009)

### 3.1.6 Condições de usinagem

Para a realização dos experimentos foram utilizadas duas velocidades de corte,  $V_c = 398,982$  m/min (com rotação de 2500 rpm) e  $V_c = 199,500$  m/min (com rotação de 1250 rpm). Para cada velocidade de corte foram empregados 3 avanços da ferramenta:  $f = 0,074$ ;  $0,150$  e  $0,251$  mm/volta. Adotou-se uma única profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de  $0,5$  mm (constante).

Neste trabalho utilizou-se a técnica convencional de refrigeração nos processos de usinagem, também conhecida por método de inundação, por meio de bombeamento do fluido de corte na região da interface ferramenta-peça (Figura 38). Empregou-se como fluido de corte uma emulsão de óleo (óleo Unix) em água, na proporção de 1-20.

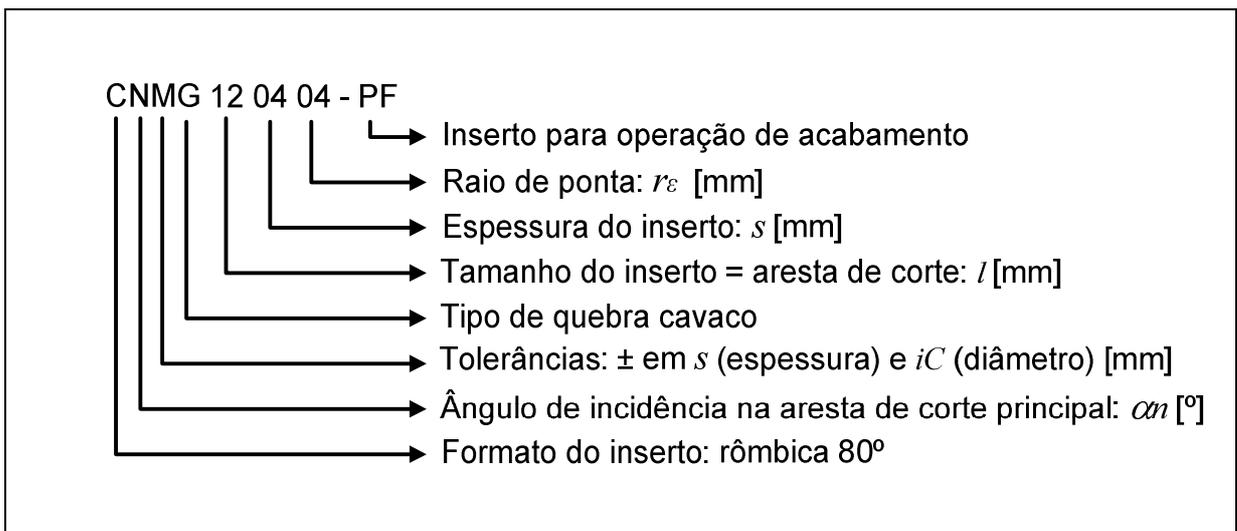


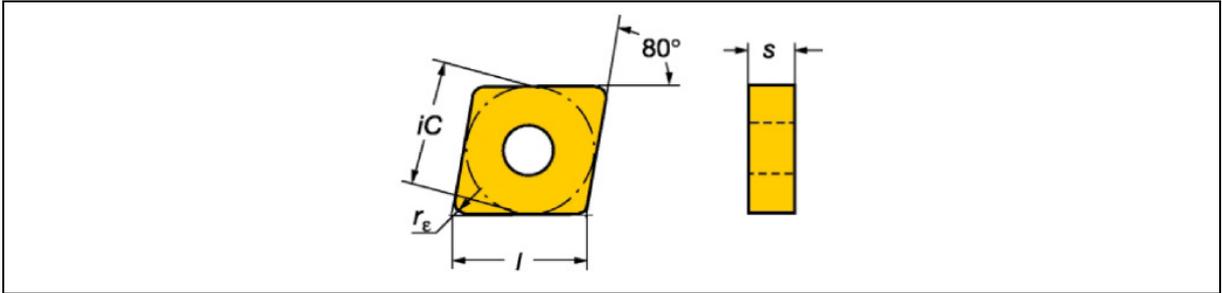
**Figura 38 – Lubrificação convencional dirigida à interface ferramenta-peça**

Fonte: Autoria própria

### 3.1.7 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte utilizada nesta pesquisa foi o inserto intercambiável de metal duro revestido com quebra cavaco, da marca Sandvick Coromant, formato rômbo 80° (Figura 39) com a seguinte codificação:





**Figura 39 - Geometria do inserto de metal duro utilizada**

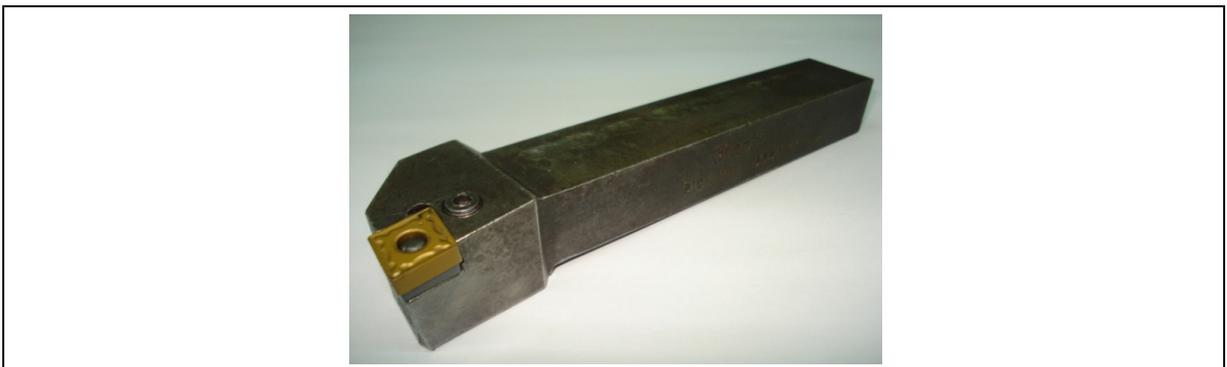
**Fonte: Sandvick Coromant (2006)**

Assim, os dados relativos à ferramenta de corte utilizada nos ensaios de usinagem são as seguintes:

- ✓ Comprimento total da aresta de corte  $l = 12$  mm;
- ✓ Espessura  $s = 4,76$  mm;
- ✓ Circunferência inscrito  $iC = 12,7$  mm;
- ✓ Raio de ponta  $r_E = 0,4$  mm.

Para cada condição de ensaio foi utilizado uma ponta do inserto para evitar o desgaste da aresta de corte, garantindo assim, uniformidade no processo de torneamento.

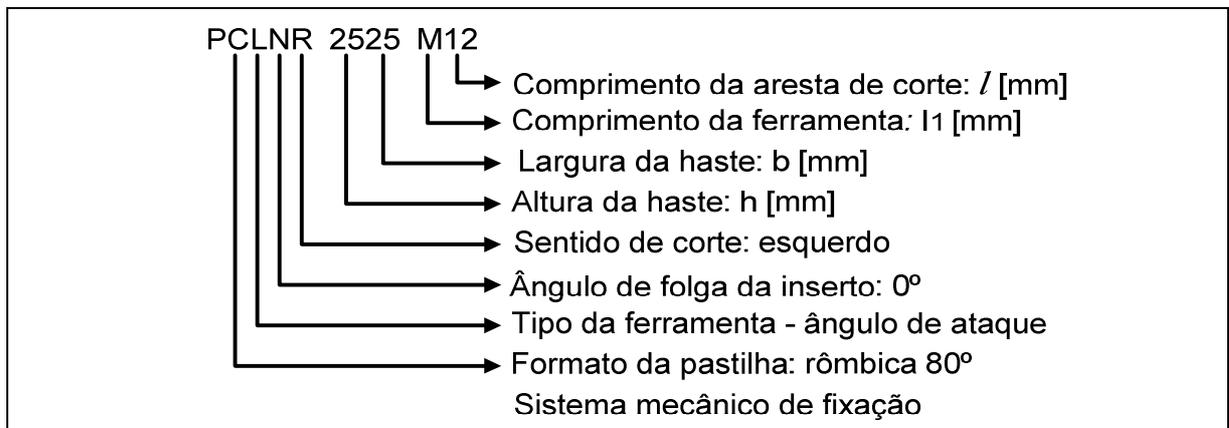
O porta-ferramentas utilizado é da marca Grand, possui haste quadrada Figura 40, código PCLNR 2525 M12, tendo os seguintes parâmetros:



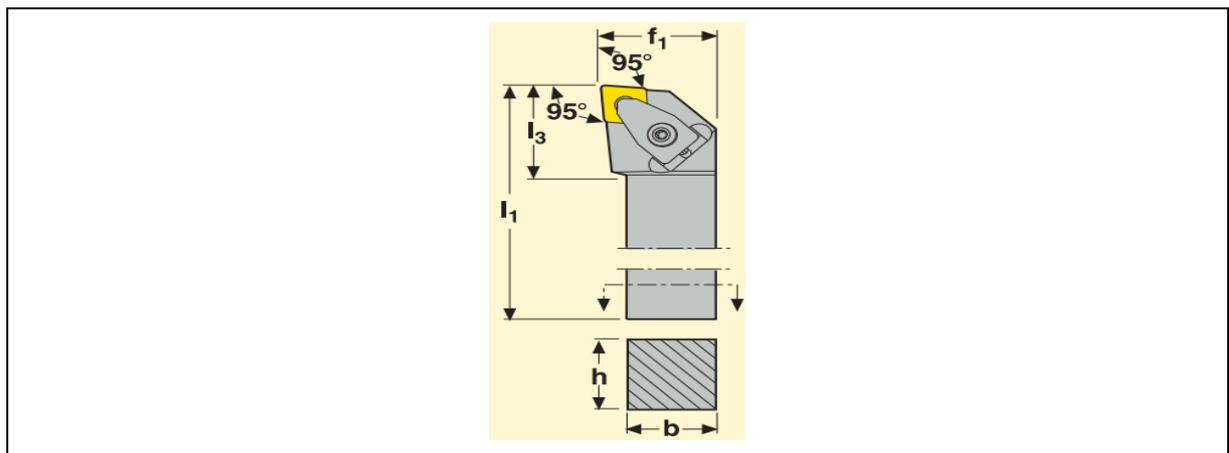
**Figura 40 – Porta-ferramentas contendo o inserto**

**Fonte: Autoria própria**

O código do porta-ferramentas é o seguinte:



A Figura 41 ilustra as nomenclaturas do porta-ferramentas, PCLNR 2525 M12 e as respectivas dimensões.



**Figura 41 - Porta-ferramenta de haste quadrada PCLNR 2525M 12**

Fonte: Grand (2005)

Neste trabalho foi utilizado um porta ferramenta com as seguintes dimensões:

$h$  – Altura do suporte [ $h = 25$  mm];

$b$  – Largura do suporte [ $b = 25$  mm];

$l_1$  – Comprimento total do suporte [ $l_1 = 150$  mm];

$l_3$  – Comprimento do cabeçote [ $l_3 = 32$  mm];

$f_1$  – Largura do cabeçote [ $f_1 = 30$  mm].

Ângulos do porta-ferramentas:

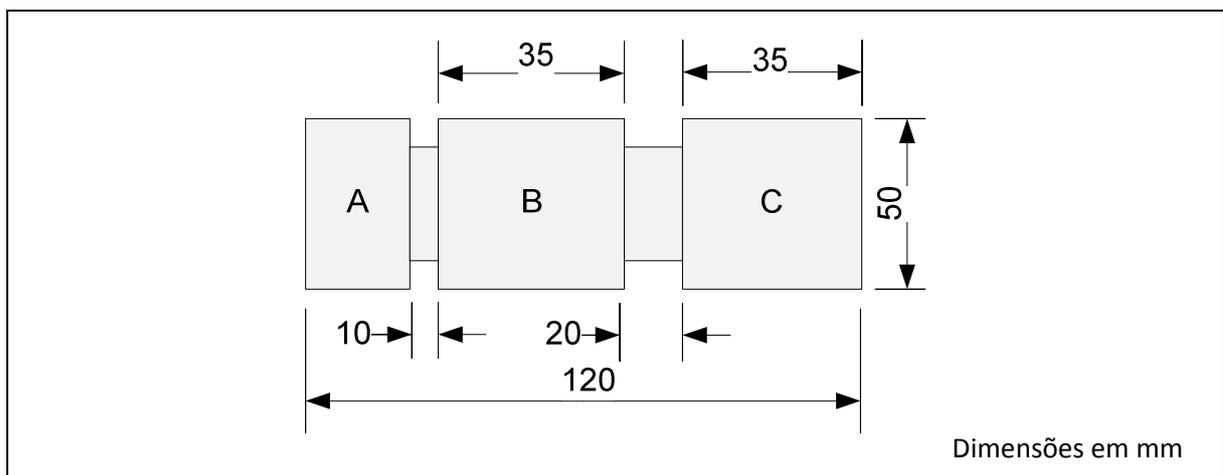
✓ Ângulo de inclinação =  $-6^\circ$ ;

- ✓ Ângulo de folga =  $0^\circ$ ;
- ✓ Ângulo da aresta principal de corte =  $95^\circ$ ;
- ✓ Ângulo de ponta =  $80^\circ$ ;
- ✓ Ângulo de inclinação de ponta =  $-7^\circ$ .

### 3.1.8 Corpo de prova

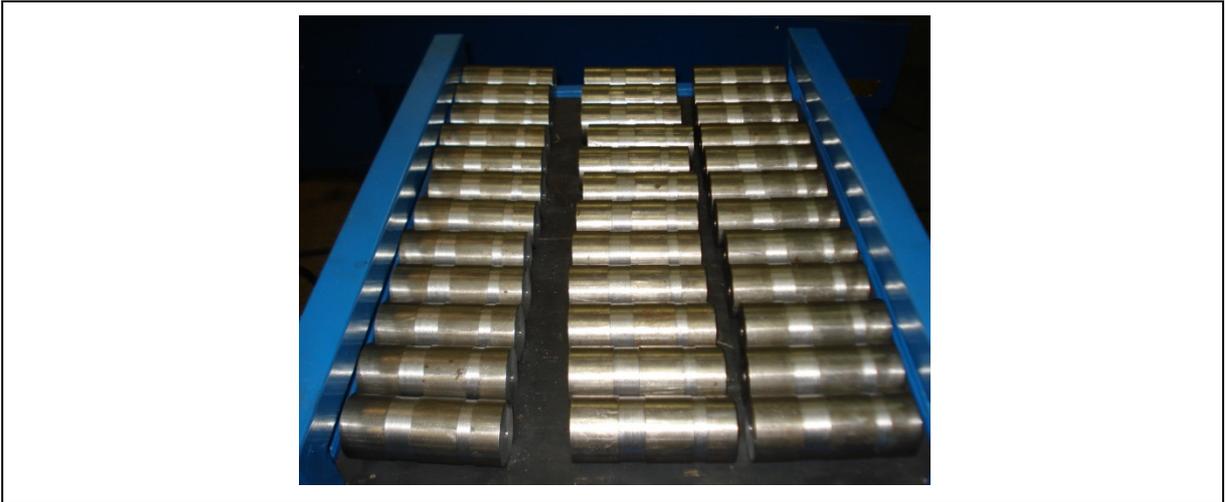
Os corpos de prova (Figuras 42a e 42b) utilizados nos ensaios foram confeccionados no Laboratório de Processos de Fabricação da UTFPR-CP em aço SAE 1045, composto por três colos; a saber: A, B e C. O colo A de comprimento 20 mm é destinado para a fixação na placa do torno; o colo B de comprimento 35 mm é a 2ª superfície de usinagem e o colo C de comprimento 35 mm é a 1ª superfície de usinagem.

Entre as regiões há dois espaços (canais de fuga para a ferramenta) os quais tem por objetivo de promover tempo para causar distúrbio da tensão elétrica que alimenta a máquina-ferramenta.



**Figura 42a – Representação esquemática do corpo de prova**

Fonte: Autoria própria



**Figura 42b - Corpos de prova usinados**

**Fonte: Aatoria própria**

### 3.1.9 Instrumentos de medições

Os instrumentos utilizados durante a execução dos ensaios experimentais de usinagem foram: medidor de temperatura/umidade e o rugosímetro, destinados a obter, respectivamente as grandezas reais de temperatura/umidade relativa do ar ambiente e rugosidade das peças usinadas.

#### 3.1.9.1 Medições de temperatura e umidade relativa do ar

Para a medição de temperatura e umidade relativa do ar do ambiente foi utilizado o instrumento termo-higro-anemômetro digital portátil, modelo THAR-185 da Instrutherm (Figura 43).



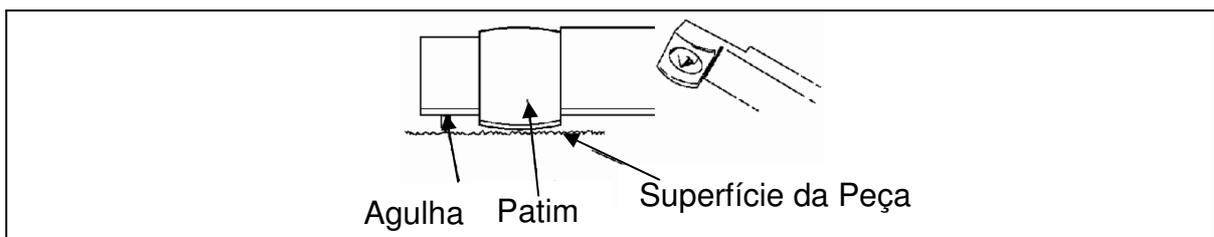
**Figura 43 - Termo-higro-anemômetro digital portátil**

Fonte: Instrutherm Instrumentos de Medição Ltda.(2009)

### 3.1.9.2 Medições de rugosidade

O dispositivo do fabricante Mitutoyo é um modelo de mão aplicável no local de produção, laboratório e oficina em fábrica o qual mede 19 parâmetros de rugosidade nas normas DIN, ISSO, ANSI e JIS com função de autocalibração. O instrumento é composto das seguintes partes:

Apalpador (*Pick-up*) – É um componente que desliza sobre a superfície que será verificada, levando os sinais da agulha apalpadora de diamante, até o amplificador. O patim, ilustrado na Figura 44, é um componente também chamado de guia que faz parte do apalpador.



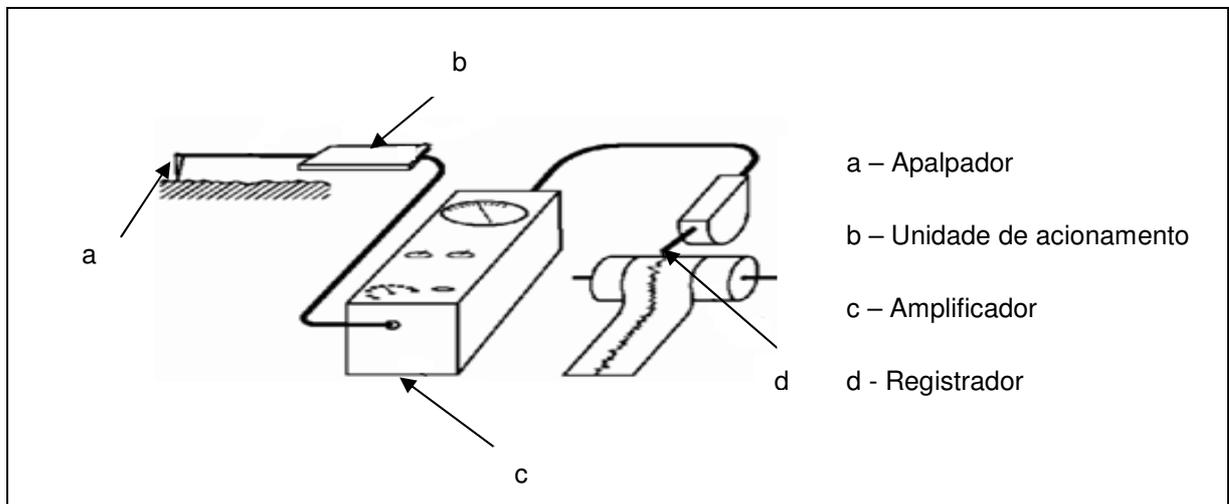
**Figura 44 - Ilustração do apalpador**

Fonte: Valeretto (2011)

Unidade de acionamento – Desloca o apalpador sobre a superfície, numa velocidade constante e por uma distância desejável, mantendo-o na mesma direção.

Amplificador – Contém a parte eletrônica principal, dotada de um indicador de leitura que recebe os sinais da agulha, amplificando e calculando em função do parâmetro selecionado.

Registrador – É um acessório do amplificador (em certos casos fica incorporado a ele) e fornece a reprodução, em papel, do corte efetivo da superfície (Figura 45).



**Figura 45 - Esquema de funcionamento de um rugosímetro**

**Fonte: Valeretto (2011)**

O instrumento de medição utilizado para a aferição da rugosidade dos corpos de prova usinados é um rugosímetro portátil da marca MITUTOYO, modelo SJ-201 o qual é ilustrado na Figura 46.



**Figura 46 – Rugosímetro modelo SJ201**

**Fonte: Mitutoyo (2005)**

### 3.1.10 Atividade experimental

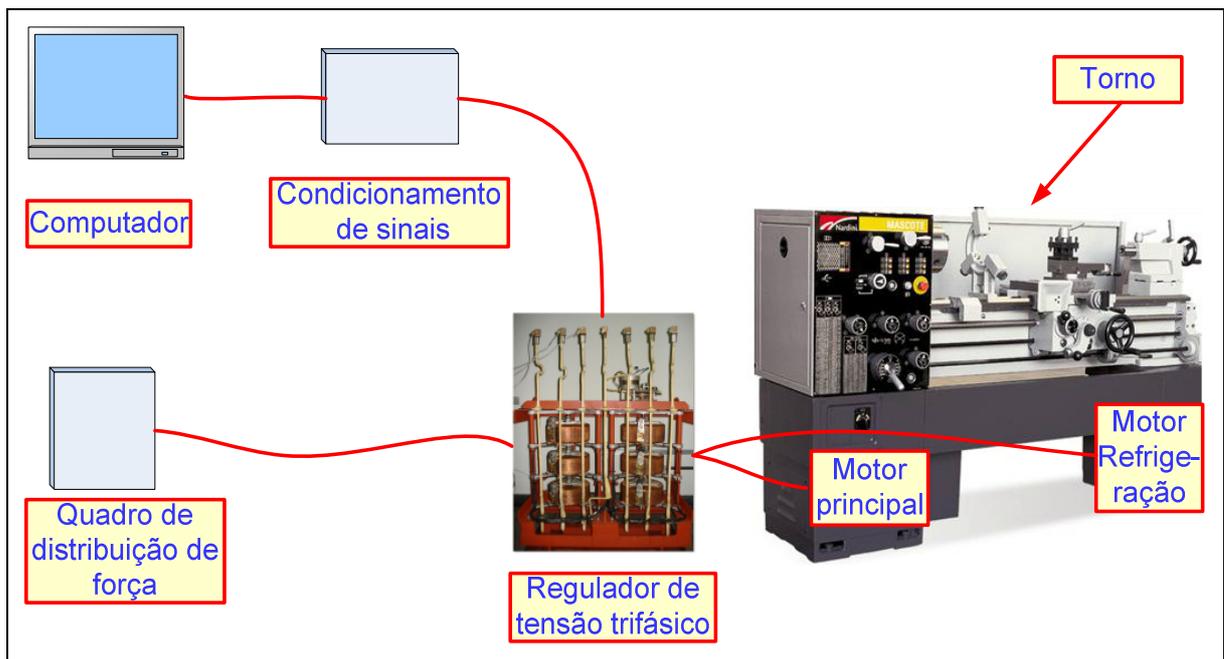
Os corpos de prova foram usinados no torno mecânico do Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP).

Foram usinados um total de 66 (sessenta e seis) corpos de prova idênticos, cada um deles contendo 2 (duas) superfícies cilíndricas para medição de rugosidade (colos B e C), totalizando 132 (cento e trinta e duas) amostras. As medições de rugosidade foram realizadas em 3 pontos ao longo do perímetro de cada colo, totalizando 396 (trezentos e noventa e seis) medições.

Para cada condição de velocidade de corte e de avanço empregada na usinagem, foi utilizada uma única aresta de corte do inserto.

### 3.1.10.1 Procedimentos de usinagem na condição de equilíbrio, de falta de fase e de subtensão

A Figura 47 ilustra a montagem dos equipamentos para os ensaios de usinagem para o torneamento de corpos de prova e aquisição de valores de tensão e corrente elétrica os quais alimentam os motores do torno: principal e refrigeração.



**Figura 47 – Representação esquemática do banco de ensaios para subtensão**

**Fonte: Autoria própria**

Os corpos de prova foram usinados segundo a ordem crescente enumerados do 1 ao 36.

Cada corpo de prova apresenta duas superfícies usinadas (1 e 2), sendo que, no 1º corpo de prova a 1ª superfície para condição de tensão equilibrada e a 2ª superfície para condição de falta de fase. No 2º corpo de prova, a 1ª superfície foi para a condição de desequilíbrio de tensão de  $-1\%$  e a 2ª superfície para a condição de desequilíbrio de tensão de  $-2\%$ , assim sucessivamente até o desequilíbrio de  $-10\%$ , totalizando 36 corpos de provas (do nº 1 a nº 36). O avanço da ferramenta de corte foi contínuo e sem interrupção para cada condição de desequilíbrio de tensão, ou seja, as condições de alimentação foram causadas antes do início da 1ª

superfície e para a 2ª superfície o desequilíbrio foi provocado exatamente no canal de fuga existente entre a 1ª e 2ª superfície de cada corpo de prova.

Para a velocidade de corte de 398,982 m/min (2500 rpm), foram utilizados os seguintes avanços: 0,074; 0,150 e 0,251 mm/volta, totalizando 18 corpos de prova e 36 superfícies usinadas.

Para a velocidade de corte de 199,500 m/min. (1250 rpm), foram utilizados os seguintes avanços: 0,074; 0,150 e 0,251 mm/volta, totalizando 18 corpos de provas e 36 superfícies usinadas.

Portanto, para as condições equilibradas, de falta de fase e de subtensão de alimentação do motor principal do torno, foi utilizado um total de 36 corpos de prova, totalizando 72 superfícies usinadas.

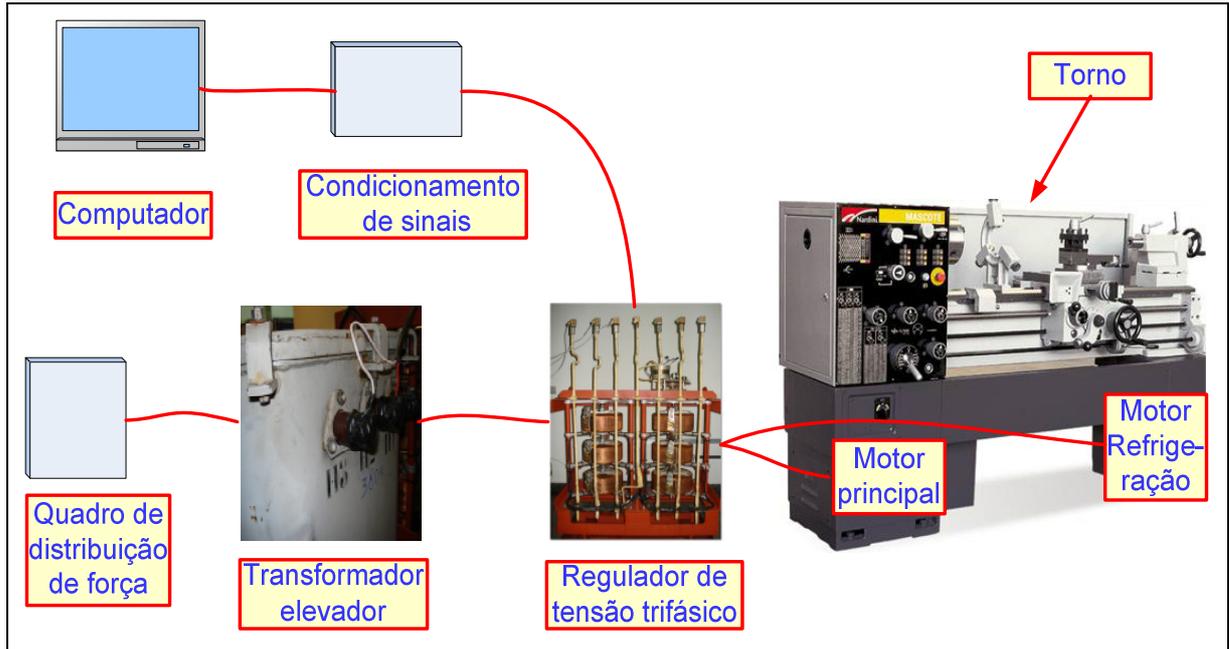
#### 3.1.10.2 Procedimentos de usinagem na condição de sobretensão

A Figura 48 ilustra a montagem dos equipamentos para os ensaios de usinagem para o torneamento de corpos de provas. A 1ª superfície foi usinada para a condição de desequilíbrio de tensão de +1% e a 2ª superfície para a condição de desequilíbrio de tensão de +2% e assim sucessivamente até o desequilíbrio de +10%.

Para a velocidade de corte de 398,982 m/min. (2500 rpm), foram utilizados os seguintes avanços: 0,074; 0,150 e 0,251 mm/volta, totalizando 15 corpos de prova e 30 superfícies usinadas.

Para a velocidade de corte de 199,500 m/min. (1250 rpm), foram utilizados os seguintes avanços: 0,074; 0,150 e 0,251 mm/volta, totalizando 15 corpos de provas e 30 superfícies usinadas.

Portanto, para as condições de sobretensão de alimentação do motor principal do torno foram utilizados um total de 30 corpos de prova, com 60 superfícies usinadas.



**Figura 48 - Representação esquemática do banco de ensaios para sobretensão**

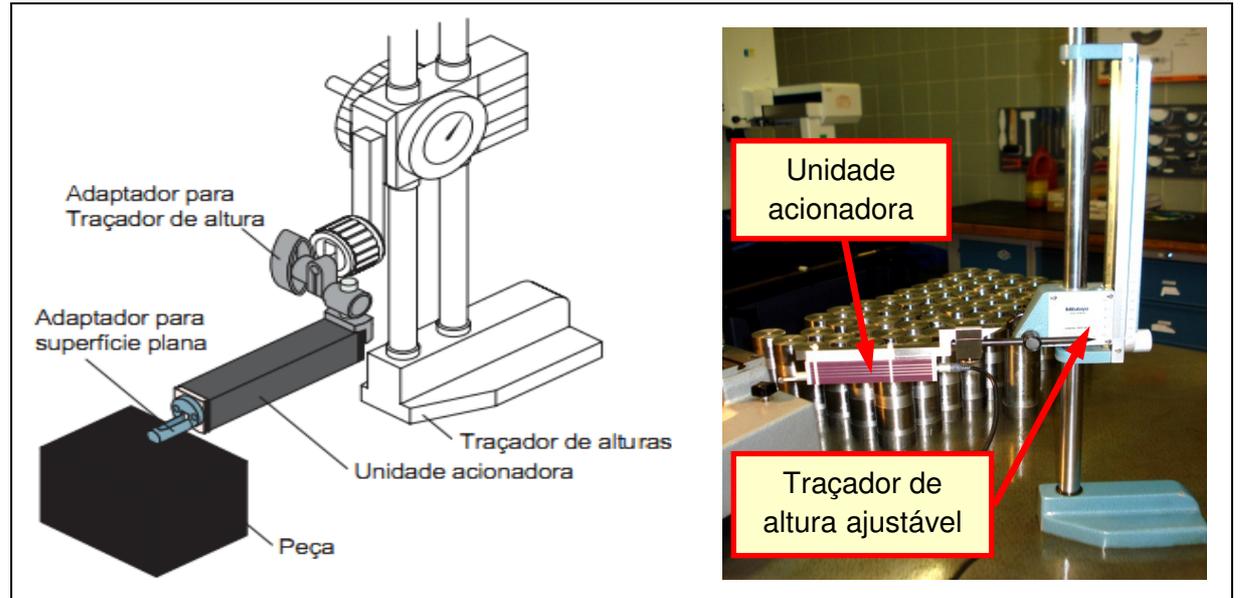
**Fonte: Autoria própria**

Após a usinagem, os corpos de prova foram revestidos com vaselina a fim de evitar a oxidação. Posteriormente, foram acondicionados e encaminhados ao Laboratório de Metrologia da Instituição para as aferições de rugosidade.

### 3.1.11 Procedimento de calibração do rugosímetro e medições

Os corpos de prova usinados e o rugosímetro foram mantidos no interior do Laboratório de Metrologia da UTFPR-CP, por um período de 24 horas antes do início das medições para aclimatação. A temperatura ambiente foi mantida constante em 25° C e a umidade relativa do ar (UR) foi de 67%.

A unidade acionadora do rugosímetro foi afixada a um traçador de altura (altura ajustável) visando garantir o seu posicionamento quanto ao paralelismo em relação à superfície a ser medida do corpo de prova (Figuras 49a e 49b).



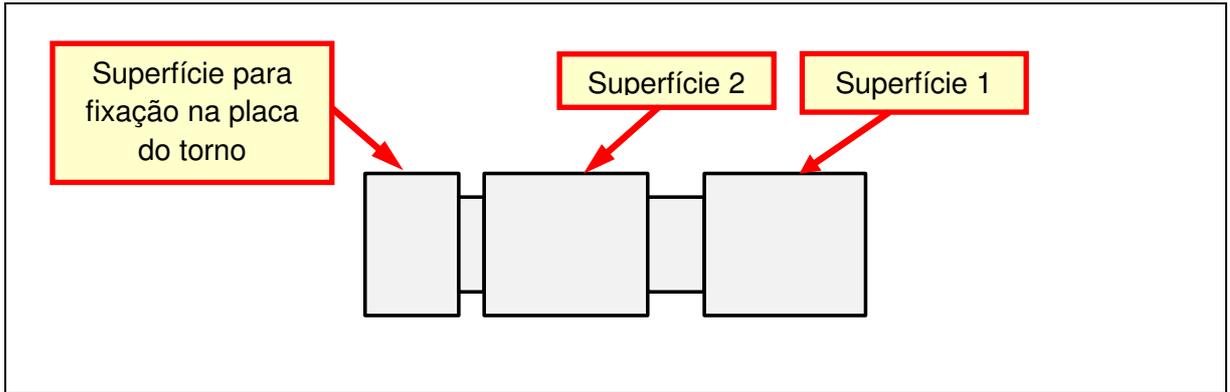
**Figura 49a – Representação esquemática da fixação da unidade acionadora**  
**Fonte: Mitutoyo (2005)**

**Figura 49b - Fixação da unidade acionadora ao traçador de altura**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3.1.12 Procedimento de aferição da rugosidade

Inicialmente, cada corpo de prova usinado foi fixado entre pontas em uma estrutura apoiada e nivelada sobre um despenpeno. A seguir, e o sensor do rugosímetro, acoplado à unidade acionadora, fixado ao traçador de altura, visando garantir as condições corretas de operação do aparelho: alinhamento longitudinal do sensor com o corpo de prova, ângulo de  $90^\circ$  do sensor do rugosímetro em relação à superfície a ser medida, distância do sensor à peça e paralelismo entre o corpo de prova e a unidade acionadora (Figuras 49a e 49b).

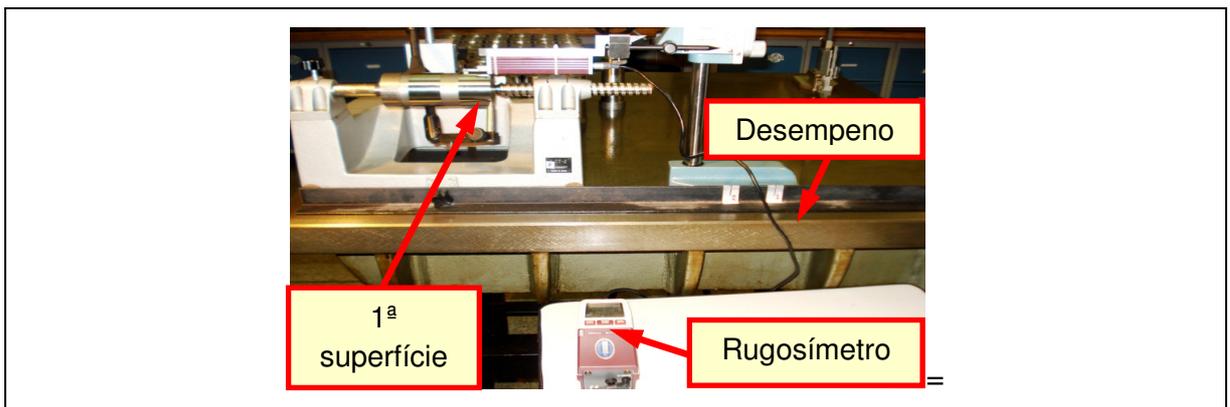
A Figura 50 mostra esquematicamente os pontos longitudinais de medição das rugosidades das superfícies 1 e 2 dos corpos de prova.



**Figura 50 – Leitura de rugosidade no ponto médio das superfícies 1 e 2 do corpo de prova usinado**

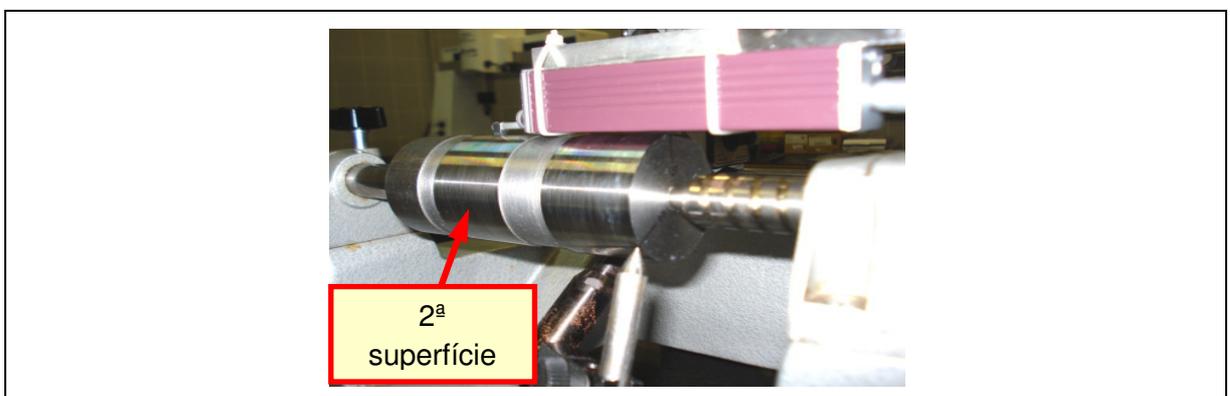
**Fonte: Autoria própria**

As Figuras 51 e 52 ilustram as medições sendo feitas, respectivamente, nas superfícies 1 e 2 do corpo de prova.



**Figura 51 - Medição da rugosidade da 1ª superfície do corpo de prova**

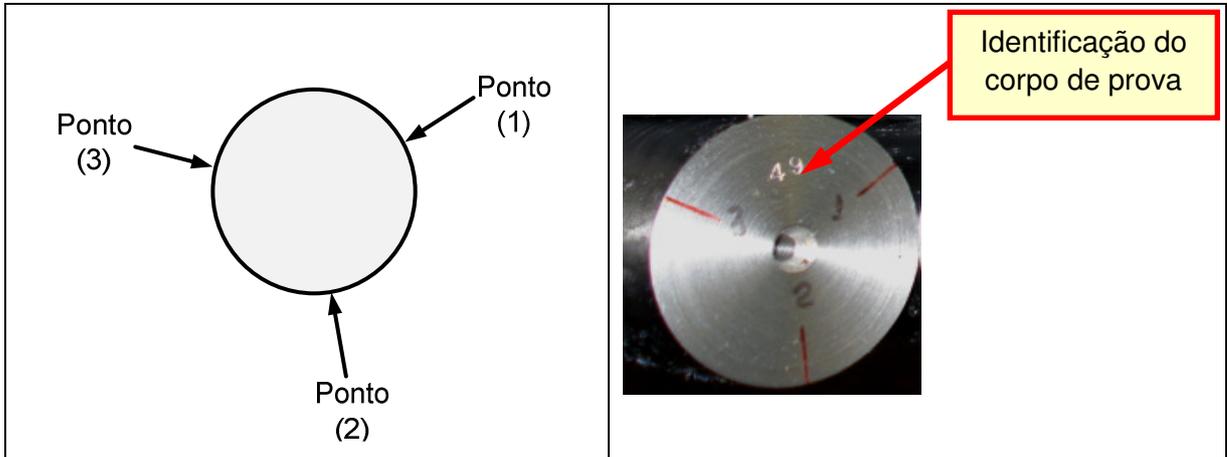
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 52 - Medição da rugosidade da 2ª superfície do corpo de prova**

**Fonte: Autoria própria**

As medições foram realizadas sempre em três pontos (1, 2 e 3) ao longo do perímetro da superfície circular do corpo de prova, espaçados de  $120^\circ$ , conforme ilustrado nas Figuras 53a e 53b.



**Figura 53a - Pontos de medições de rugosidade ao longo perímetro circular do corpo de prova**

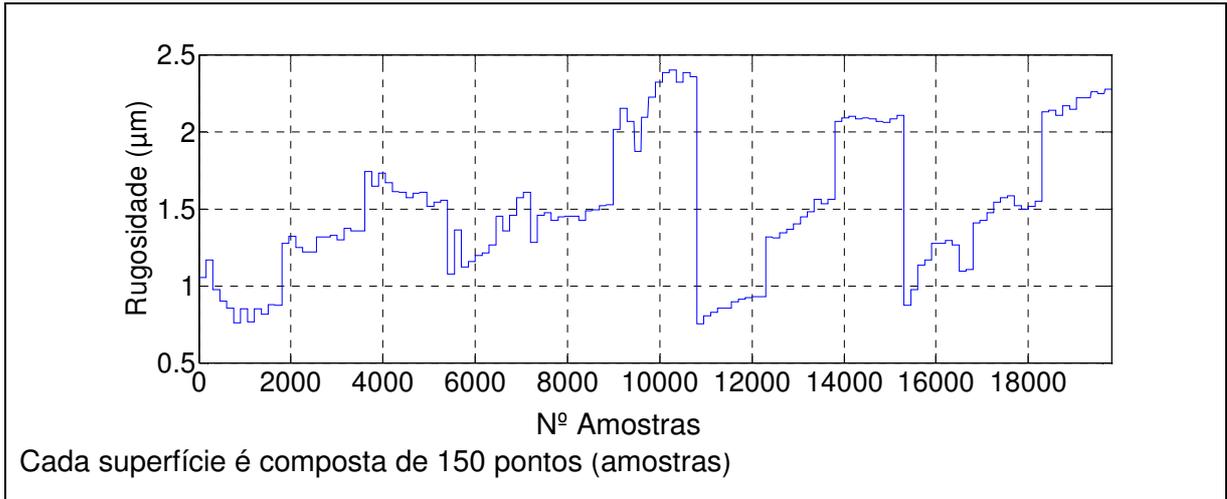
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 53b - Pontos de medições 1, 2 e 3**

**Fonte: Autoria própria**

Após as medições foi obtida a média aritmética dos 3 valores de rugosidade medidos para cada superfície. Todos os valores de rugosidade obtidos em cada medição encontram-se nos Quadros B.1 a B.4 do Apêndice B.

De posse de todas as medições de rugosidade, todos os valores médios de rugosidade obtidos foram importados para o ambiente *Matlab/Simulink*, ilustrado no gráfico da Figura 54, os quais compõem o vetor de dados da saída para o treinamento da Rede Neural Artificial.



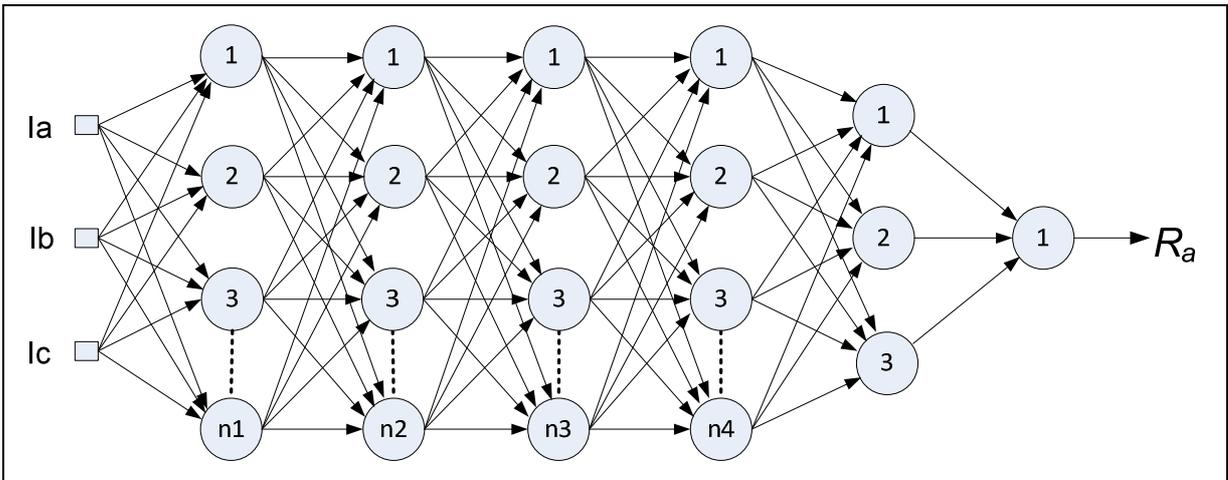
**Figura 54 – Valores médios de rugosidade das superfícies usinadas**

**Fonte: Autoria própria**

### 3.1.13 Configuração da rede neural artificial

A rede utilizada é a *Perceptron* multicamadas e os parâmetros de entrada são as correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  que foram avaliados por uma estrutura com seis camadas. Sendo 3 entradas e nas camadas escondidas, 5 neurônios na 1ª camada escondida, 10 neurônios na 2ª camada escondida, 17 neurônios na 3ª camada escondida, 12 neurônios na 4ª camada escondida, 3 neurônios da 5ª camada escondida e 1 neurônio na camada de saída ( $R_a$ ) durante 4.000 épocas.

A Figura 55 ilustra a configuração da rede neural artificial utilizada neste trabalho.



**Figura 55 - Configuração da RNA utilizada**

**Fonte: Autoria própria**

onde:

- $la, lb$  e  $lc$  – camada de entrada;
- $n_1$  – 1ª camada escondida com 5 neurônios;
- $n_2$  – 2ª camada escondida com 10 neurônios;
- $n_3$  – 3ª camada escondida com 17 neurônios;
- $n_4$  – 4ª camada escondida com 12 neurônios;
- $n_5$  – 5ª camada escondida com 3 neurônios;
- $n_6$  – 6ª camada saída com 1 neurônio.

A função de ativação da rede neural artificial para as camadas escondidas foi a função tangente hiperbólica e para a camada de saída, a função linear ou identidade. Estas funções são utilizadas como aproximadoras universais de funções, visando mapear o comportamento entre as variáveis de entrada e saída de processos.

A estrutura neural com apenas 5 neurônios na camada escondida, apresentou uma resposta com alguns pontos de teste com elevado erro. Para uma outra estrutura com duas camadas escondidas, sendo de 5 neurônios na primeira camada escondida e de 7 neurônios na segunda camada escondida, a estimação apresentou melhor resposta. Após alguns testes implementando maior número de camadas escondida e de neurônios, chegou-se à estrutura apresentada na Figura 55.

O processo de validação cruzada por amostragem aleatória (*random subsampling cross-validation*) é um atrativo particularmente para uma rede neural grande com o objetivo de obter boa generalização. A validação cruzada foi utilizada neste trabalho para determinar a *Perceptron* de múltiplas camadas com o melhor número de neurônios nas camadas escondidas. O conjunto total de dados apresentados à rede neural foram 19800 pontos e aleatoriamente dividido em duas partes, isto é, subconjunto de treinamento composto de 1320 pontos e subconjunto de teste (validação) composto de 18480 pontos.

O tamanho dos vetores por corpo de prova são:

- Nº 47 a 51 com vetor de 100000 pontos;
- Nº 14 a 18, de 31 a 36 e de 43 a 46 com vetor de 150000 pontos;
- Nº 37 a 42 e de 57 a 66 com vetor de 200000 pontos;
- Nº 1 a 13 e 19 e de 26 a 30 com vetor de 250000 pontos;
- Nº 20 a 25 com vetor de 300000 pontos;
- Nº 52 a 56 com vetor de 350000 pontos.

### 3.1.13.1 Processo de aprendizagem

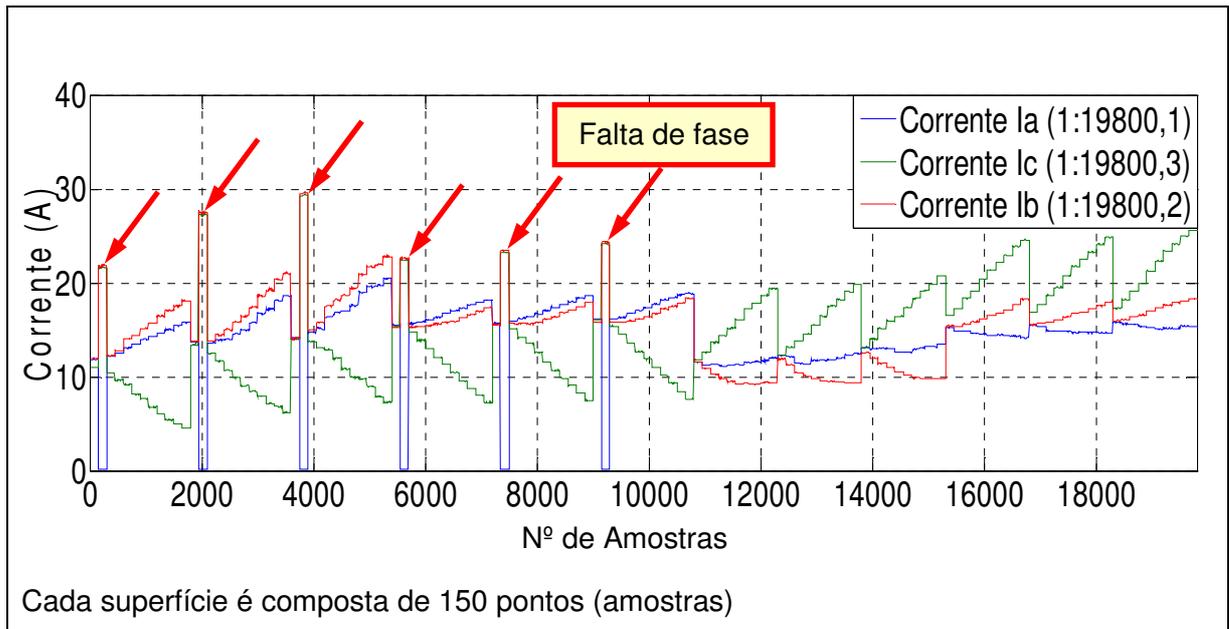
Consiste no processo pelo qual os pesos sinápticos das conexões entre os neurônios das diversas camadas são adaptados por meio de estímulos pelo ambiente no qual a rede está inserida, de modo a estabelecer a relação entre entrada e saída.

Na aprendizagem foi utilizado o algoritmo *Backpropagation* que utiliza pares de entradas e saídas desejadas para ajustar os pesos da rede por um mecanismo de correção de erros.

Foram considerados 150 pontos para cada uma das 132 curvas, totalizando 19800 pontos para todas as condições previstas para os corpos de prova. Considerou-se 140 pontos por curva para validação e 10 pontos para treinamento, totalizando 1320 pontos para treinamento e 18480 pontos para validação, que foram

utilizados para a correção dos pesos das conexões da RNA, visando alcançar os valores de rugosidade desejados para a saída.

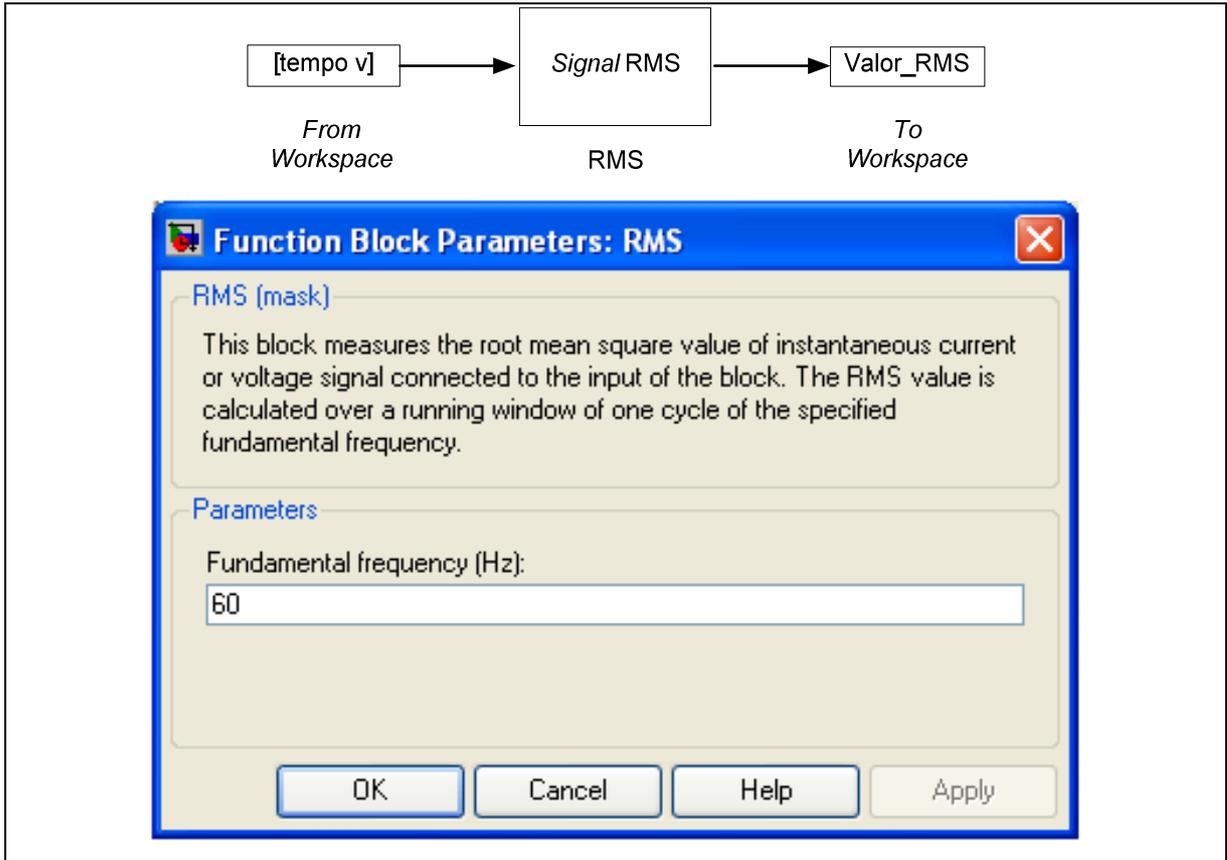
A Figura 56 ilustra o agrupamento dos parâmetros de correntes adquiridos após o cálculo do valor eficaz para todas as condições de usinagem. As setas na figura indicam os instantes onde a falta de fase foi simulada no sistema.



**Figura 56 – Valores eficazes (RMS) da corrente**

**Fonte: Autoria própria**

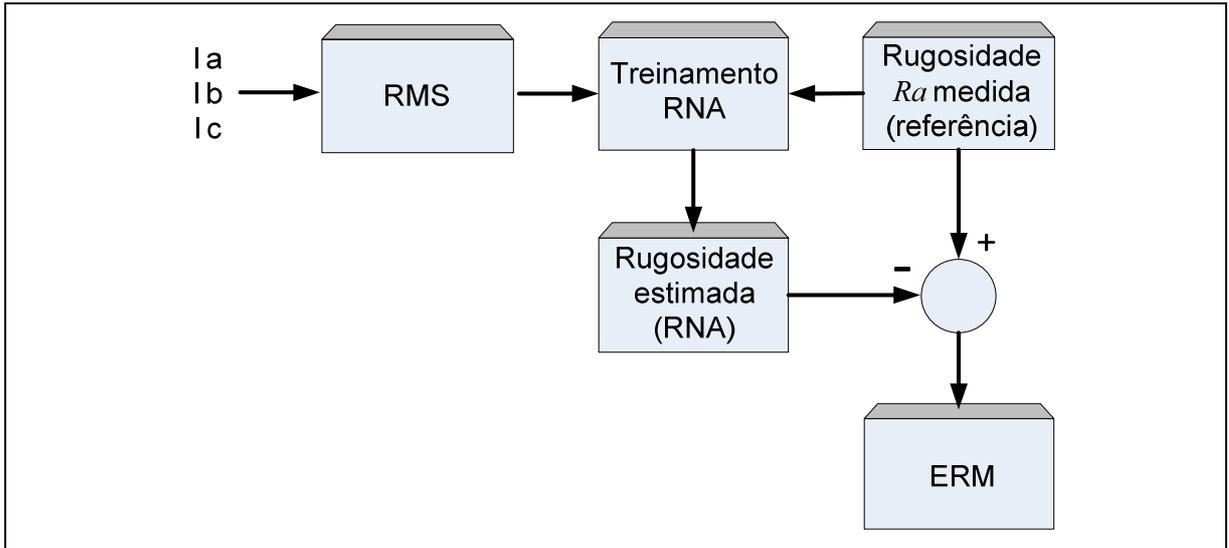
A Figura 57 ilustra a estrutura do conversor RMS com parâmetro da frequência fundamental de 60 Hz.



**Figura 57 - Estrutura do conversor RMS**

Fonte: Autoria própria

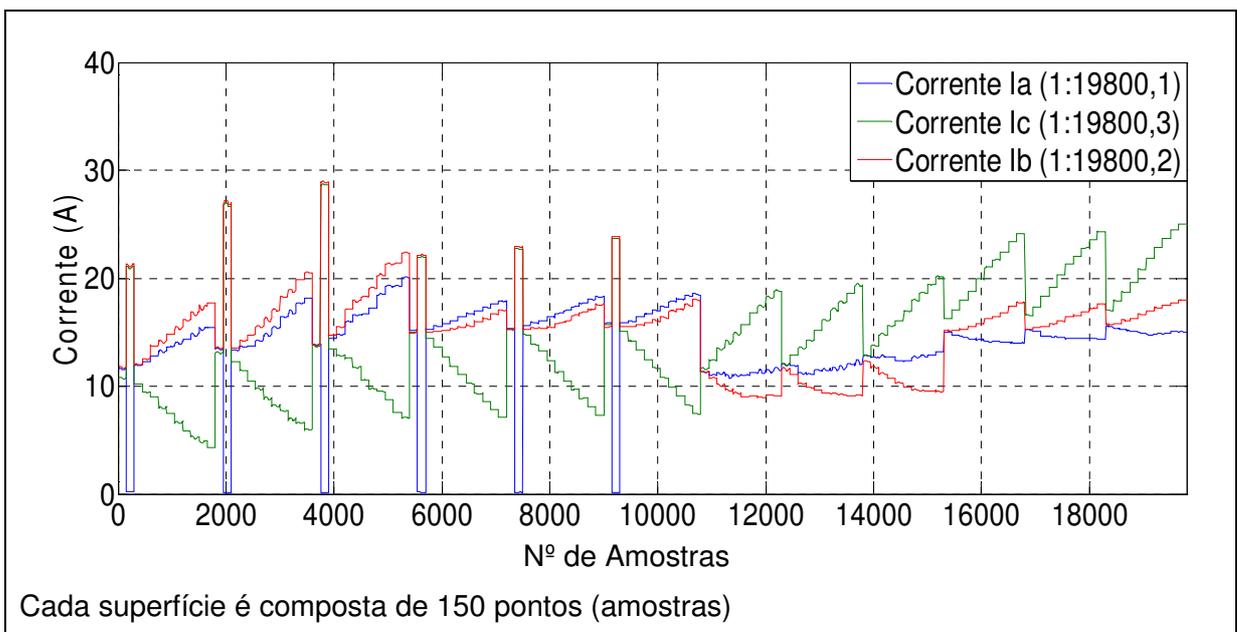
Neste trabalho, a metodologia utilizada para treinamento e validação é ilustrada no diagrama de blocos da Figura 58. Os dados de entrada da RNA PMC são os valores eficazes da corrente de linha da alimentação dos motores (principal e de refrigeração) da máquina-ferramenta, oriundo do bloco RMS com o parâmetro de frequência fundamental igual a 60 Hz. A saída da RNA é a rugosidade estimada, a qual comparada com a rugosidade de referência gera um sinal de erro. A aplicação sucessiva das fases *forward* e *backward* implica na gradativa diminuição dos erros produzidos pelas respostas da rede frente àquelas desejadas.



**Figura 58 - Estrutura treinamento da RNA**

Fonte: Autoria própria

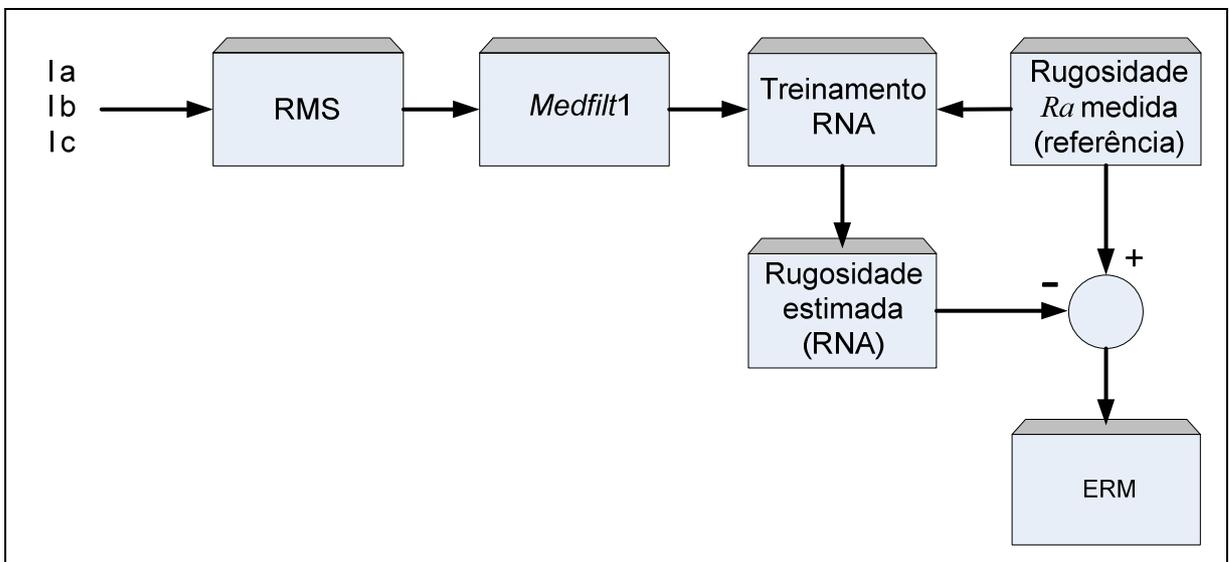
A Figura 59 ilustra o agrupamento dos valores de correntes adquiridas após o cálculo do valor eficaz. Considerando o ruído do sinal amostrado aplica-se, ao vetor de dados da entrada, um filtro linear nos valores eficazes de corrente (Função *Medfilt1* do *Matlab*, ordem 400) para todas as condições de usinagem.



**Figura 59 – Valores eficazes (RMS) da corrente com filtro mediano de ordem 400**

Fonte: Autoria própria

A metodologia de rede neural utilizada neste trabalho para treinamento e validação é ilustrada no diagrama de blocos da Figura 60. A taxa de amostragem utilizada nos ensaios foi de 625 pontos por segundo, obtiveram-se assim os sinais das correntes eficazes com ruído. Para atenuar tais ruídos, aplicou-se filtro mediano e os sinais filtrados foram utilizados para as entradas da rede neural. A saída da RNA é a rugosidade estimada, que comparado com a rugosidade de referência gera um sinal de erro. A aplicação sucessiva das fases *forward* e *backward* implica na gradativa diminuição dos erros produzidos pelas respostas da rede frente a aquelas desejadas.



**Figura 60 - Estrutura treinamento da RNA**

**Fonte: Autoria própria**

No final da usinagem da 2ª superfície do corpo de prova o de nº 56 a máquina desligou, provavelmente motivado pela condição de desequilíbrio de 10% (sobretensão) imposta e também devido a menor velocidade de corte ( $V_c = 199,500$  m/min) e menor avanço ( $f = 0,074$  mm/volta).

Na etapa de treinamento e validação foram apresentadas à Rede Neural Artificial (RNA) todas as condições previstas no experimento, ou seja, 132 amostras totalizando 19800 pontos, sendo 150 (cento e cinquenta) pontos por amostra, dos quais foram utilizados 10 para treinamento e 140 para validação da RNA.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes ao comportamento da RNA como preditor de rugosidade com o respectivo Erro Relativo Médio (ERM) resultante para cada condição de ensaio empregada. Ainda, apresentam-se os valores de rugosidade obtidos para cada situação de desequilíbrio provocada na tensão de alimentação do motor de acionamento da máquina-ferramenta.

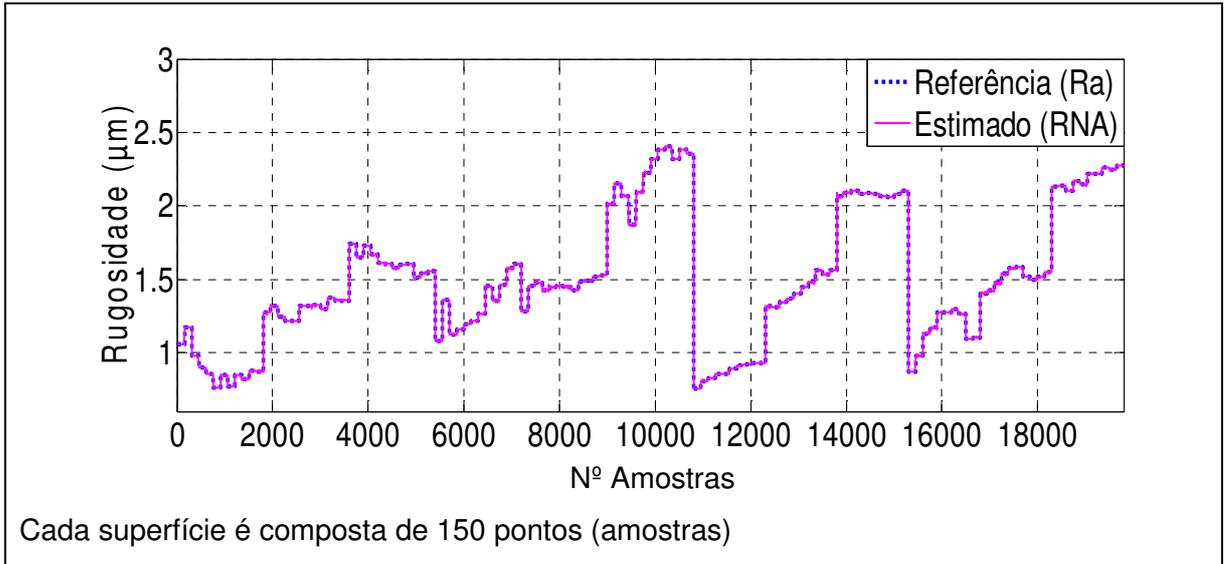
Os ensaios realizados foram divididos em 12 condições, as quais consideram separadamente o conjunto das situações de desequilíbrio da tensão da rede elétrica de alimentação da máquina-ferramenta e os parâmetros de usinagem empregados. Estas 12 condições encontram-se detalhadas no Apêndice B.

### 4.1 RESULTADO DE GENERALIZAÇÃO DA RNA PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIOS

Os resultados apresentados a seguir consideram todas as condições de desequilíbrio da tensão de alimentação da máquina-ferramenta, em conjunto com todas as condições de usinagem que foram empregadas.

Para a obtenção destes resultados inicialmente utilizou-se o filtro mediano de ordem 2000, no sinal de corrente amostrado a uma taxa de 5000 amostras/segundo.

Assim, a Figura 61 a seguir ilustra os resultados de generalização da RNA para todas as 12 condições de ensaio empregadas utilizando o filtro mediano de ordem 2000.

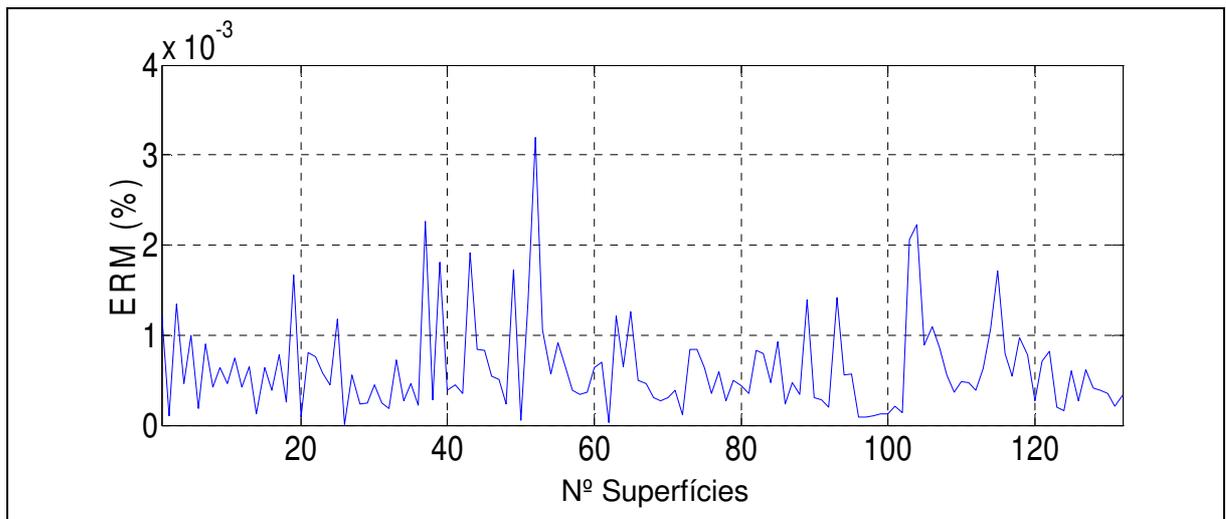


**Figura 61 - Treinamento da RNA com filtro mediano de ordem 2000**

Fonte: Autoria própria

Observa-se pela Figura 61 que a RNA apresenta resultados compatíveis; ou seja, com erros reduzidos entre os valores de referência e os valores estimados, para todas as amostras.

A Figura 62 apresenta os erros relativos médios (ERM) obtidos à partir da generalização da RNA para todas as 12 condições de ensaios empregadas, utilizando o filtro mediano de ordem 2000. Nota-se nesta figura que o erro ERM máximo foi de 0,003195%.

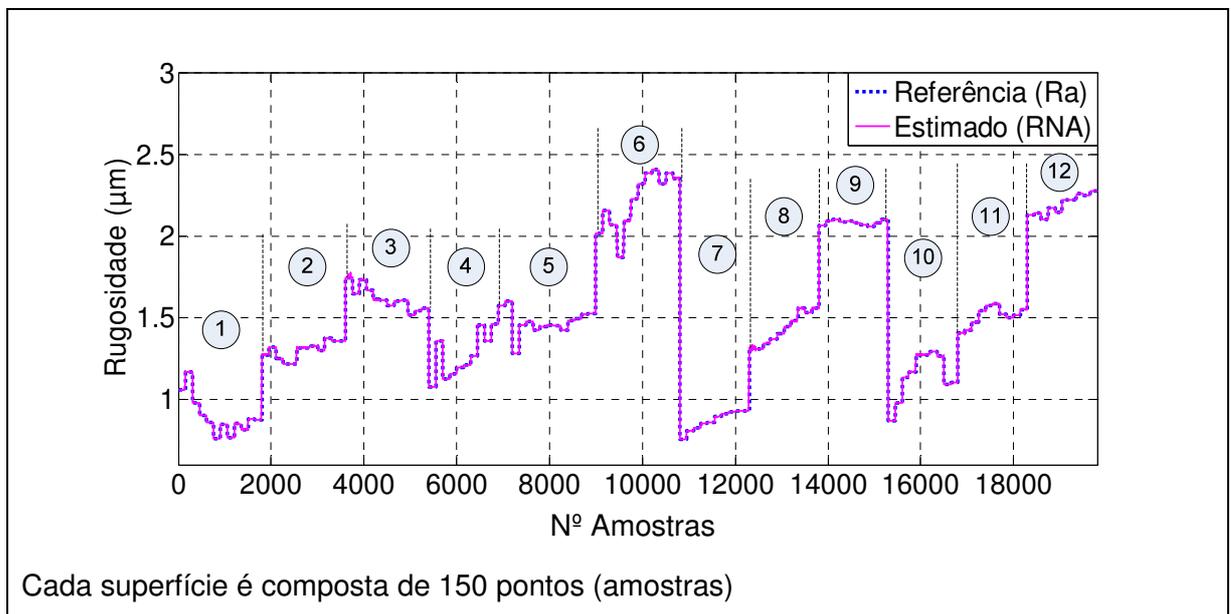


**Figura 62 – Erro relativo médio utilizando o filtro mediano de ordem 2000**

Fonte: Autoria própria

Devido ao grande esforço computacional requerido para o processamento dos dados adquiridos utilizando-se o filtro mediano de ordem 2000, apresenta-se a seguir, nas Figuras 63 e 64, o resultado de generalização da RNA obtido à partir de uma proposta. Tal metodologia consiste no uso de um filtro mediano de ordem 400 no sinal de corrente com taxa de amostragem 8 vezes menor do que considerada anteriormente; ou seja, utiliza uma taxa de amostragem de 625 amostras/segundo.

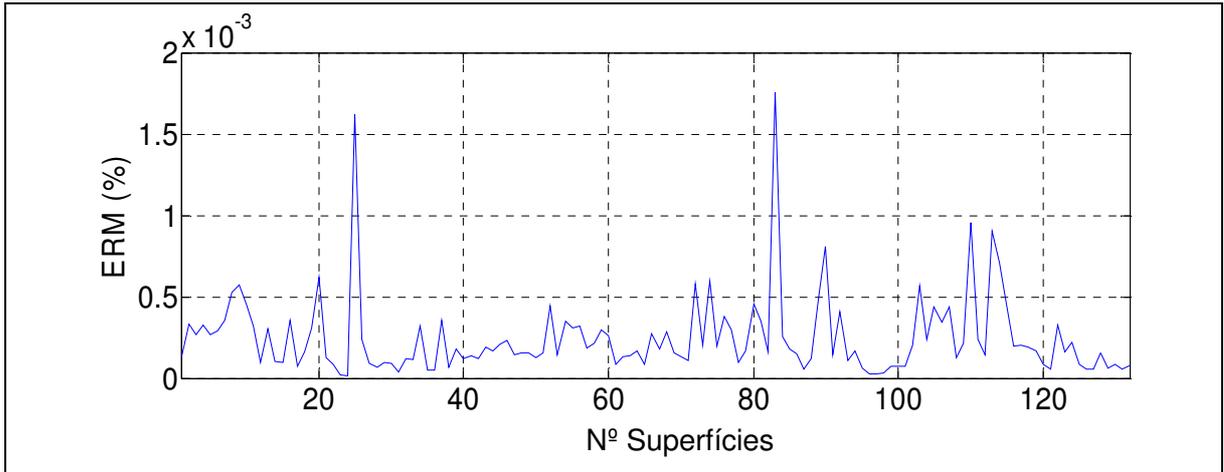
A Figura 63 ilustra o resultado de generalização da RNA utilizando o filtro mediano de ordem 400 para todas as 12 condições de ensaio empregadas.



**Figura 63 – Treinamento da RNA com filtro mediano de ordem 400**

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 63 ilustra o resultado de treinamento utilizando um filtro mediano de ordem 400, a qual se observou uma redução da amplitude de erros comparada à Figura 62 com filtro mediano de ordem 2000. Na Figura 64 são apresentados os erros de generalização utilizando o filtro mediano de ordem 400 para todas as 12 condições de ensaios.



**Figura 64 – Erro relativo médio com o filtro mediano de ordem 400**

**Fonte: Autoria própria**

Neste caso o erro máximo foi de 0,001754%, o qual é ainda menor do que o erro máximo obtido na Figura 62 (a qual refere-se ao uso do filtro mediano de ordem 2000), que foi de 0,003195%. Assim, com menos dados amostrados por unidade de tempo e um filtro mediano de menor ordem, obteve-se erros de generalização menores quando comparado ao caso anterior.

#### 4.2 RESULTADO DE GENERALIZAÇÃO DA RNA PARA CADA CONDIÇÃO DE ENSAIO

A seguir são apresentados os resultados de generalização da RNA proposta para cada condição de ensaio utilizada neste trabalho. Todos os resultados foram obtidos com o emprego do filtro mediano de ordem 400. Nos gráficos os valores de rugosidade que foram medidos nos corpos de prova usinados são denominados “Referência ( $R_a$ )” e os valores estimados pela RNA proposta são denominados “Estimado (RNA)”.

Nas condições de ensaios de 1 a 6, foram empregadas 3 situações de desequilíbrio da tensão de alimentação da máquina-ferramenta a saber:

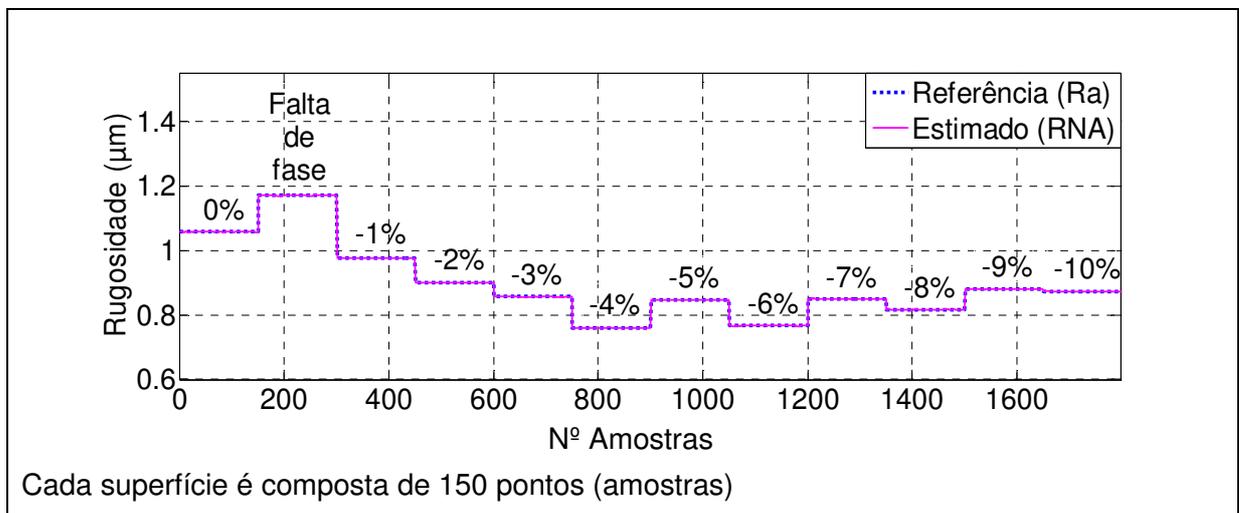
- alimentação normal, isto é, sem desequilíbrio de tensão;
- subtensão, no intervalo de -1% a -10%, com variações de 1%;
- condição de falta de fase.

Nas condições de ensaios de 7 a 12, utilizou-se apenas situações de sobretensão, no intervalo de +1% a +10%, com variações de 1%.

#### 4.2.1 Resultados de generalização da RNA para a 1ª condição de ensaios

As Figuras 65a e 65b ilustram, respectivamente, os resultados de generalização da RNA proposta e o erro relativo médio resultante para a 1ª condição de ensaios.

Observa-se pela Figura 65a que a rugosidade estimada pela RNA apresentou resultado compatível com as rugosidades medidas para todas as condições de alimentação da máquina-ferramenta. A maior rugosidade foi observada na condição de falta de fase, cujo valor é de 1,17  $\mu\text{m}$ , e a menor rugosidade foi de 0,76  $\mu\text{m}$ , verificada na condição de subtensão de -4%.

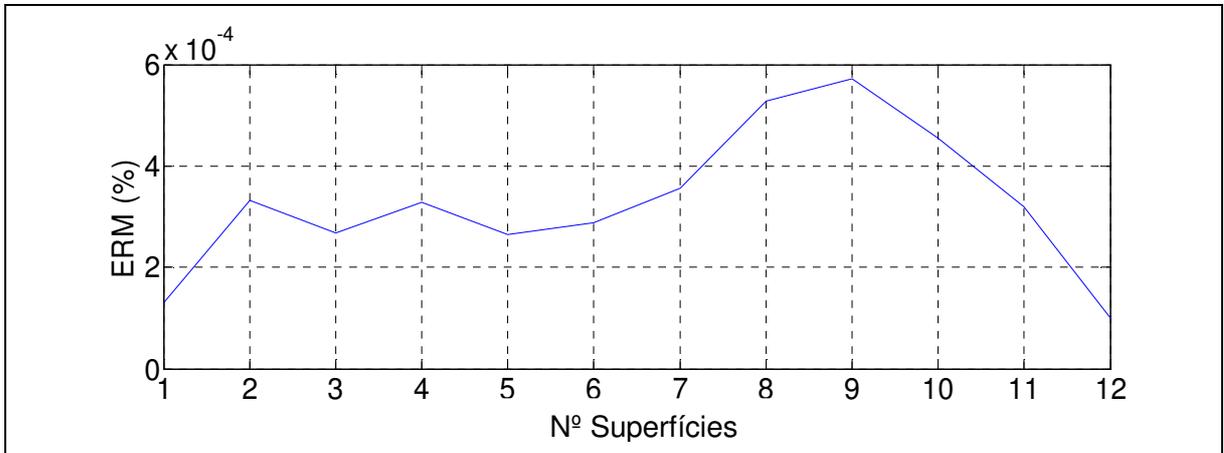


**Figura 65a – Resultado de treinamento RNA para a 1ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Figura 65b, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA para a 1ª condição de ensaios foi de 0,0005715%. Este resultado é pequeno, comparado a faixa de valores serem

alcançados para o processo de torneamento que está situado entre 0,2 à 6,3  $\mu\text{m}$  (conforme o Quadro 5).

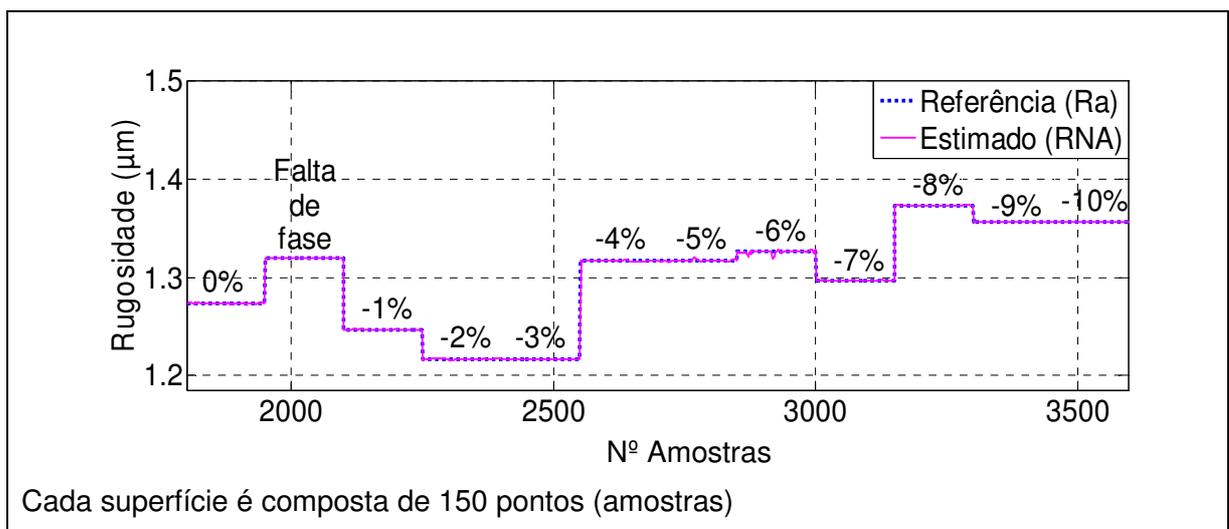


**Figura 65b – Resultado do ERM para a 1ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Resultados de generalização da RNA para a 2ª condição de ensaios

Os resultados da generalização da RNA proposta e o ERM obtido para a 2ª condição de ensaios são apresentados, respectivamente, nas Figuras 66a e 66b.

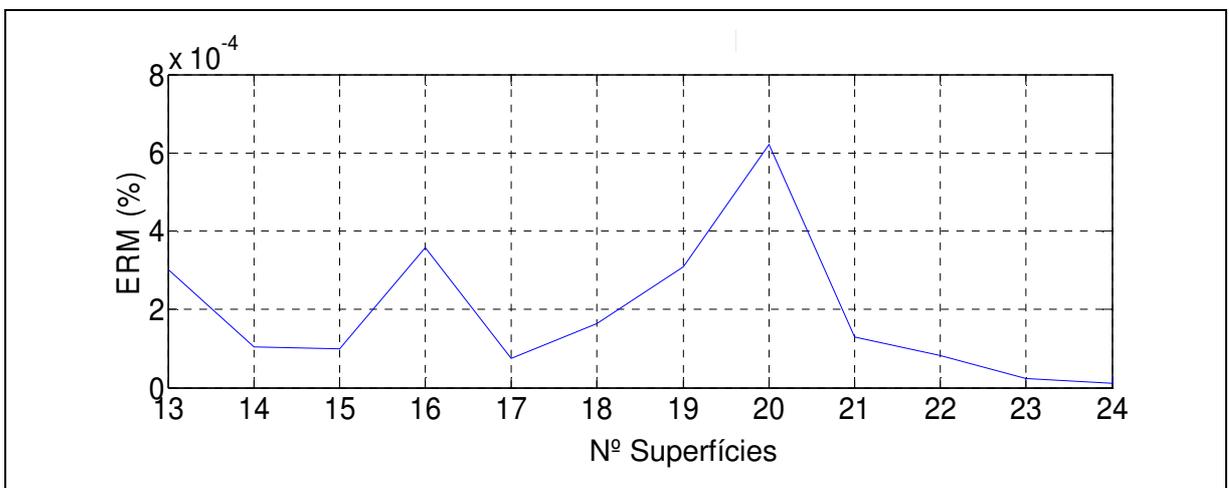


**Figura 66a – Resultado de treinamento RNA para a 2ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

Fonte: Autoria própria

Observa-se pela Figura 66a que a rugosidade estimada pela RNA apresentou compatibilidade com os valores de referência para todas as situações de alimentação da máquina-ferramenta. Na condição de subtensão de -8% obteve-se o maior valor da rugosidade ( $1,37 \mu\text{m}$ ) enquanto que nas condições de -2% e -3% de subtensão foram obtidos os menores níveis de rugosidade ( $1,22 \mu\text{m}$ ).

Conforme apresentado na figura 66b, para a 2ª condição de ensaios, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA foi de 0,0006208%.

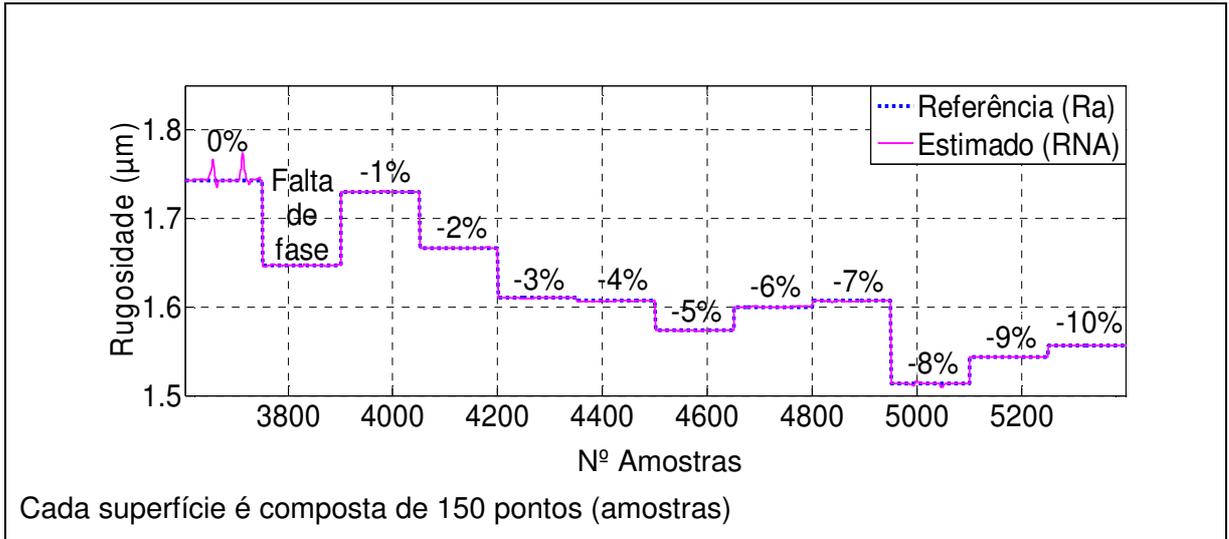


**Figura 66b – Resultado do ERM para a 2ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.2.3 Resultados de generalização da RNA para a 3ª condição de ensaios

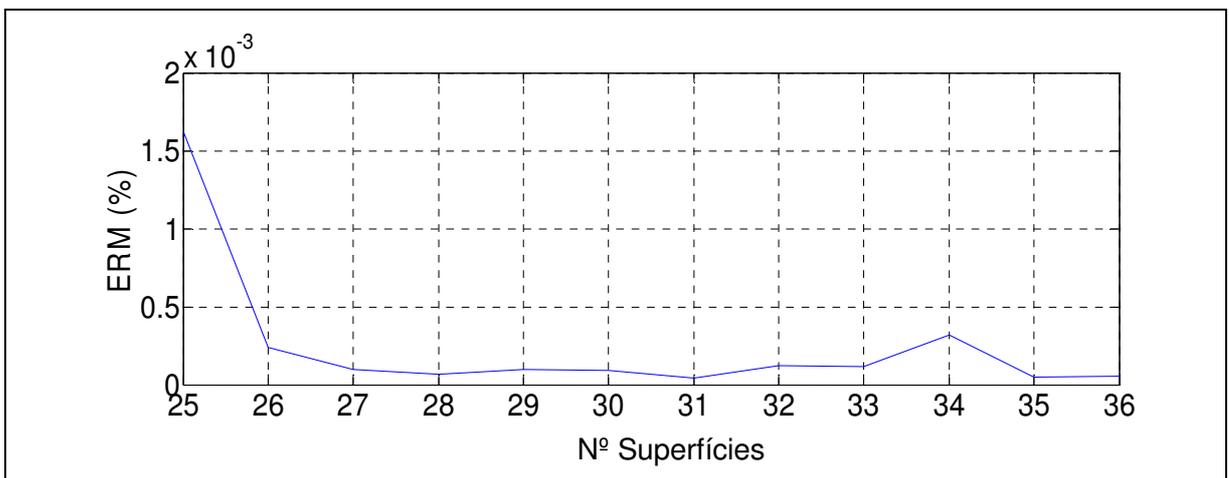
As Figuras 67a e 67b ilustram os respectivos resultados de generalização da RNA proposta e do ERM que foram obtidos para a 3ª condição de ensaios.



**Figura 67a – Resultado de treinamento RNA para a 3ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

Fonte: Autoria própria

Observa-se pela Figura 67a que a maior rugosidade ( $1,74 \mu\text{m}$ ) foi observada na condição de desequilíbrio de 0% e na condição de subtensão de -8% obteve-se o menor valor de rugosidade ( $1,51 \mu\text{m}$ ).



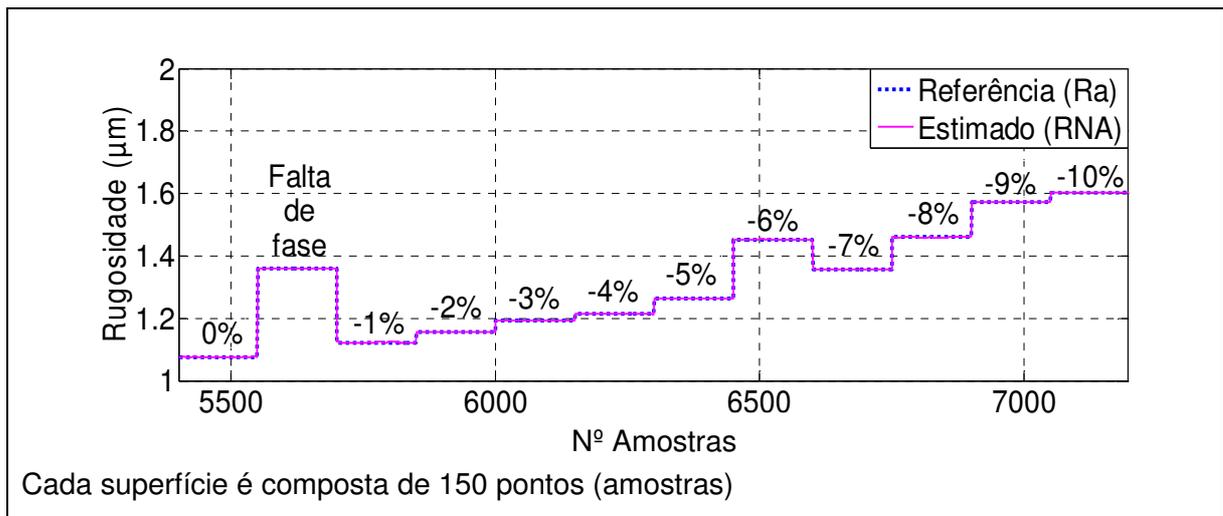
**Figura 67b – Resultado do ERM para a 3ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

Fonte: Autoria própria

A Figura 67b mostra que o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA para a 3ª condição de ensaios foi de 0,001618%.

#### 4.2.4 Resultados de generalização da RNA para a 4ª condição de ensaios

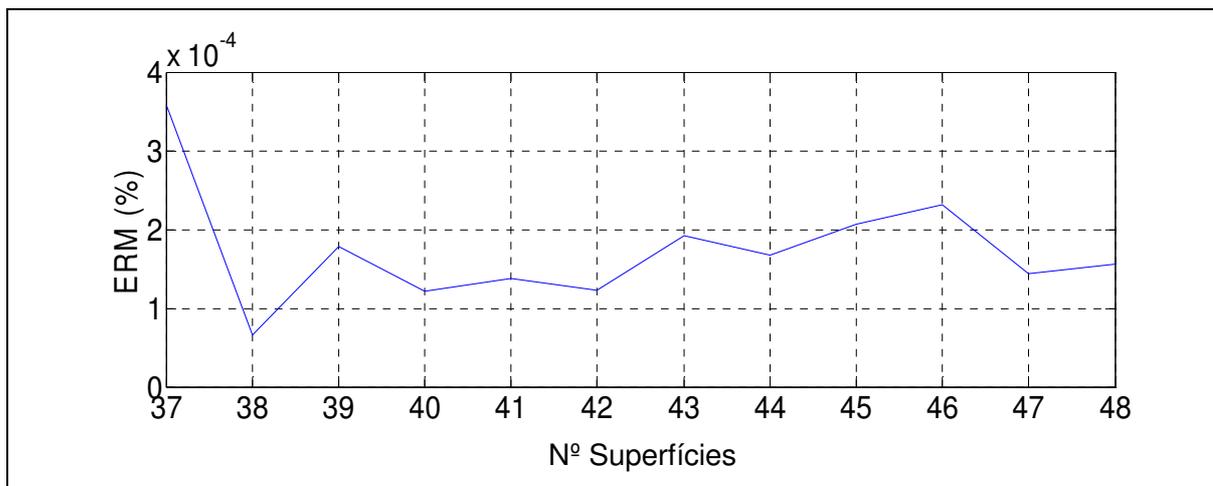
Os resultados gerados pela aplicação da RNA e o erro relativo médio resultante para a 4ª condição de ensaios são mostrados, respectivamente, nas Figuras 68a e 68b a seguir:



**Figura 68a – Resultado de treinamento RNA para a 4ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

**Fonte: Autoria própria**

Observa-se pela Figura 68a que a rugosidade estimada pela RNA apresentou compatibilidade com as rugosidades medidas para todas as condições de alimentação da máquina-ferramenta. A menor rugosidade (1,08 µm) foi obtida na situação de 0% de desequilíbrio e a maior rugosidade (1,60 µm) ocorreu para a situação de subtensão na condição de desequilíbrio de tensão de -10%. À exceção das condições de desequilíbrio -7% e de falta de fase, observou-se uma tendência de aumento da rugosidade para maiores condições de subtensão.



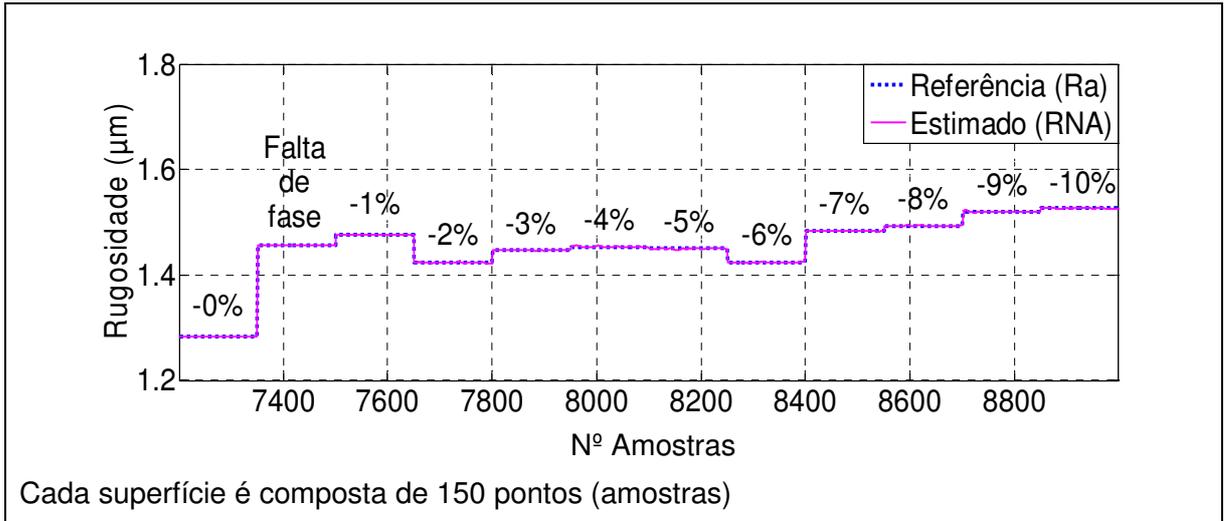
**Figura 68b – Resultado do ERM para a 4ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

**Fonte: Autoria própria**

Conforme apresentado na Figura 68b, para a condição 4 de ensaios, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA foi de 0,0003569%.

#### 4.2.5 Resultados de generalização da RNA para a 5ª condição de ensaios

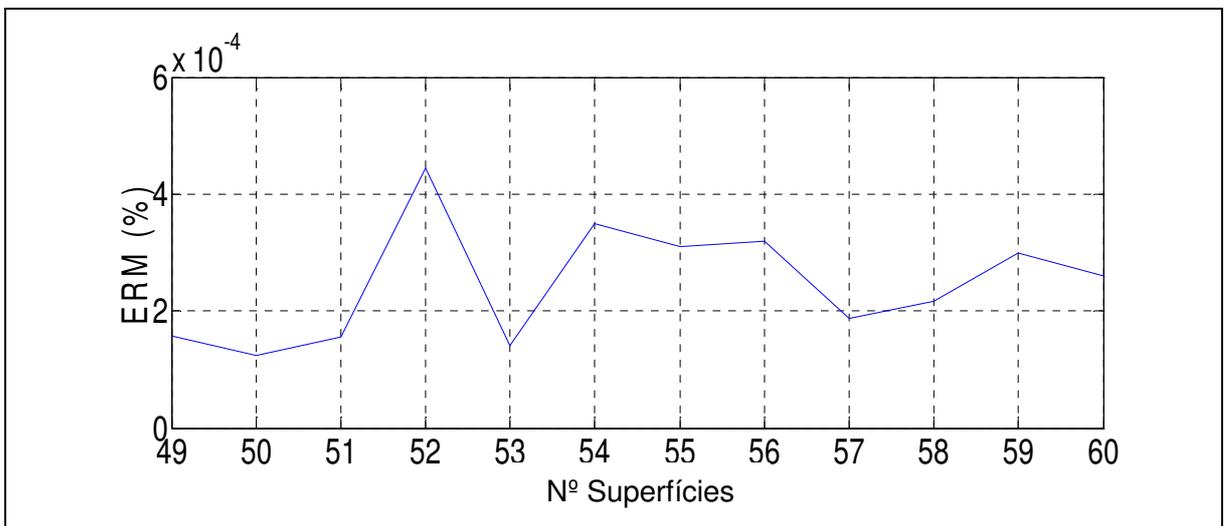
Respectivamente, as Figuras 69a e 69b mostram os resultados gerados pela RNA e o erro relativo médio obtido para a 5ª condição de ensaios.



**Figura 69a – Resultado de treinamento RNA para a 5ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

Fonte: Autoria própria

Observa-se pela Figura 69a que a rugosidade estimada na situação de subtensão de -10% foi obtida a maior rugosidade (1,53 µm). Por outro lado, na situação de alimentação normal (ou seja, sem desequilíbrio de tensão), obteve-se a menor rugosidade (1,28 µm).



**Figura 69b – Resultado do ERM para a 5ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

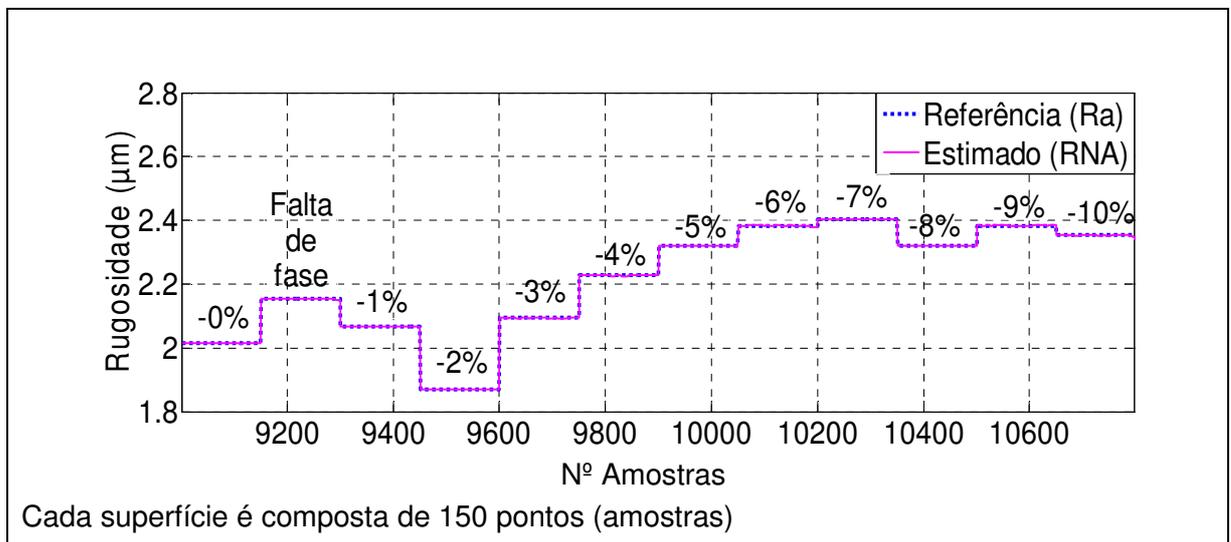
Fonte: Autoria própria

A Figura 69b mostra que, para a 5ª condição de ensaios, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA foi de 0,0004435%.

#### 4.2.6 Resultados de generalização da RNA para a 6ª condição de ensaios

A 6ª condição de ensaios gerou resultados de generalização da RNA e do ERM que são apresentados, respectivamente, nas Figuras 70a e 701b a seguir.

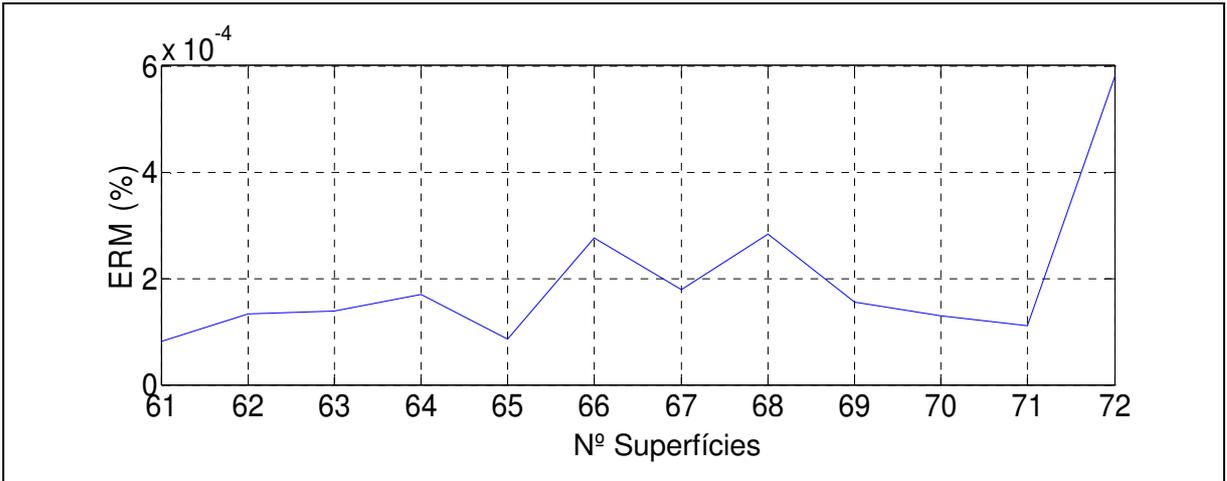
A Figura 70a mostra que a rugosidade estimada pela RNA apresentou resultados de baixos erros comparados à rugosidade medida para todas as situações de alimentação da máquina-ferramenta. O maior valor de rugosidade obtido foi de 2,40  $\mu\text{m}$  para a situação de -7% de subtensão. O menor valor de rugosidade foi de 1,87  $\mu\text{m}$  obtido na situação de -2% de subtensão.



**Figura 70a – Resultado de treinamento RNA para a 6ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

**Fonte: Autoria própria**

Conforme é apresentado na Figura 70b, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA para a 6ª condição de ensaios foi de 0,0005802%.

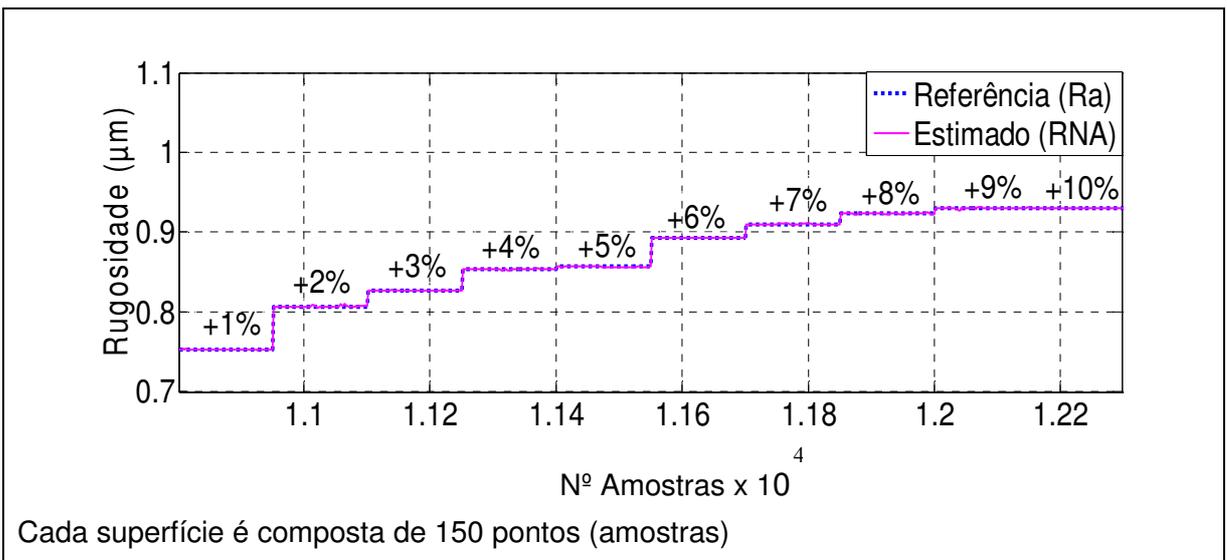


**Figura 70b – Resultado do ERM para a 6ª condição: sem desequilíbrio, subtensão e falta de fase**

Fonte: Autoria própria

4.2.7 Resultados de generalização da RNA para a 7ª condição de ensaios

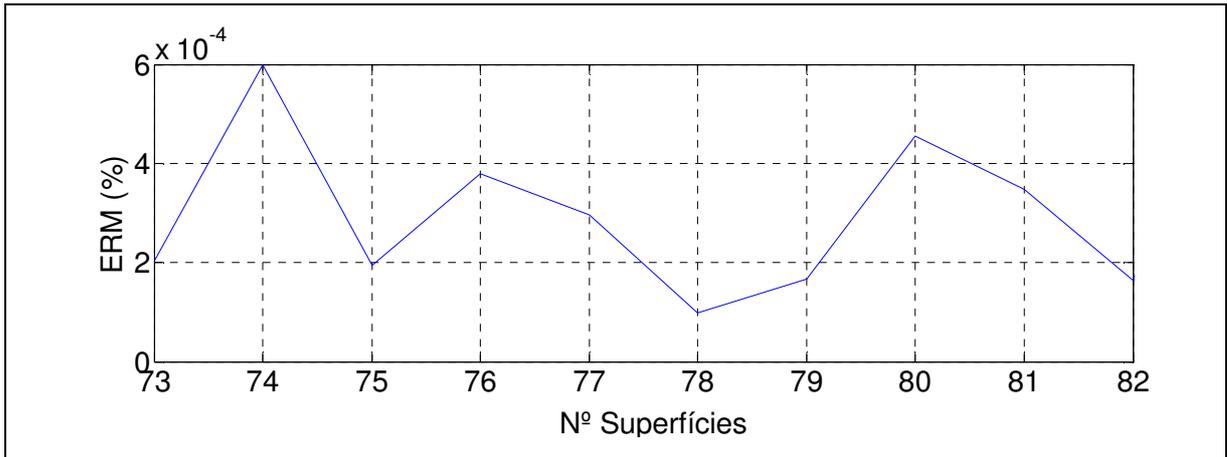
As Figuras 71a e 71b ilustram os respectivos resultados de generalização resultante para a 7ª condição de ensaios.



**Figura 71a – Resultado de treinamento RNA para a 7ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

Na Figura 71a vê-se que a rugosidade estimada pela RNA apresentou resultados muito próximos à rugosidade medida, para todas as situações de alimentação da máquina-ferramenta. A rugosidade apresentou uma tendência contínua de crescimento para valores crescentes de desequilíbrio de tensão. A maior rugosidade obtida foi  $0,93 \mu\text{m}$  para as sobretensões de +9% e +10%, a menor rugosidade foi de  $0,75 \mu\text{m}$  obtida na situação de 1% de sobretensão.



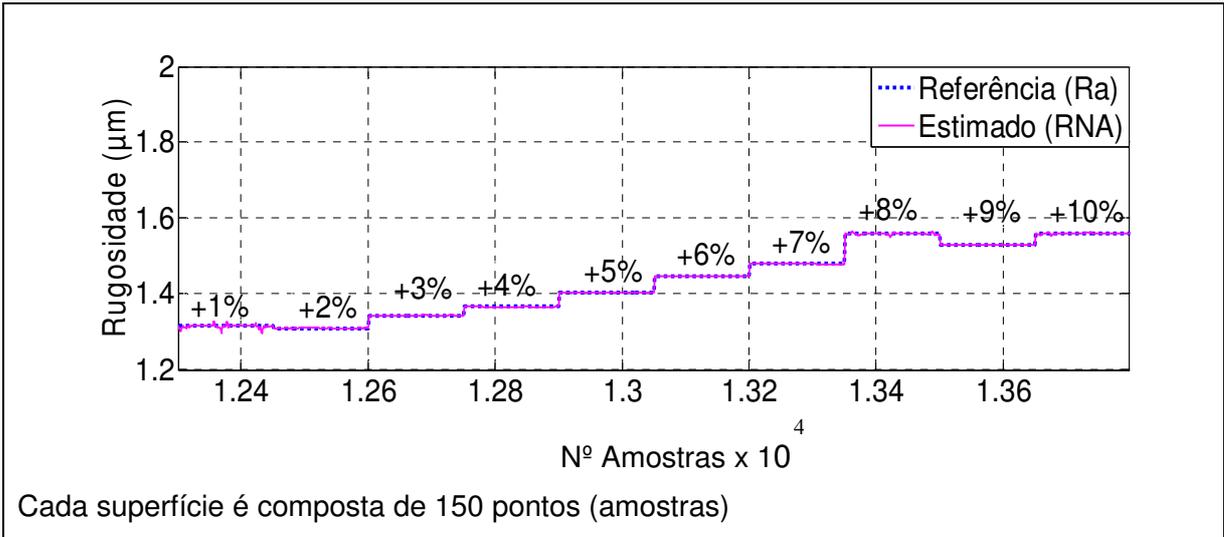
**Figura 71b – Resultado do ERM para a 7ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

Para a 7ª condição de ensaios o maior erro verificado entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA foi de 0,00059925%, conforme é observado na Figura 71b.

#### 4.2.8 Resultados de generalização da RNA para a 8ª condição de ensaios

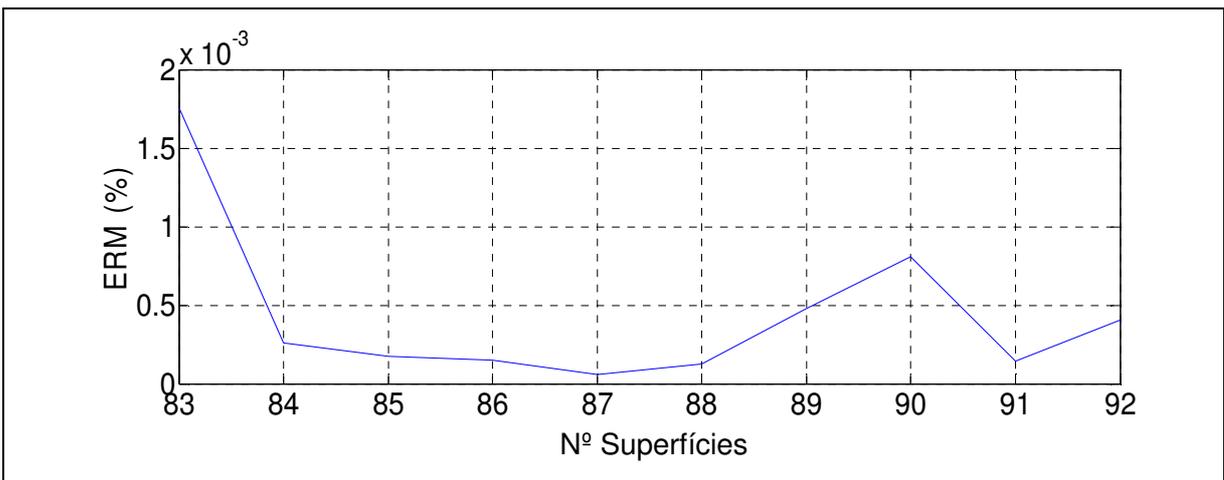
As Figuras 72a e 72b ilustram, respectivamente, os resultados gerados pela RNA e o erro relativo médio resultante para a 8ª condição de ensaios.



**Figura 72a – Resultado de treinamento RNA para a 8ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 72a que rugosidade estimada pela RNA apresentou erros isolados de pico na condição +1% e na condição -8%. A rugosidade apresentou valores continuamente maiores para maiores condição de sobretensão, à exceção das sobretensões +2% e +9%. O maior valor de rugosidade aferido foi de 1,58 µm para as sobretensões de +8% e +10%. O menor valor de rugosidade foi de 1,31 µm para a sobretensão de +2%.



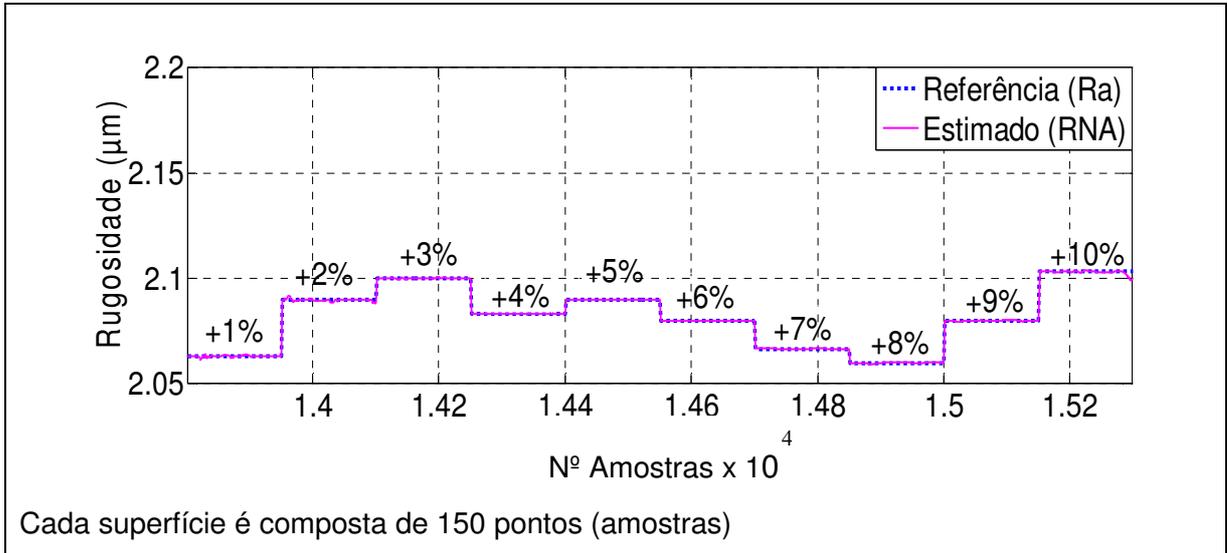
**Figura 72b – Resultado do ERM para a 8ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

A Figura 72b mostra que, para a 8ª condição de ensaios, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA foi de 0,001754%.

#### 4.2.9 Resultados de generalização da RNA para a 9ª condição de ensaios

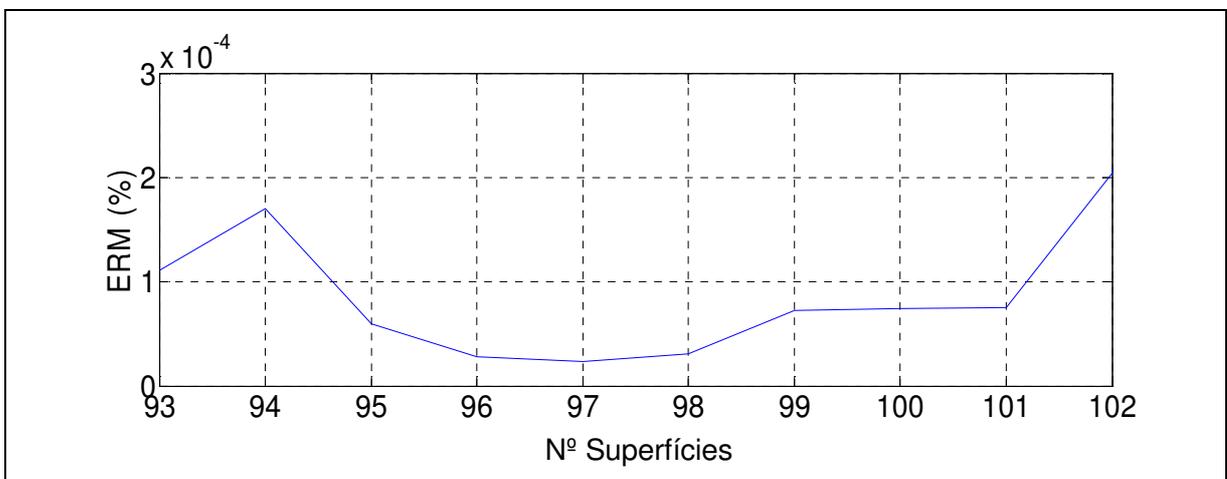
As Figuras 73a e 73b ilustram, respectivamente, os resultados de generalização da RNA e o erro relativo médio obtido para a 9ª condição de ensaios.



**Figura 73a – Resultado de treinamento RNA para a 9ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

Observa-se pela Figura 73a que, para todas as situações de alimentação da máquina-ferramenta, os valores da rugosidade estimada são muito próximos aos da rugosidade medida. A maior rugosidade aferida foi de 2,10  $\mu\text{m}$  na situação de +10% de sobretensão. A menor rugosidade foi de 2,06  $\mu\text{m}$  para sobretensão de +1%.



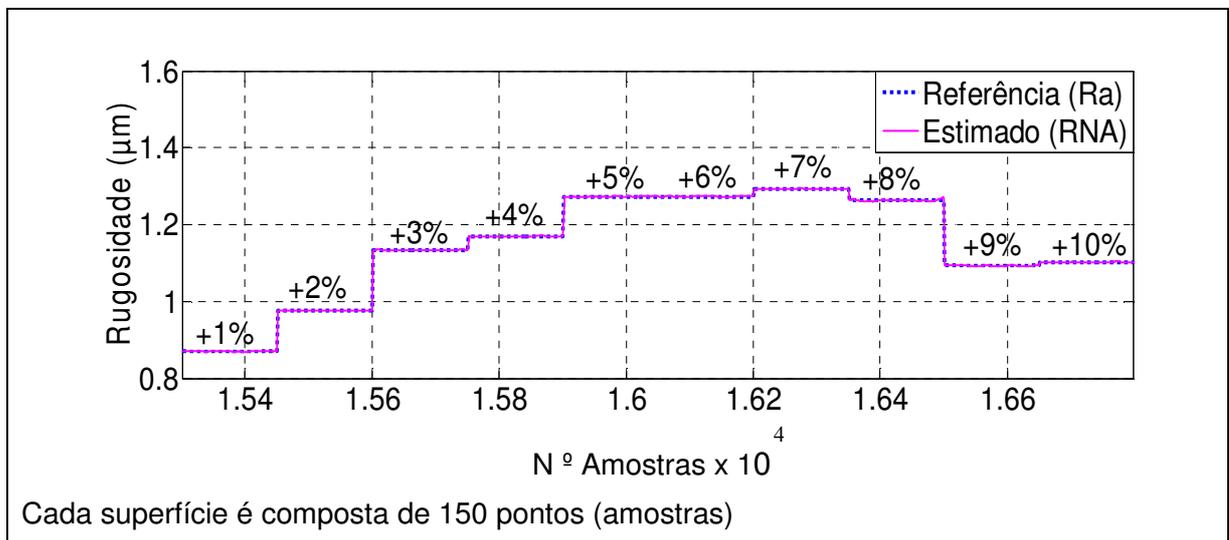
**Figura 73b – Resultado do ERM para a 9ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Figura 73b, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA foi de 0,0002049% para a 9ª condição de ensaios.

#### 4.2.10 Resultados de generalização da RNA para a 10ª condição de ensaios

As Figuras 74a e 74b apresentam, respectivamente, os resultados de generalização obtidos para a 10ª condição de ensaios.



**Figura 74a – Resultado de treinamento RNA para a 10ª condição: sobretensão**

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 74a apresenta a rugosidade estimada pela RNA com resultados compatíveis às rugosidades medidas, para todas as condições de alimentação da máquina-ferramenta. Na situação de +7% de sobretensão foi registrada a maior rugosidade (1,29 µm) e na situação de +1% de sobretensão ocorreu a menor rugosidade (0,77 µm).

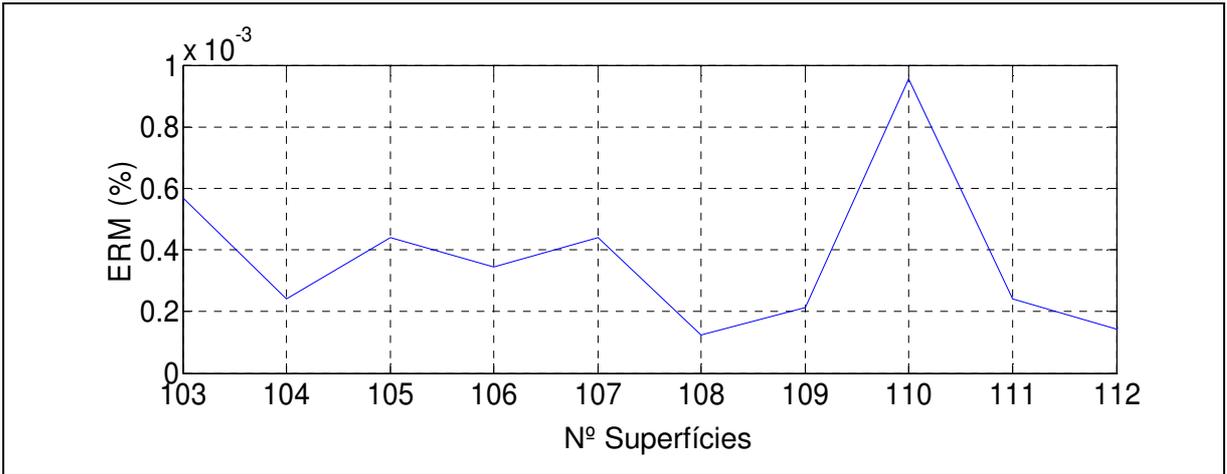


Figura 74b – Resultado do ERM para a 10ª condição 10 sobretensão

Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Figura 74b, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA para a 10ª condição de ensaios foi de 0,0009567%.

4.2.11 Resultados de generalização da RNA para a 11ª condição de ensaios

As Figuras 75a ilustra os resultados de generalização da RNA para a 11ª condição de ensaios.

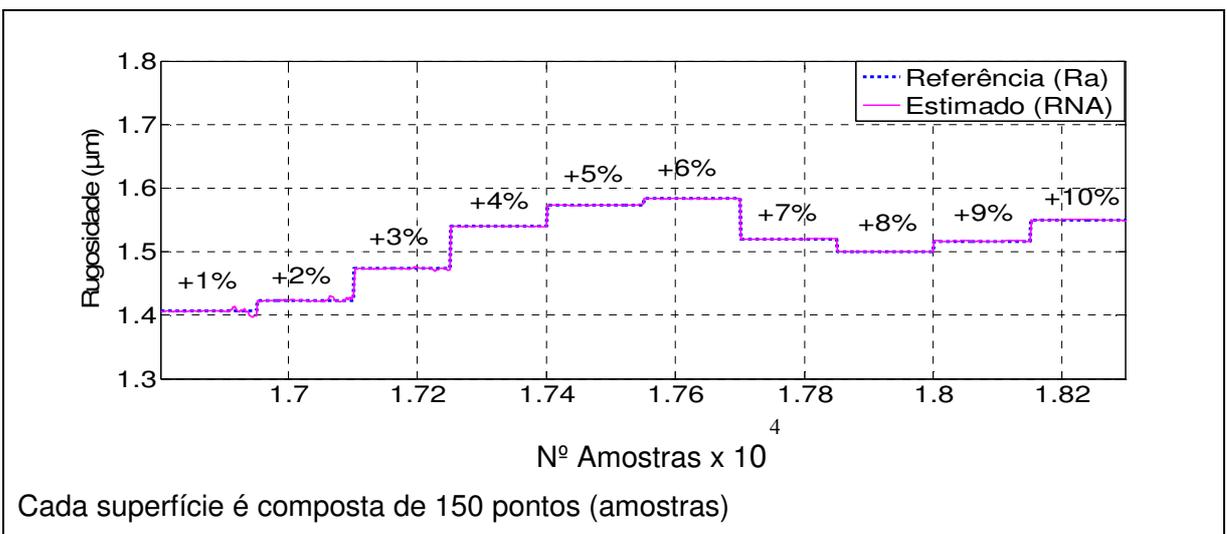
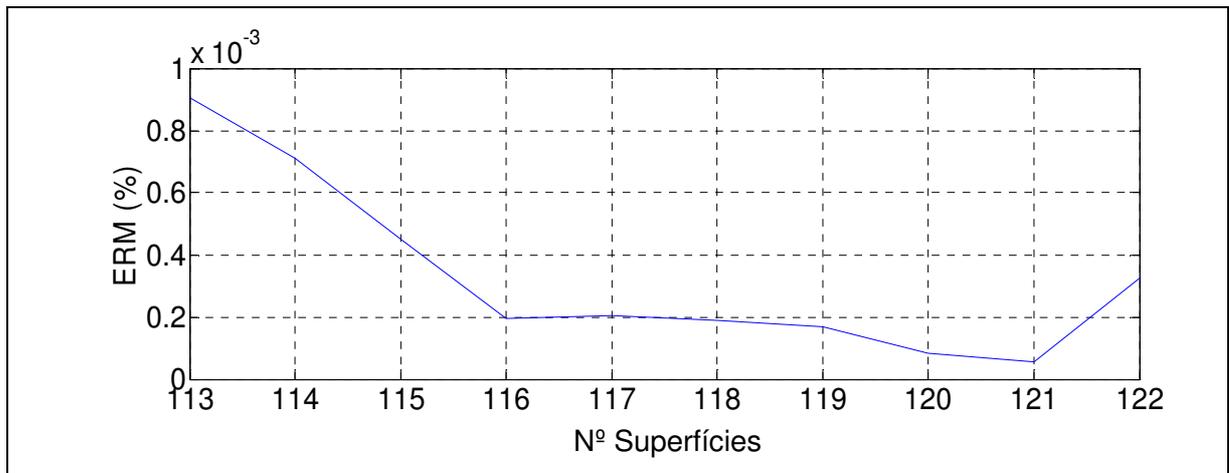


Figura 75a – Resultado de treinamento RNA para a 11ª condição: sobretensão

Fonte: Autoria própria

Observa-se pela Figura 75a que a rugosidade estimada pela RNA resultou muito próxima aos valores de referência. Entretanto, apresentou erros isolados de pico nas condições +1 e +2%. O maior valor de rugosidade foi de 1,58  $\mu\text{m}$  na situação de +6% de sobretensão. O menor valor aferido de rugosidade foi de 1,41  $\mu\text{m}$  para a situação de +1% de sobretensão.

A Figura 75b apresenta o erro relativo médio resultante da aplicação da RNA para a 11ª condição de ensaios.



**Figura 75b – Resultado do ERM para a 11ª condição: sobretensão**

**Fonte: Autoria própria**

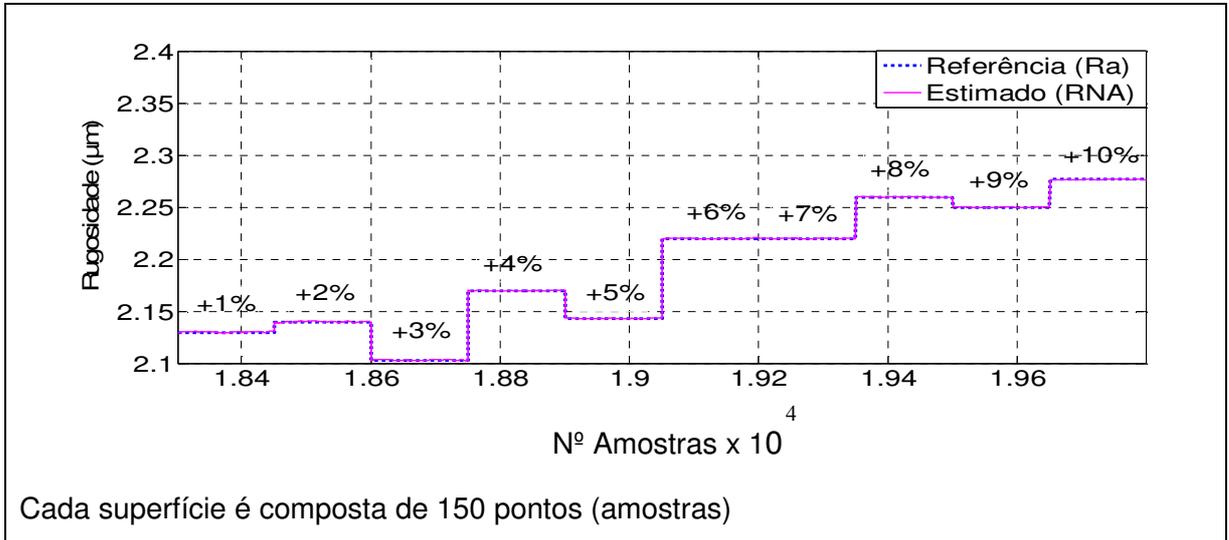
Conforme a Figura 75b mostra, o maior erro obtido entre os valores medidos e os valores estimados pela RNA para a 11ª condição de ensaios foi de 0,0009052%

#### 4.2.12 Resultados de generalização da RNA para a 12ª condição de ensaios

As Figuras 76a e 76b ilustram, respectivamente, os resultados de generalização da RNA proposta bem como o ERM resultante para a 12ª condição de ensaios.

Observa-se na Figura 76a que a rugosidade estimada pela RNA apresentou resultados compatíveis com as rugosidades medidas (valores de referência), para todas as situações de alimentação da máquina-ferramenta. A maior rugosidade

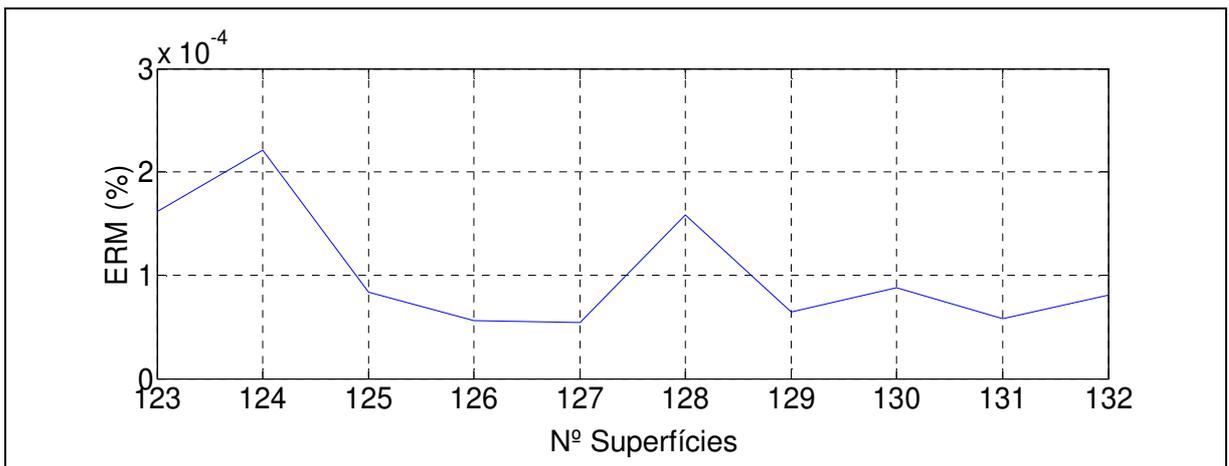
aferida foi de 2,28  $\mu\text{m}$  na situação de +10% de sobretensão, enquanto que o menor valor de rugosidade foi de 2,10  $\mu\text{m}$  para +3% de sobretensão que pode ter sido devido a menor vibração.



**Figura 76a – Resultado de treinamento RNA para a 12ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

Conforme a Figura 76b mostra, para a 12ª condição de ensaios, o maior erro obtido entre os valores medidos e o valor estimado pela RNA foi de 0,0002208%.



**Figura 76b – Resultado do ERM para a 12ª condição: sobretensão**

Fonte: Autoria própria

Considerando os problemas associados à variação da tensão da rede elétrica, os valores reduzidos para o erro relativo médio em todas as condições de

ensaio atestam a capacidade de generalização da rede neural proposta e a sua aplicabilidade como preditor de rugosidade de peças usinadas, baseado exclusivamente em medidas da corrente eficaz da alimentação do motor de indução trifásico que aciona a máquina-ferramenta.

#### 4.3 RESULTADOS DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA

As Figuras de 77 a 82 a seguir apresentam as curvas que representam os valores de rugosidade dos corpos de prova usinados em função de todas as condições de desequilíbrio da tensão de alimentação da máquina-ferramenta que foram empregadas; ou seja, desequilíbrio de 0% (condição normal); desequilíbrios variando de + 10 % a – 10 % (com variações de 1%) e condição de falta de fase.

A Figura 77 apresenta a curva de rugosidade medida para condição de velocidade de corte de 199,5 m/min, avanço de 0,251 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,5 mm.

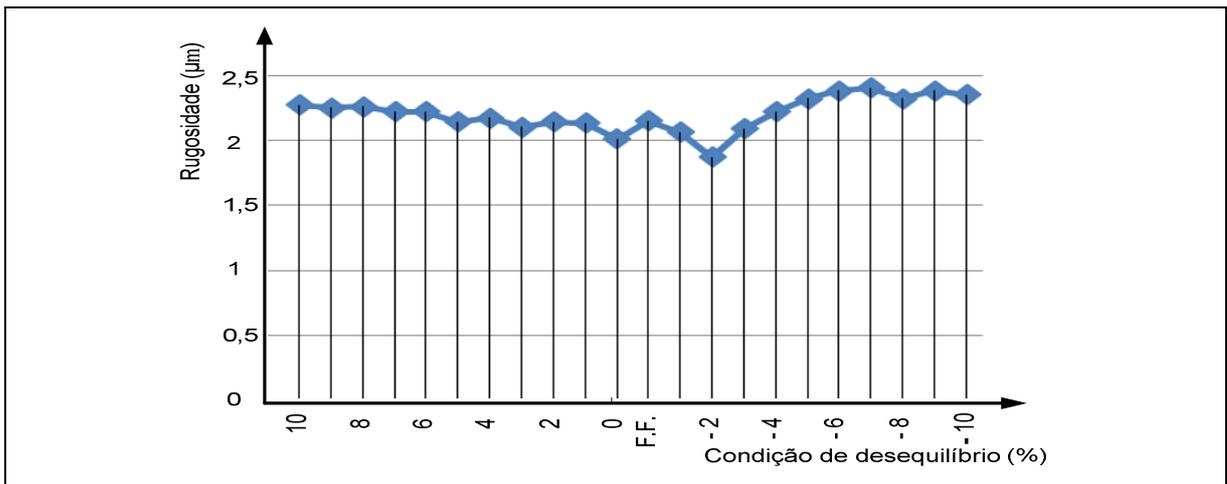
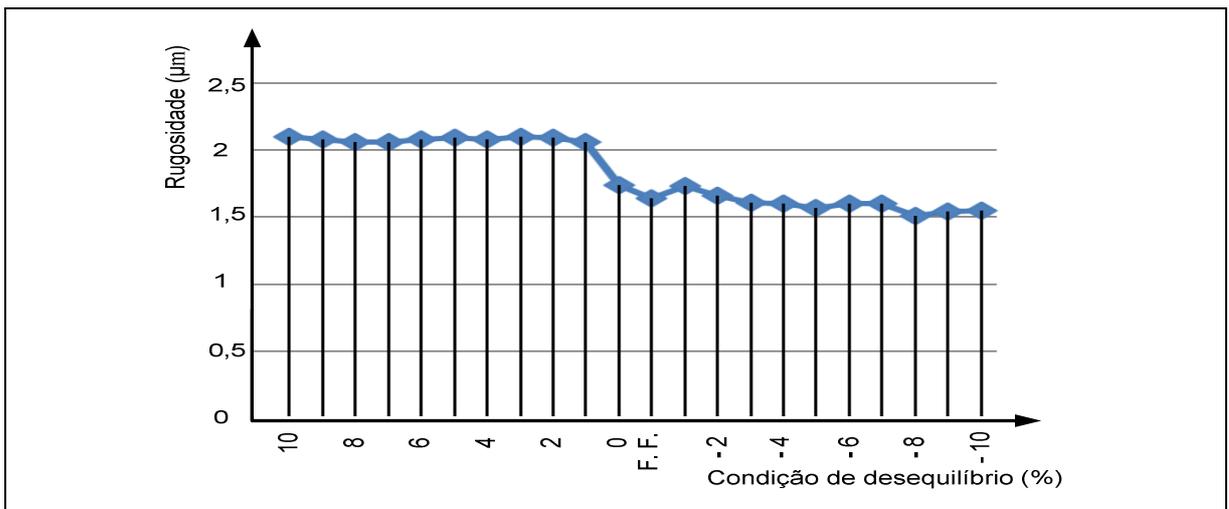


Figura 77 – Resultados de rugosidade para  $V_c = 199,5$  m/min,  $f = 0,251$  mm/volta e  $a_p = 0,5$  mm.

Fonte: Autoria própria

A Figura 77 apresenta um aumento de rugosidade para as condições de maior sobretensão e de maior subtensão, provavelmente devido a maior influência de vibração.

A Figura 78 apresenta a curva de rugosidade medida para condição de velocidade de corte de 398,98 m/min, avanço de 0,251 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,5 mm.

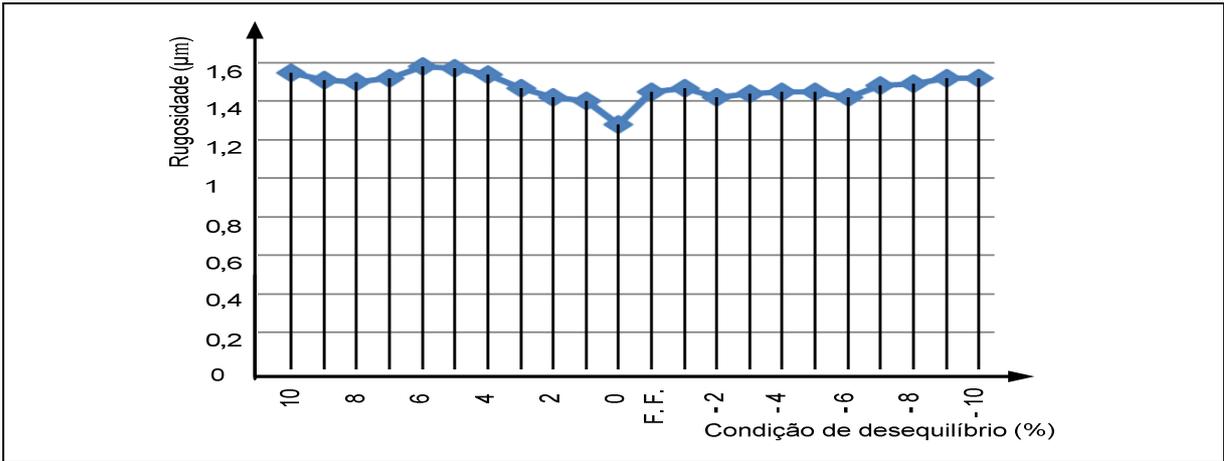


**Figura 78 – Resultados de rugosidade para  $V_c = 398,98$  m/min,  $f = 0,251$  mm/volta e  $a_p = 0,5$  mm.**

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 78 apresenta uma rugosidade maior para as condições de sobretensão e menor rugosidade para as condições de subtensão.

A Figura 79 apresenta a curva de rugosidade medida para condição de velocidade de corte de 199,5 m/min, avanço de 0,15 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,5 mm.

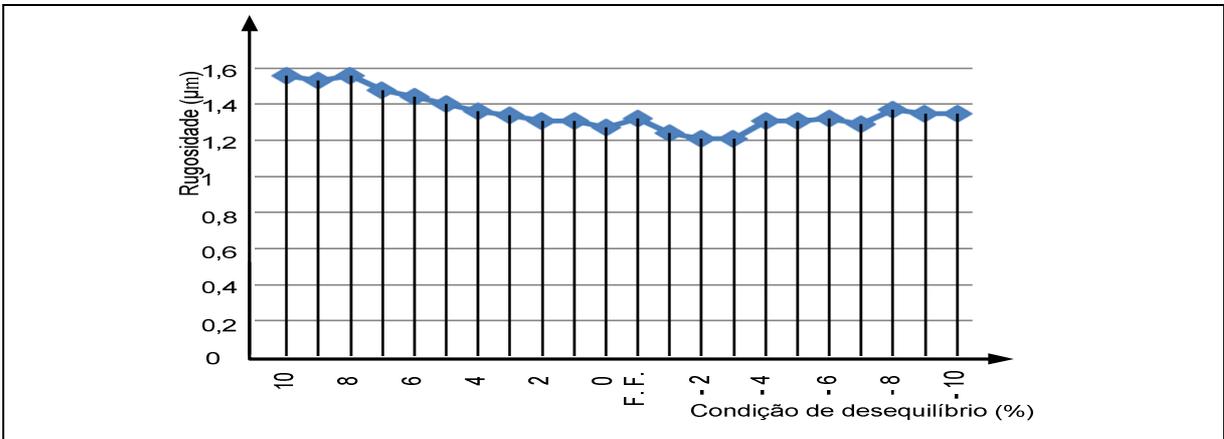


**Figura 79 – Resultados de rugosidade para  $V_c = 199,5$  m/min,  $f = 0,15$  mm/volta e  $a_p = 0,5$  mm.**

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 79 apresenta uma rugosidade cada vez maior quanto maior for a sobretensão a partir da condição equilibrada até a condição 6, provavelmente devido a maior influência de vibração. A partir desta condição há uma redução de rugosidade até a condição 8 e rugosidade maior até a condição 10. A partir da condição de desequilíbrio -2% há uma tendência de aumento de rugosidade quanto maior for a subtensão. Entretanto na condição de desequilíbrio de tensão -6 provavelmente há erro de medição de rugosidade.

A figura 80 apresenta a curva de rugosidade medida para condição de velocidade de corte de 398,98 m/min, avanço de 0,15 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,5 mm.

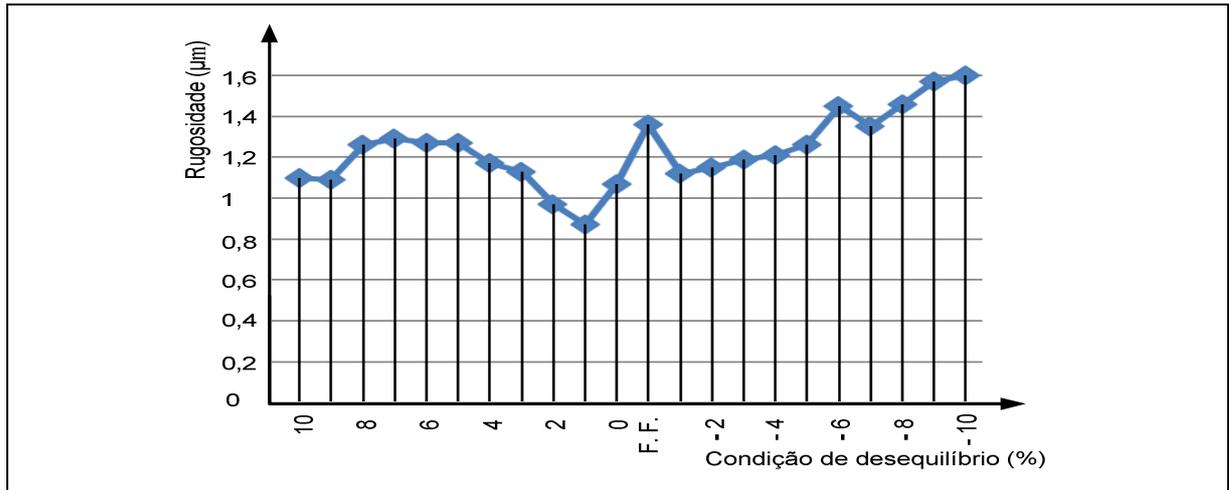


**Figura 80 – Resultados de rugosidade para  $V_c = 398,98$  m/min,  $f = 0,15$  mm/volta e  $a_p = 0,5$  mm.**

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 80 apresenta uma rugosidade cada vez maior para as maiores condições de sobretensão.

A Figura 81 apresenta a curva de rugosidade medida para condição de velocidade de corte de 199,5 m/min, avanço de 0,074 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,5 mm.

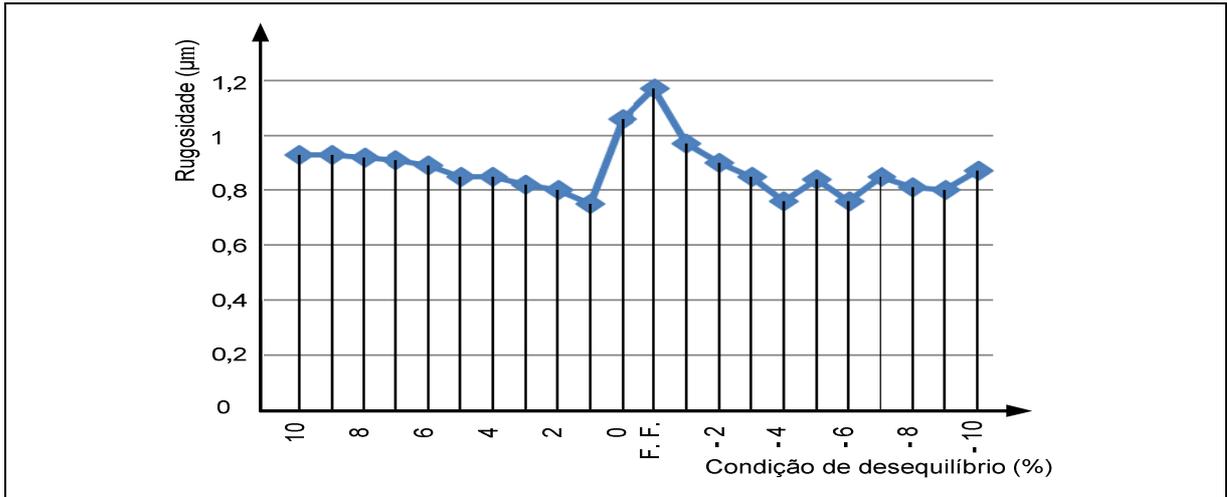


**Figura 81 – Resultados de rugosidade para  $V_c = 199,5$  m/min,  $f = 0,074$  mm/volta e  $a_p = 0,5$  mm.**

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 81 apresenta uma rugosidade cada vez maior para as maiores condições de subtensão, com exceção na condição  $-7\%$  que apresenta menor valor provavelmente devido à menor influência da vibração. A partir da condição 1 a rugosidade é cada vez maior para as maiores condições de sobretensão até a condição  $7\%$ , entretanto, após esta condição de desequilíbrio há um redução de rugosidade.

A Figura 82 apresenta a curva de rugosidade medida para condição de velocidade de corte de 398,98 m/min, avanço de 0,074 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,5 mm.



**Figura 82 – Resultados de rugosidade para  $V_c = 398,98$  m/min,  $f = 0,074$  mm/volta e  $a_p = 0,5$  mm.**

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 82 apresenta uma rugosidade cada vez maior para as maiores condições de sobretensão, a partir da condição 1. Na condição de falta de fase apresenta maior rugosidade motivada provavelmente pela maior vibração e a partir desta condição há uma redução cada vez menor quanto maior a condição de subtensão até a condição -4. Entre os pontos -4 e -10 não se pode chegar a nenhuma conclusão.

Considerando as condições de usinagem empregadas, verificou-se que os valores de rugosidade aumentaram com o aumento do avanço da ferramenta.

Os resultados obtidos permitem afirmar que a qualidade de energia exerce influência sobre os valores de rugosidade obtidos em um processo de torneamento, uma vez que, para as mesmas condições de usinagem, as rugosidade obtidas em condições sem desequilíbrios de tensão (condição normal) resultaram diferentes daquelas obtidas em condições de desequilíbrio de tensão (ou seja, nas condições de falta de fase, de sobretensão ou de subtensão).

Em termos gerais, a amplitude desta influência no resultado do processo de usinagem dependerá em grande parte do objetivo do processo. Para as condições de ensaios empregadas neste trabalho e considerando os resultados obtidos, pode-se dizer que, caso o processo considerado seja um torneamento de desbaste, a qualidade de energia não será decisiva no acabamento superficial do componente usinado. Segundo Klocke (2011) o campo usual de variação da rugosidade

superficial ( $R_a$ ) nestas operações varia de 3,2  $\mu\text{m}$  a 12,5  $\mu\text{m}$ , intervalo muito maior do que a máxima diferença de rugosidade (entre os valores máximos e mínimos) verificada entre todos os ensaios, a qual foi de 0,53  $\mu\text{m}$  para a 6ª condição de ensaios.

Por outro lado, caso o torneamento seja de acabamento, a variação da qualidade de energia poderá ser significativa para a obtenção dos valores de rugosidade, pois, de acordo com Klocke (2011), os menores níveis de rugosidade neste tipo de operação podem variar de 0,2  $\mu\text{m}$  a 0,4  $\mu\text{m}$  ( $R_a$ ), intervalo menor do que a máxima diferença de rugosidade verificada nos ensaios (0,53  $\mu\text{m}$ ).

## 5 CONCLUSÕES

À partir dos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- considerando os problemas associados à variação da tensão da rede elétrica, a rede neural artificial (RNA) proposta foi capaz de estimar os valores de rugosidade obtidos em um processo de torneamento à partir dos valores de corrente eficaz que alimentam o motor de indução trifásico de acionamento da máquina-ferramenta;
- os valores estimados de rugosidade pela rede neural artificial (RNA) apresentaram erros muito pequenos em relação aos valores de referência, o que atesta a sua capacidade de generalização, possibilitando o seu uso como preditor para prever os valores de rugosidade de peças obtidas em processos de usinagem para uma gama de condições de corte, podendo ser utilizado no planejamento e controle de qualidade;
- o maior erro relativo médio entre os valores de rugosidade aferida e os valores estimados pela RNA para todas as condições de ensaio foi de 0,001754% para sobretensão de 1%.
- não foi possível estabelecer uma tendência geral de comportamento dos valores de rugosidade em função dos desequilíbrios da tensão de alimentação da máquina-ferramenta.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tem-se como sugestões de trabalhos futuros:

- desenvolver um controlador acoplado à máquina de tal forma a permitir que o operador possa interromper o processo de fabricação em situações de desequilíbrio de tensão que possam comprometer a qualidade de acabamento superficial, evitando-se retrabalho e perda de material.
- analisar a rugosidade superficial quando das condições da rede elétrica de alimentação da máquina-ferramenta com a presença de harmônicas.

## 5.2 PUBLICAÇÃO RELATIVA AO TRABALHO

A seguir apresenta-se a publicação relativa à divulgação do resultado desta dissertação:

- MIZUYAMA, D.; Silva Júnior, C. E.; Goedel, A.; Previsão de Rugosidade Superficial Utilizando Rede Neural em um Processo de Torneamento de Aço com Ferramentas Convencionais com Inserto. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2011, São João del-Rei - MG. X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2011. pp. 468-473.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Oswaldo L.; RODRIGUES, Antonio C. dos S.; LIRANI, João. **Tolerância**: ajustes, desvios e análise de dimensões. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

AGUIAR, Paulo R. de et al. Predição do desgaste de flanco no torneamento por meio da análise do sinal elétrico de um termopar peça-ferramenta utilizando Wavelet e redes neurais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul: [s.n.], 2011.

ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na energia elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001.

ALMEIDA, Sérgio L. R. de. **Módulo computacional, baseado em redes neurais, para a força de corte e para a rugosidade, em torneamento**. 2006. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

ANDRADE, L. C. M. et al. Previsão de séries temporais através de redes neurais artificiais e métodos estocásticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES NEURAS, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBC, 1997. p. 13-17.

ARRILLAGA, J. et al. **Power system harmonic analysis**. London, U.K.: Wiley, 1997.

ASIA-PACIFIC ECONOMIC COOPERATION. **Electric motors**: alignment of standards and best practice programmes within APEC: final report. Singapore: APEC, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405**: rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8404**: indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 4288**: especificações geométricas de produto (GPS) – rugosidade: método do perfil – regras e procedimentos para avaliação de rugosidade, Rio de Janeiro, 1996.

AZOUZI, R.; GUILLOT, M. Online prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 37, n. 9, p. 1201-1217, 1997.

BERNARDOS P. G.; VOSNIAKOS G. C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p.833-844, june 2003.

BOLLEN, M. H. J.; RIBEIRO, P. F.; GU, I. Y. H. Trends, challenges and opportunities in power quality research. **European Transactions on Electrical Power**, v. 20, n. 1, p. 3-18, 2009.

CAPELLO, E. Residual stresses in turning – part I: influence of process parameters. **Journal of Processing Technology**, v. 160, n. 2, p. 221-228, 2005.

CHENG, Kai. **Machining dynamics: fundamentals, applications and practices**. Middlesex: Springer, 2009.

CORDEIRO, Amilton. **Operações mecânicas II: OM-II: controle dimensional**. Sorocaba: Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, 2004. 66 f. Apostila.

CUMMINGS, P. G. Estimating the effect of system harmonics on losses and temperature rise of squirrel-cage motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. Ia-22, n. 6, p. 1121-1126, sep. 1985.

DeGARMO, Paul Ernest. **Materials and processes in manufacturing**. 10th ed. Hoboken: J. Wiley, 2008.

DUARTE, Silvio X.; KAGAN, Nelson. A power-quality index assess the impact of voltage harmonic distortions and unbalance to three-phase induction motors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 3, july 2010.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical power systems quality**. 2nd ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.

ESPANHOL, Victor. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. 2008. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2008.

EUVEO. **As oportunidades das ameaças**: a qualidade da energia elétrica. [S.l.]: [s.n.], 2003. Ciclo de Seminários.

EZUGWU, E. O.; SALES, W. F.; LANDRE JUNIOR, J. **Machining dynamics**: fundamentals, applications and practices. London: Springer, 2009.

FENG C. X.; WANG, X. F. Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression. **IEEE Transactions**, v. 35, n. 1, p. 11-27, 2003.

FERRARESI, Dino. **Usinagem dos metais**. São Paulo: E. Blücher, 1977.

FERREIRA, Danton D.; SEIXAS José M. de; CERQUEIRA, Augusto S. A three-phase electric disturbance classification system using a principal curves. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8., 2008. **Anais...** Poços de Caldas: INDUSCON, 2008.

FIELD, M.; KAHLES, J. F. The surface integrity of machined-and ground high-strength steels: surface integrity of machined and ground high strength steels. **DMIC Report**, n. 210, p. 54-77, 1964.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, C.; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GOEDEL, Alessandro. **Estimador neural de velocidade para motores de indução trifásicos**. 2007. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

GRACIOLA, Clayton. L.; GOEDEL, Alessandro. **Aplicação de sistemas inteligentes em máquinas elétricas rotativas**. Cornélio Procópio: UTFPR, 2009.

GRAND. **Ferramentas Grand**: tecnologia em usinagem. [S.l.]: [s.n.], 2005.

HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 5, n. 6, p. 989-993, 1994.

HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. [S.l.]: Prentice Hall, 2008.

HEBB, D. **The organization of behavior: a neurophysiological theory.** [S.l.]: J. Wiley, 1949.

HOPFIELD, J. J. Neural network and physical with emergent collective computational abilities. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, v. 79, n. 8, p. 2554-2558, 1982.

HYDRO-QUÉBEC. Canadian Elect. Assoc. **Power quality measurement protocol CEA guide to performing power quality surveys.** [S.l.]: Hydro-Québec, 1996.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE recommended practice for monitoring electric power quality.** [S.l.]: IEEE, 1995. 1995.

\_\_\_\_\_. **Guide for identifying and improving voltage quality in power systems.** [S.l.]: IEEE, 2011.

\_\_\_\_\_. **IEEE-519: recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems,** [S.l.]: IEEE, 1989.

INSTRUTHERM. **Instrumentos de medição.** [S.l.]: [s.n.], 2009.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 91: draft classification of electromagnetic environments.** [S.l.]: IEC, 1991.

\_\_\_\_\_. **IEC 61000-2-2: electromagnetic compatibility.** [S.l.]: IEC, 2002.

\_\_\_\_\_. **IEC 61000-3-2: limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase).** 3rd ed. [S.l.]: IEC, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4762: altura máxima das irregularidades.** [S.l.]: ISO, 1984.

KARPAT, Y.; ÖZEL, T. Hard turning optimization using neural networks modeling and swarm intelligent. **Transaction of NAMRI/SME**, v. 33, p.179-186, 2005.

\_\_\_\_\_. Swarm-intelligent neural network system (SINNS) based multi-objective optimization of hard turning. **Transaction of NAMRI/SME**. v. 34, p. 9-16, 2006a.

\_\_\_\_\_. Multi-objective optimization for turning process using neural network modeling and dynamic-neighborhood particle swarm optimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2006b.

KIANINEZHAD, Reza et al. **Effects of distribution network unbalance voltage types in respect to identical unbalance factor on the induction motors**. Shushtar Branch, Iran: Islamic Azad University, 2009.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing processes 1: cutting**, RWTH edition. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

KRISHNAN, Ramu. **Electric motor drives: modeling, analysis and control**. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

KUSKO, A.; THOMPSON, M. T. **Power quality in electrical systems**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007.

MACHADO, Álisson R.; SILVA, Márcio B. da. **Usinagem dos metais**. 8. ed. Uberlândia: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU). 2004.

MARAFÃO, F. P. **Contribution to the theory of instantaneous power and applications in power quality dissertation**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, v. 5, p. 115-133, 1943.

MINSKY, M. L.; PAPERT, S. A. **Perceptrons: an introduction to computational geometry**. Cambridge: MIT Press, 1969.

MITUTOYO. **Mitutoyo sul americana**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

NARDINI. **Indústria Nardini**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

NATARAJAN, C.; MUTHU, S.; KARUPPUSWAMY, P. Prediction and analysis of surface roughness characteristics of a non-ferrous material using ANN in CNC turning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2011.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION (NEMA). **MG1**: section II: performance standards applying to all machines. [S.l.]: NEMA, 1993. v. 14.

ONG, Chee-M. **Dynamic simulation of electric machinery using Matlab / Simulink**. [S.l.]: Prentice Hall, 1997.

ÖZEL, T.; KARPAT, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 45, p. 467-479, 2005.

ÖZEL, Tugrul; CORREIA, A. E.; DAVIM, J. P. Neural network process modelling for turning of steel parts using conventional and wiper inserts. **International Journal Materials and Product Technology**, v. 35, n. 1/2, 2009.

PHAM, D. T. Artificial intelligence in engineering. **International Journal of Tools and Manufacture**. Cardiff, v. 39, p. 937-949, 1999.

POULACHON, G. et al. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 45, p. 211-218, 2005.

REPRESENTAÇÃO de rugosidade. [S.l.]: [s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.valeretto.com/cursos/metrologia/images/20.htm>>. Acesso em: 03 out. 2011.

RISBOOD, K. A.; DIXIT, U. S.; SAHASRABUDHE, A. D. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 132, p. 203-214, 2003.

ROSA, L. C. **Acabamento de superfícies**: rugosidade superficial. Sorocaba: UNESP, 2007.

ROSENBLATT, Frank. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological Review**, v. 65, p. 386-408, 1958.

SANDVICK COROMANT. **Catálogo eletrônico 2006**: pastilhas CNMG. Disponível em: <<http://www.sandvickcoromant.com.br>>. Acesso em 03 out. 2011.

SHUTZER, K.; SHULZ, H. **Usinagem em altíssima velocidade**: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. São Paulo: Érica, 2003.

SILVA, S. A. O. **Retificadores monofásicos com fator de potência unitário e corrente de entrada senoidal utilizando conversores quad-ressonantes chaveadas sob corrente nula**. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.

SILVA, Ivan N. da.; SPATTI, Danilo H.; FLAUZINO, Rogério. A. **Redes neurais artificiais**: para engenharia e ciências aplicadas. São Paulo: Artliber, 2010.

SING, S. P.; TRIPATHI, R. K. **Voltage sags and their characterization**. Sultanpur, Índia: IEEE, 2010.

SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Tool and manufacturing engineers handbook**. 4th ed. Dearborn: SME, 1987. v. 4.

SOUZA, André J. de. **Processos de fabricação por usinagem**: parte 1: escola de engenharia. Porto Alegre: UFRS, 2011. Apostila.

TRINDADE, Rogério M. **Sistema digital de detecção e classificação de eventos de qualidade de energia**. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2005.

WEG. **Motores trifásicos**. Jaraguá do Sul: WEG, 2006.

WIDROW, B.; HOFF, M. E. Adaptive switching circuits. In: Wescon Convention Record, 48., 1960. **Proceedings of the IRE**. [S.l.]: [s.n.], 1960. p. 96-104.

ZHANG, G. M.; KAPOOR, S. G. Dynamic generation of machined surfaces: part 1: description of a random excitation system. **Technical Research Report**, Maryland, 1999.

ZHOU, L.; CHENG, K. Dynamic cutting process modelling and its impact on the generation of surface topography and texture in nano/micro cutting. **J. Engineering Manufacture**, v. 223, part. b, 2008.

## APÊNDICE A

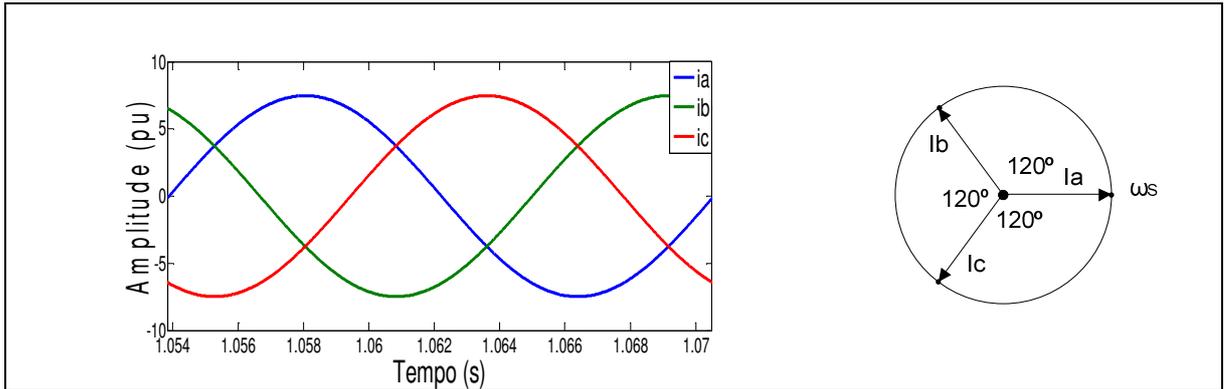
### A1.1 Modelagem do MIT

Esta seção apresenta uma abordagem teórico-conceitual de modelagem e simulação no ambiente *Matlab/Simulink* de uma máquina de indução trifásica acoplada a um sistema de engrenagens e uma carga representativa de um processo de torneamento. O estudo tem por objetivo analisar através dos gráficos gerados, comportamento para correntes de estator e de rotor, tensões de estator e de rotor, velocidade do rotor, torque eletromagnético e torque de carga do ponto de vista do motor, quando a alimentação do motor for equilibrada e desequilibrada. Ainda, apresentam-se como resultado a análise de gráficos gerados para as duas situações de alimentação.

### A1.2 Equacionamento matemático do motor de indução

O modelo matemático utilizado neste trabalho simulará o comportamento do motor desde o regime transitório até o regime permanente. Este modelo foi desenvolvido e simulado utilizando-se o “software” *Matlab/Simulink* como ferramenta computacional (ONG, 1997). Os parâmetros da máquina, tais como: grandezas elétricas do rotor e do estator, momento de inércia da carga do rotor e o torque de carga são as entradas do modelo. A corrente elétrica, o torque eletromagnético e a velocidade do rotor são as saídas do modelo do motor de indução.

O motor elétrico tem o enrolamento com “p” pares de polos e a velocidade síncrono mecânico (Figura A.1) representado pela equação (A.1).



**Figura A.1 – Onda Senoidal trifásica e diagrama fasorial**

Fonte: Goedel (2007)

$$\omega_{sm} = \frac{2}{P} \omega_e \quad (\text{A.1})$$

onde:

$\omega_{sm}$  é a velocidade síncrona [rad/s] (mecânicos);

$\omega_e$  é a velocidade angular da fmm [rad/s] (elétricos);

$P$  é o número de polos do motor.

A velocidade de escorregamento relativo entre o rotor e o estator é representada pela equação (A.2).

$$\text{Velocidade de Escorregamento} = \omega_{sm} - \omega_{rm} \quad (\text{A.2})$$

onde:

Velocidade de Escorregamento [rad/s];

$\omega_{sm}$  é a velocidade síncrona [rad/s];

$\omega_{rm}$  é a velocidade do rotor [rad/s] (mecânicos).

Para que haja tensões induzidas, e fazer com que o motor de indução funcione, deve haver movimento relativo entre o estator e o rotor.

O escorregamento (do inglês “*slip*”) é referenciado na literatura, nacional e estrangeira, como a letra “*s*”, e normalmente expressa como um percentual da velocidade síncrona, conforme equação (A.3).

$$s = \frac{\omega_{sm} - \omega_{rm}}{\omega_{sm}} \quad (\text{A.3})$$

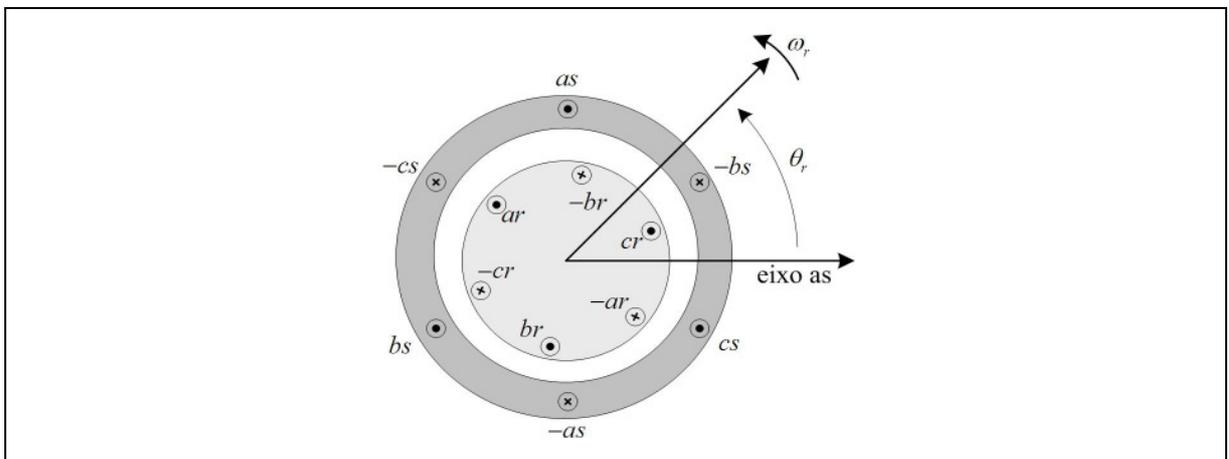
onde:

$s$  é o escorregamento em percentual;

Conforme mencionado em Fitzgerald et al. (2006) “sob condições normais de funcionamento, o escorregamento é pequeno sendo de 3 a 10% sob carga nominal – para a maioria dos motores de gaiola”.

### A1.3 Equações fundamentais do motor de indução trifásico

O modelamento matemático é iniciado pelas equações de tensão do estator e do rotor (Figura A.2).



**Figura A.2 – Corrente elétrica de rotor e estator**

Fonte: Ong (1997)

#### A1.3.1 As tensões do estator

As tensões das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  do estator  $v_{as}$ ,  $v_{bs}$ ,  $v_{cs}$  da máquina de indução com base no circuito elétrico (Figura A.4b) podem ser obtidas pelas equações (A.4) a (A.6).

$$v_{as} = i_{as} r_s + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (\text{A.4})$$

$$v_{bs} = i_{bs} r_s + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (\text{A.5})$$

$$v_{cs} = i_{cs} r_s + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (\text{A.6})$$

onde:

$s$  é o subscrito que representa as variáveis e os parâmetros dos enrolamentos do estator;

$v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$  são as tensões trifásicas do estator [V];

$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  são as correntes trifásicas do estator [A];

$\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs}$  são os fluxos trifásicos do estator [Wb];

$r_s$  é a resistência do estator [ $\Omega$ ].

### A1.3.2 As tensões do rotor

As tensões das fases  $a, b$  e  $c$  do rotor  $v_{ar}, v_{br}, v_{cr}$  da máquina de indução com base no circuito elétrico (Figura A.4b) podem ser obtidas pelas equações (A.7) a (A.9).

$$v_{ar} = i_{ar} r_r + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (\text{A.7})$$

$$v_{br} = i_{br} r_r + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad (\text{A.8})$$

$$v_{cr} = i_{cr} r_r + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \quad (\text{A.9})$$

onde:

$r$  é o subscrito que representa as variáveis e os parâmetros dos enrolamentos do rotor;

$v_{ar}$ ,  $v_{br}$  e  $v_{cr}$  são as tensões trifásicas do rotor [V];  
 $i_{ar}$ ,  $i_{br}$  e  $i_{cr}$  são as correntes trifásicas do rotor [A];  
 $\lambda_{ar}$ ,  $\lambda_{br}$  e  $\lambda_{cr}$  são os fluxos trifásicos do rotor [Wb];  
 $r_r$  é a resistência do rotor [ $\Omega$ ].

### A1.3.3 O fluxo concatenado entre os enrolamentos de rotor e estator

As relações do fluxo concatenado entre os enrolamentos de rotor e do estator são representadas na forma matricial (equação A.10).

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad [\text{Wb.volta}] \quad (\text{A.10})$$

onde:

$\lambda_s^{abc} = [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}]^t$  é o fluxo concatenado do estator;

$\lambda_r^{abc} = [\lambda_{ar} \quad \lambda_{br} \quad \lambda_{cr}]^t$  é o fluxo concatenado do rotor;

$i_s^{abc} = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t$  é o vetor de corrente do estator;

$i_r^{abc} = [i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]^t$  é o vetor de corrente do rotor.

O expoente  $t$  indica que é uma matriz transposta.

### A1.3.4 As matrizes de indutância mútua e de indutância própria

Considerando o circuito magnético linear, o enlace de fluxo total produzido por cada fase, as submatrizes das indutâncias dos enrolamentos estator – estator, rotor – rotor e estator – rotor são mostradas pelas equações (A.11) a (A.14).

$$\mathbf{L}_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$\mathbf{L}_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{L}_{sr}^{abc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

$$\mathbf{L}_{sr}^{abc} = [\mathbf{L}_{rs}^{abc}]^t \quad (\text{A.14})$$

onde:

$L_{ss}^{abc}$  é a indutância do enrolamento do estator-para-estator [H];

$L_{rr}^{abc}$  é a indutância do enrolamento do rotor-para-rotor [H];

$L_{sr}^{abc}$  é a indutância mútua do estator-para-rotor [H];

$L_{ls}$  é a indutância de dispersão do estator [H];

$L_{lr}$  é a indutância de dispersão do rotor [H];

$L_{ss}$  é a indutância própria do estator [H];

$L_{rr}$  é a indutância própria do rotor [H];

$L_{sm}$  é a indutância mútua do estator [H];

$L_{rm}$  é a indutância mútua do rotor [H];

$L_{rs}$  é a indutância mútua entre rotor e estator [H].

#### A1.4 Modelo “ $qd0$ ” do motor de indução

As transformações matemáticas, como a de *Park* (“ $qd0$ ”) e *Clark* (“ $\alpha\beta0$ ”), facilitam o cálculo da solução transitória transformando as equações diferenciais variantes no tempo em equações de indutâncias constantes.

A transformação de coordenadas de um sistema original para outro sistema de coordenadas, o qual será tomado como referência está baseada no princípio da similaridade eletromagnética.

O sistema de coordenadas arbitrário é formado pelo eixo “ $q$ ” (quadratura), “ $d$ ” (direto) e “ $0$ ” (de sequência zero). Na Figura A.3 é representada graficamente esta ação de transformação onde “ $as$ ”, “ $bs$ ” e “ $cs$ ” são os eixos de coordenadas referenciadas ao estator e “ $ar$ ”, “ $br$ ” e “ $cr$ ” os eixos de coordenadas referenciadas ao rotor.

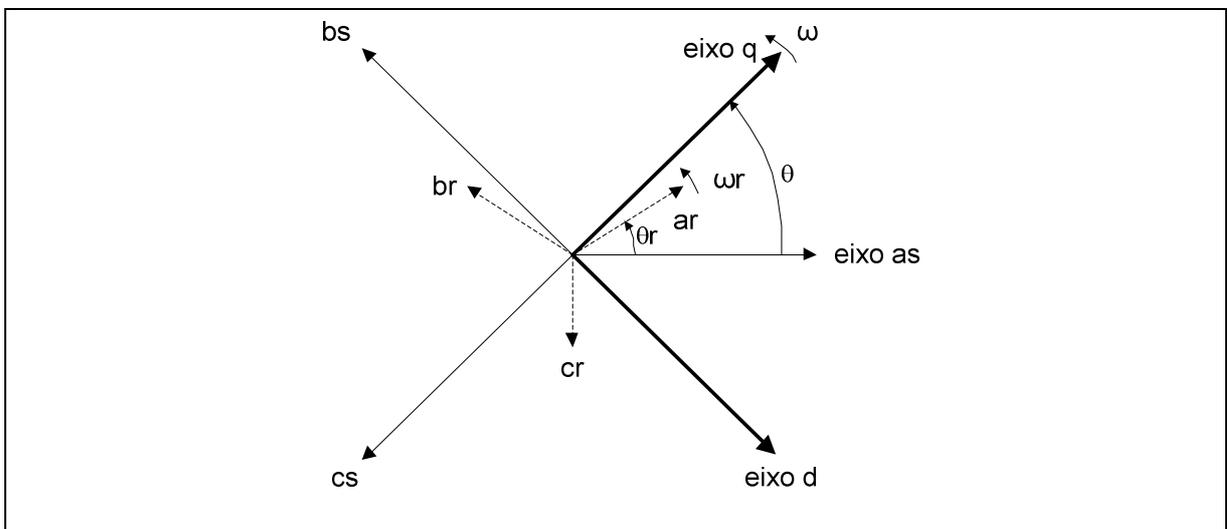


Figura A.3 – Transformação de coordenadas do sistema “ $abc$ ” para “ $qd0$ ”

Fonte: Ong (1997)

#### A1.4.1 A transformação do sistema “*abc*” para “*qd0*”

As variáveis “*abc*” (correntes, tensões ou enlaces de fluxos) do estator e do rotor podem ser transformadas para “*qd0*” por meio da matriz de transformação (equação A.15).

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}(\theta)] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

onde:

$f_q$  e  $f_d$  pode representar a tensão, corrente ou fluxo de eixo quadratura e de eixo direto;

$f_a$ ,  $f_b$  e  $f_c$  pode representar a tensão, corrente ou fluxo das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ ;

$\theta$  é o ângulo de defasamento entre os eixos “*abc*” e os eixos “*qd0*”.

#### A1.4.2 A matriz de transformação $T_{qd0}(\theta)$

A matriz de transformação “*qd0*” pode ser obtida por meio da matriz  $T_{qd0}(\theta)$  (equação A.16).

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

### A1.4.3 A matriz de transformação inversa $[T_{qd0}(\theta)]^{-1}$

A matriz de transformação inversa de  $[T_{qd0}(\theta)]$  para  $[T_{qd0}(\theta)]^{-1}$  é obtida pela equação (A.17).

$$[T_{qd0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

## A1.5 Implementação do modelo matemático

Foi realizada a simulação do MIT por meio do “software” *Matlab/Simulink* como ferramenta computacional (ONG, 1997). Os parâmetros da máquina, tais como: grandezas elétricas do rotor e do estator, momento de inércia da carga, do rotor e o torque de carga são as entradas do modelo. A corrente elétrica, o torque eletromagnético e a velocidade do rotor são as saídas do modelo do motor de indução.

### A1.5.1 Diagrama de blocos das tensões “*abc*” para “*qd0*” e correntes “*qd0*” para “*abc*”

A Figura (A.4a) mostra o diagrama de blocos de transformação das tensões de “*abc*” para “*qd0*” e das correntes “*qd0*” para “*abc*” a velocidade síncrona do motor e a Figura (A.4b) mostra as conexões do estator e do rotor.

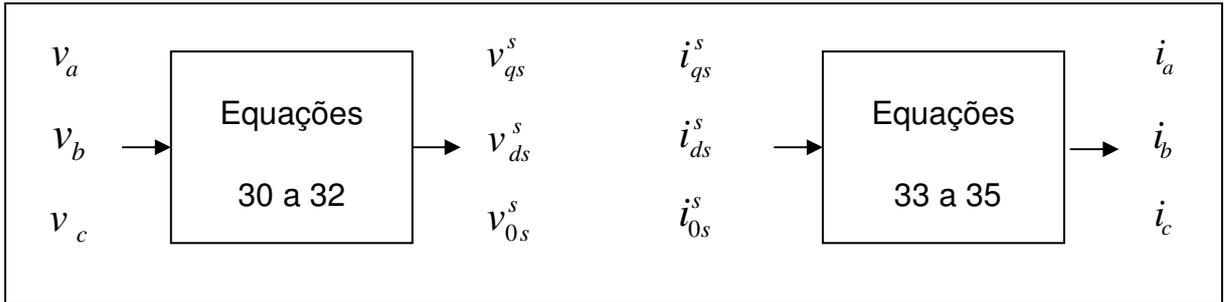


Figura A.4a - Diagrama de blocos de tensões e correntes

Fonte: Ong (1997)

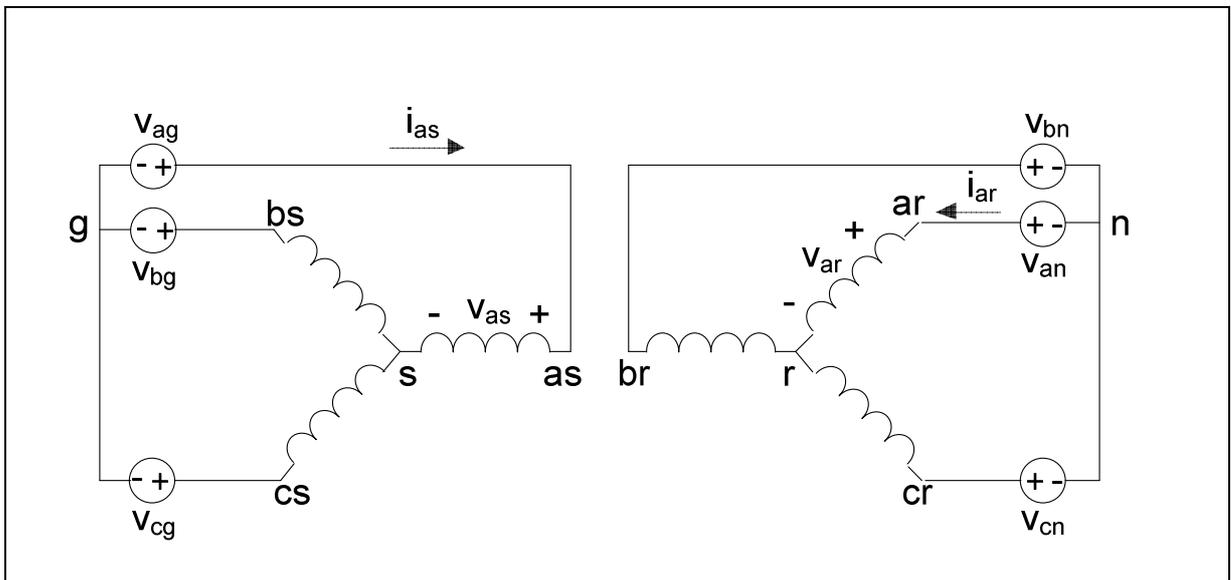


Figura A.4b - Conexões do estator e do rotor

Fonte: Ong (1997)

### A1.5.2 A transformação das tensões para "qd0"

Na Figura A.5 é apresentado o diagrama de bloco de transformação das tensões de "abc" para "qd0" do estator a velocidade síncrona do motor.

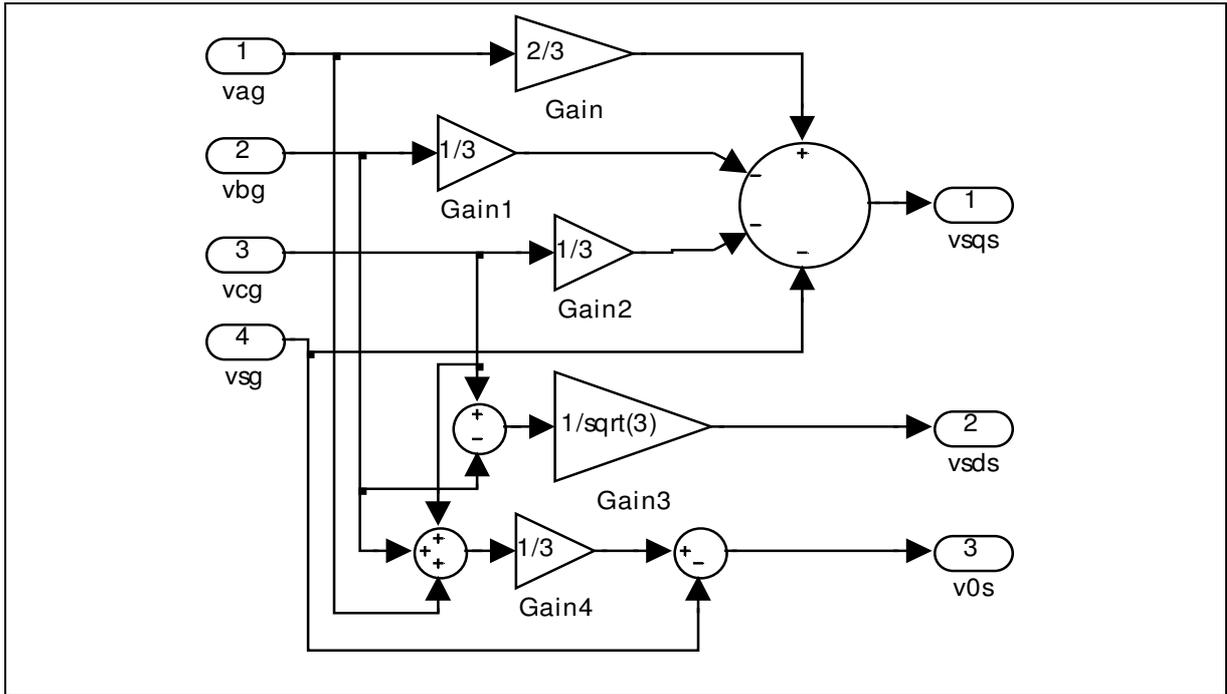


Figura A.5 – Diagrama de bloco de transformação de “abc” para “qd0” do estator

Fonte: Autoria própria

A transformação das tensões  $v_{as}$ ,  $v_{bs}$  e  $v_{cs}$  do eixo “abc” para “qd0” do estator a velocidade síncrona do motor são obtidas por meio das equações (A.18) a (A.20).

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} = \frac{2}{3}v_{ag} - \frac{1}{3}v_{bg} - \frac{1}{3}v_{cg} - v_{sg} \quad (\text{A.18})$$

$$v_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{cs} - v_{bs}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{cg} - v_{bg}) \quad (\text{A.19})$$

$$v_{0s} = \frac{1}{3}(v_{as} + v_{bs} + v_{cs}) = \frac{1}{3}(v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}) - v_{sg} \quad (\text{A.20})$$

onde:

$v_{qs}^s$  é a tensão no estator no eixo “b” [V];

$v_{ds}^s$  é a tensão no estator no eixo “ds” [V];

$v_{0s}$  é a tensão no estator no eixo “0” [V];

$V_{as}$  é a tensão no estator no ponto “*as*” [V];

$V_{bs}$  é a tensão no estator no ponto “*bs*” [V];

$V_{cs}$  é a tensão no estator no ponto “*cs*” [V];

$V_{ag}$  é a tensão aplicada ao estator nos terminais “*ag*” [V];

$V_{bg}$  é a tensão aplicada ao estator nos terminais “*bg*” [V];

$V_{cg}$  é a tensão aplicada ao estator nos terminais “*cg*” [V];

$V_{sg}$  é a tensão aplicada ao estator nos terminais “*sg*” [V].

### A1.5.3 As correntes de “*qd0*” para “*abc*” do estator

Na Figura A.6 é apresentado o diagrama de bloco de transformação das correntes “*qd0*” a velocidade síncrona do motor para “*abc*” do estator.

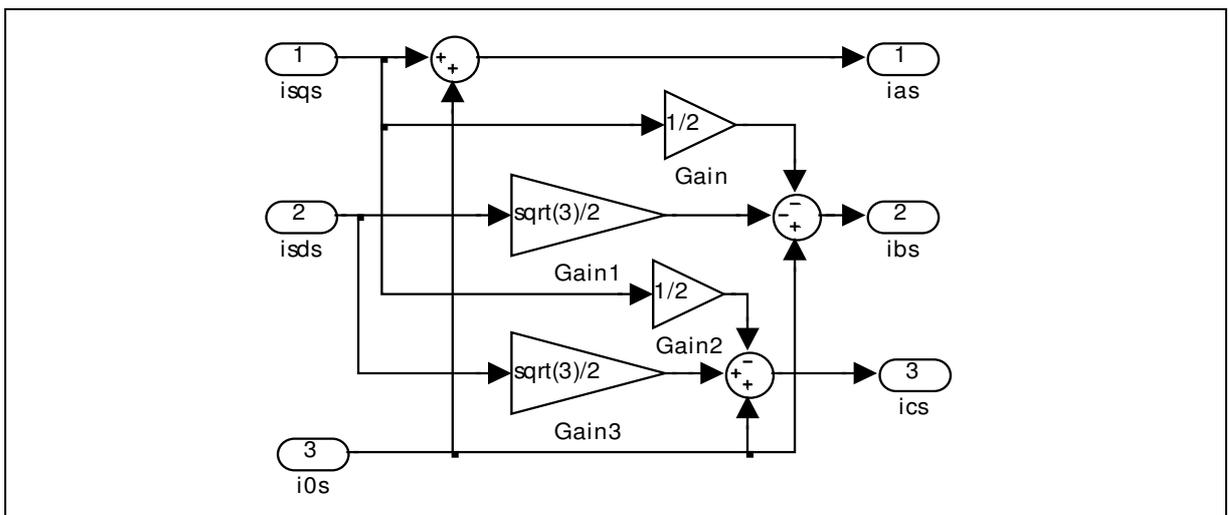


Figura A.6 – Diagrama de bloco de transformação das correntes de “*qd0*” para “*abc*” do estator

Fonte: Autoria própria

A transformação das correntes  $i_{qs}^s$ ,  $i_{ds}^s$  e  $i_{0s}^s$  do eixo “ $qd0$ ” a velocidade síncrona para “ $abc$ ” do estator são obtidas por meio das equações (A.21) a (A.23).

$$i_{as} = i_{qs}^s + i_{0s}^s \quad (\text{A.21})$$

$$i_{bs} = -\frac{1}{2}i_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^s + i_{0s}^s \quad (\text{A.22})$$

$$i_{cs} = \frac{1}{2}i_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^s + i_{0s}^s \quad (\text{A.23})$$

onde:

$i_{as}$  é a corrente no estator no ramo “ $as$ ” [A];

$i_{bs}$  é a corrente no estator no ramo “ $bs$ ” [A];

$i_{cs}$  é a corrente no estator no ramo “ $cs$ ” [A];

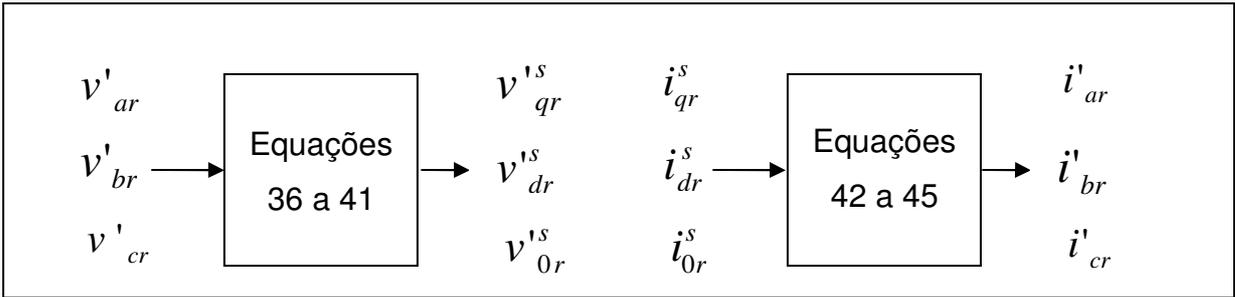
$i_{qs}^s$  é a corrente no estator no eixo “ $qs$ ” [A];

$i_{ds}^s$  é a corrente no estator no eixo “ $d$ ” [A];

$i_{0s}^s$  é a corrente no estator no eixo “ $0$ ” [A].

A1.5.4 Diagrama de blocos das tensões “ $abc$ ” para “ $qd0$ ” e correntes “ $qd0$ ” para “ $abc$ ”.

Na Figura (A.7a) é apresentado o diagrama de blocos de transformação das tensões referidas do rotor de “ $abc$ ” para “ $qd0$ ” referidas ao estator e a Figura (A.7b), das correntes a velocidade síncrona rotor de “ $qd0$ ” para “ $abc$ ” referida utilizando a transformação inversa com  $\theta$  igual a zero.



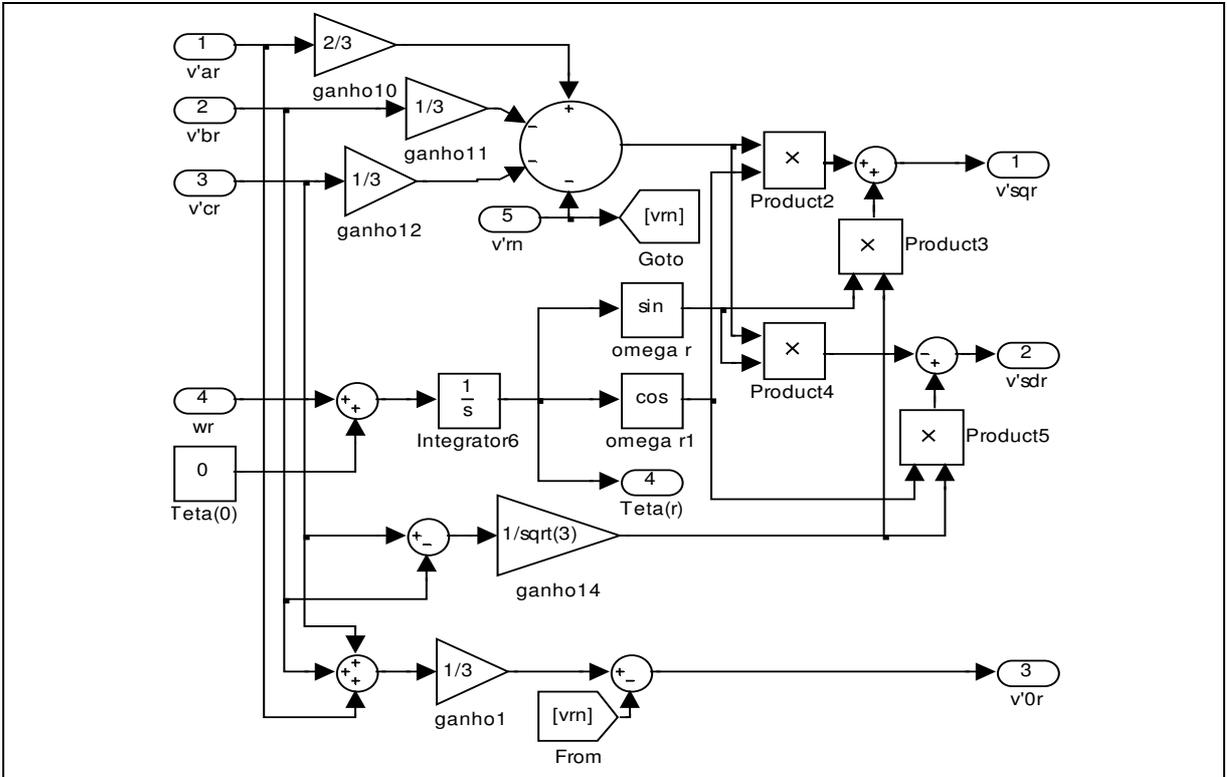
**Figura A.7a** Tensões do rotor de “abc” para “qd0”  
**Figura A.7b** Correntes do rotor de “qd0” para “abc”

Fonte: Ong (1997)

Fonte: Ong (1997)

A1.5.5 A transformação das tensões para “qd0”

A transformação das tensões do rotor por fase, referidas  $v'_{ar}$ ,  $v'_{br}$  e  $v'_{cr}$  de “abc” para “qd0” referidas ao estator (Figura A.8).



**Figura A.8** – Diagrama de bloco de transformação das tensões referidas “abc” para “qd0” do rotor

Fonte: Autoria própria

A transformação das tensões de fase do rotor “ $abc$ ” referidas para “ $qd0$ ”,  $v'_{ar}$ ,  $v'_{br}$  e  $v'_{cr}$  referidas ao rotor equações (A.24) a (A.26).

$$v'_{qr} = \frac{2}{3}v'_{ar} - \frac{1}{3}v'_{br} - \frac{1}{3}v'_{cr} = \frac{2}{3}v'_{an} - \frac{1}{3}v'_{bn} - \frac{1}{3}v'_{cn} - v'_{rn} \quad (\text{A.24})$$

$$v'_{dr} = \frac{1}{\sqrt{3}}(v'_{cr} - v'_{br}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(v'_{cn} - v'_{bn}) \quad (\text{A.25})$$

$$v'_{0r} = \frac{1}{3}(v'_{ar} + v'_{br} + v'_{cr}) = \frac{1}{3}(v'_{an} + v'_{bn} + v'_{cn}) - v'_{rn} \quad (\text{A.26})$$

onde:

$v'_{qr}$  é a tensão no rotor no eixo “ $q$ ” [V];

$v'_{dr}$  é a tensão no rotor no eixo “ $d$ ” [V];

$v'_{0r}$  é a tensão no rotor no eixo “0” [V];

$v'_{ar}$  é a tensão no rotor nos terminais “ $ar$ ” [V];

$v'_{br}$  é a tensão no rotor nos terminais “ $br$ ” [V];

$v'_{cr}$  é a tensão no rotor nos terminais “ $cr$ ” [V];

$v'_{an}$  é a tensão no rotor nos terminais “ $an$ ” [V];

$v'_{bn}$  é a tensão no rotor nos terminais “ $bn$ ” [V];

$v'_{cn}$  é a tensão no rotor nos terminais “ $cn$ ” [V];

$v'_{rn}$  é a tensão no rotor nos terminais “ $rn$ ” [V].

### A1.5.6 A transformação das tensões de “abc” para “qd0” do rotor

A transformação das tensões de fase rotor referidas ao rotor  $v_{qr}^r$  e  $v_{dr}^r$  de “abc” para “qd0” referida ao estator. Onde o ângulo  $\theta_r(0)$  é seu valor inicial e  $\omega_r(t)$  é a velocidade angular instantânea do rotor são obtidas pelas equações (A.27) a (A.29).

$$v_{qr}^{1s} = v_{qr}^r \cos\theta_r(t) + v_{dr}^r \text{sen}\theta_r(t) \quad (\text{A.27})$$

$$v_{dr}^{1s} = -v_{qr}^r \text{sen}\theta_r(t) + v_{dr}^r \cos\theta_r(t) \quad (\text{A.28})$$

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (\text{A.29})$$

onde:

$v_{qr}^{1s}$  é a tensão no rotor no eixo “q” [V];

$v_{dr}^{1s}$  é a tensão no rotor no eixo “d” [V];

$\theta_r(t)$  é o ângulo instantâneo do rotor [Radiano];

$v_{qr}^r$  é a tensão no rotor no eixo “q” [V];

$\cos\theta_r(t)$  é o cosseno do ângulo instantâneo do rotor [rad];

$v_{dr}^r$  é a tensão no rotor no eixo “d” [V];

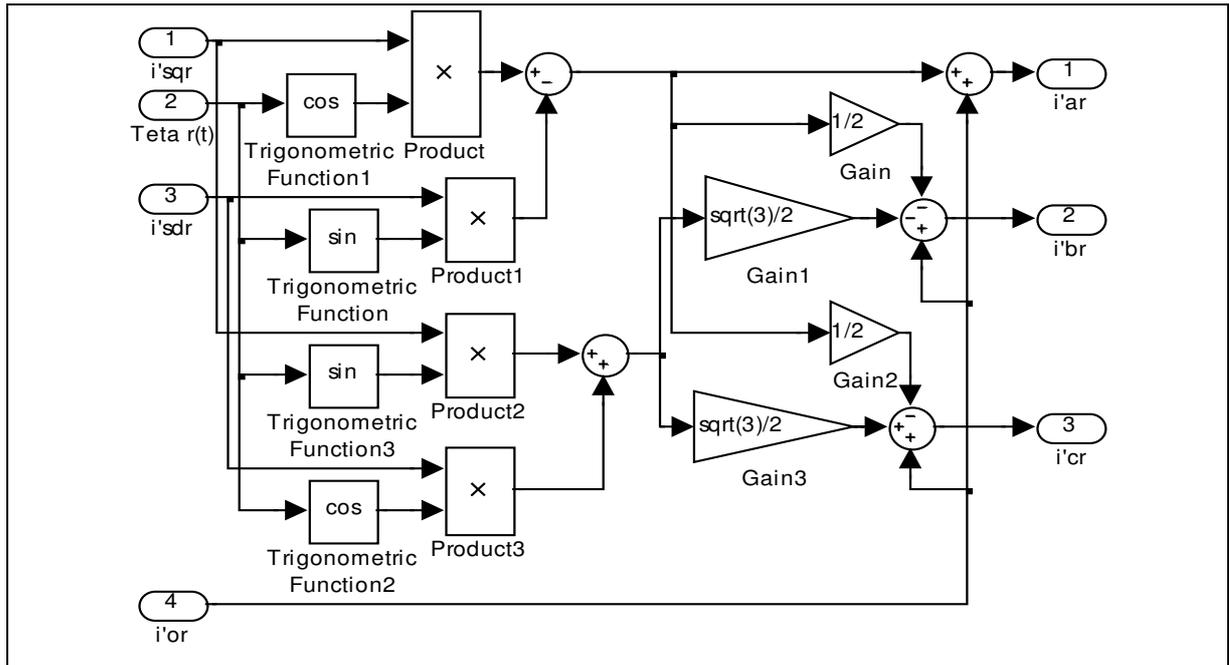
$\text{sen}\theta_r(t)$  é o seno do ângulo instantâneo do rotor [rad];

$\omega_r(t)$  é a velocidade instantânea do rotor [rad/s];

$\theta_r(0)$  é o valor inicial do ângulo do rotor [rad/s].

### A1.5.7 As correntes do eixo “ $qd0$ ” para “ $abc$ ” do rotor

Na Figura A.9 apresenta o diagrama de bloco de transformação das correntes do rotor referidas ao estator de “ $qd0$ ” para “ $abc$ ” referida.



**Figura A.9 – Diagrama de bloco de transformação das correntes do rotor referidas ao estator “ $qd0$ ” para “ $abc$ ”**

Fonte: Autoria própria

A transformação das correntes do rotor referidas ao estator de “ $qd0$ ” para “ $abc$ ” consiste em obter as correntes estacionárias “ $qd$ ” novamente para o eixo “ $qd$ ” referida ao rotor, utilizando a transformação de rotação equações (A.30) e (A.31).

$$i_{qr}^r = i_{qr}^s \cos \theta_r(t) - i_{dr}^s \text{sen} \theta_r(t) \quad (\text{A.30})$$

$$i_{dr}^r = i_{qr}^s \text{sen} \theta_r(t) + i_{dr}^s \cos \theta_r(t) \quad (\text{A.31})$$

onde:

$i_{qr}^r$  é a corrente no rotor no eixo “ $q$ ” [A];

$i_{dr}^r$  é a corrente no rotor no eixo “ $d$ ” [A];

$i'_{qr}{}^s$  é a corrente no rotor no eixo "q" [A];

$\cos \theta_r(t)$  é o cosseno do ângulo instantâneo do rotor [rad];

$i'_{dr}{}^s$  é a corrente no rotor no eixo "d" [A];

$\text{sen } \theta_r(t)$  é o seno do ângulo instantâneo do rotor [rad].

#### A1.5.8 As correntes no eixo "qd0" referidas ao rotor

"A transformação das correntes do rotor referidas do eixo "qd0" para "abc" referido por meio da transformação inversa com " $\theta$ " igual a zero, equações (A.32) a (A.34).

$$i'_{ar} = i'_{qr}{}^r + i'_{0r} \quad (\text{A.32})$$

$$i'_{br} = -\frac{1}{2}i'_{qr}{}^r - \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr}{}^r + i'_{0r} \quad (\text{A.33})$$

$$i'_{cr} = -\frac{1}{2}i'_{qr}{}^r + \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr}{}^r + i'_{0r} \quad (\text{A.34})$$

onde:

$i'_{ar}$  é a corrente no rotor no ramo "ar" [A];

$i'_{br}$  é a corrente no rotor no ramo "br" [A];

$i'_{cr}$  é a corrente no rotor no ramo "cr" [A];

$i'_{qr}{}^r$  é a corrente no rotor no eixo "q" [A];

$i'_{0r}$  é a corrente no rotor no eixo "0" [A];

$i'_{dr}{}^r$  é a corrente no rotor no eixo "d" [A].

### A1.5.9 Diagrama de blocos do circuito no eixo “q” e “d”

Na Figura (A.10a) apresentam o diagrama de blocos dos fluxos no referencial estacionário do eixo “q” e a Figura (A.10b) os fluxos no referencial estacionário do eixo “d”.

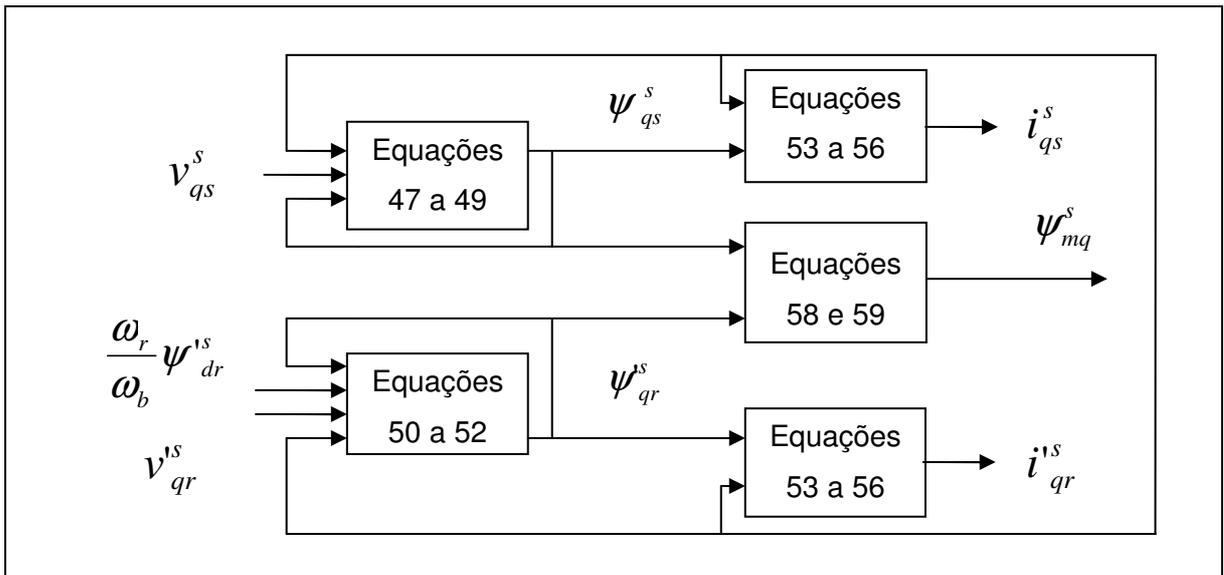


Figura A.10a - Circuito do eixo “q”

Fonte: Ong (1997)

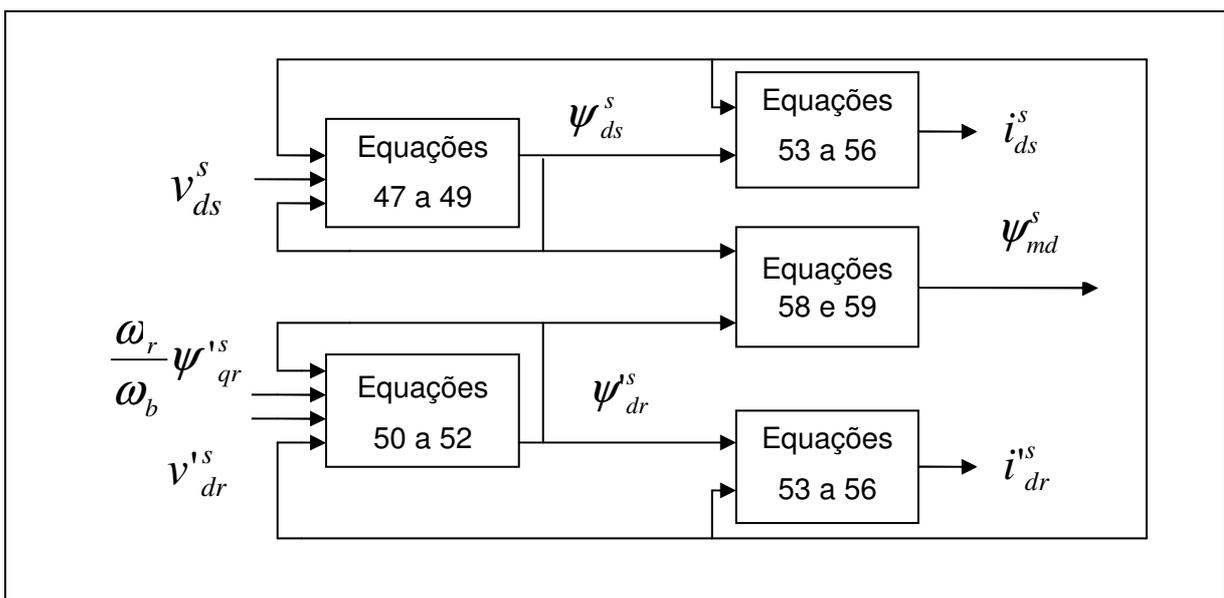
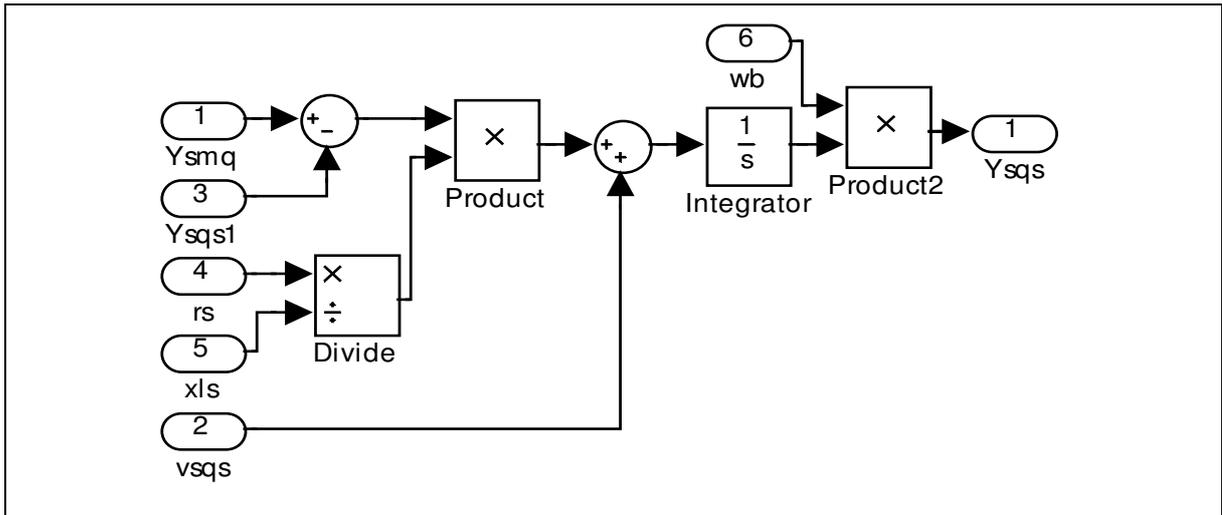


Figura A.10b - Circuito do eixo “d”

Fonte: Ong (1997)

### A1.5.10 O fluxo no eixo “ $qd0$ ”

A transformação dos fluxos do estator da máquina no eixo “ $q$ ” para “ $qd0$ ” por meio da transformação inversa com “ $\theta$ ” igual a zero (Figura A.11).



**Figura A.11 – Diagrama de bloco do fluxo no eixo “ $q$ ”**

Fonte: Autoria própria

A equação (A.35) apresenta a transformação do fluxo do estator da máquina e do fluxo do estator no eixo “ $q$ ”.

$$\psi_{qs}^s = \omega_b \int \left\{ v_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq}^s - \psi_{qs}^s) \right\} dt \quad (\text{A.35})$$

onde:

$\psi_{qs}^s$  é o fluxo no eixo “ $q$ ” [Wb];

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$v_{qs}^s$  é a tensão do estator no eixo “ $q$ ” [V];

$r_s$  é a resistência do estator [ $\Omega$ ];

$x_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$\psi_{mq}^s$  é o fluxo no estator da máquina [Wb];

$\psi_{qs}^s$  é o fluxo no estator no eixo “q” [Wb].

A transformação dos fluxos do estator da máquina no eixo “d” para “qd0” por meio da transformação inversa com “ $\theta$ ” igual a zero (Figura A.12).

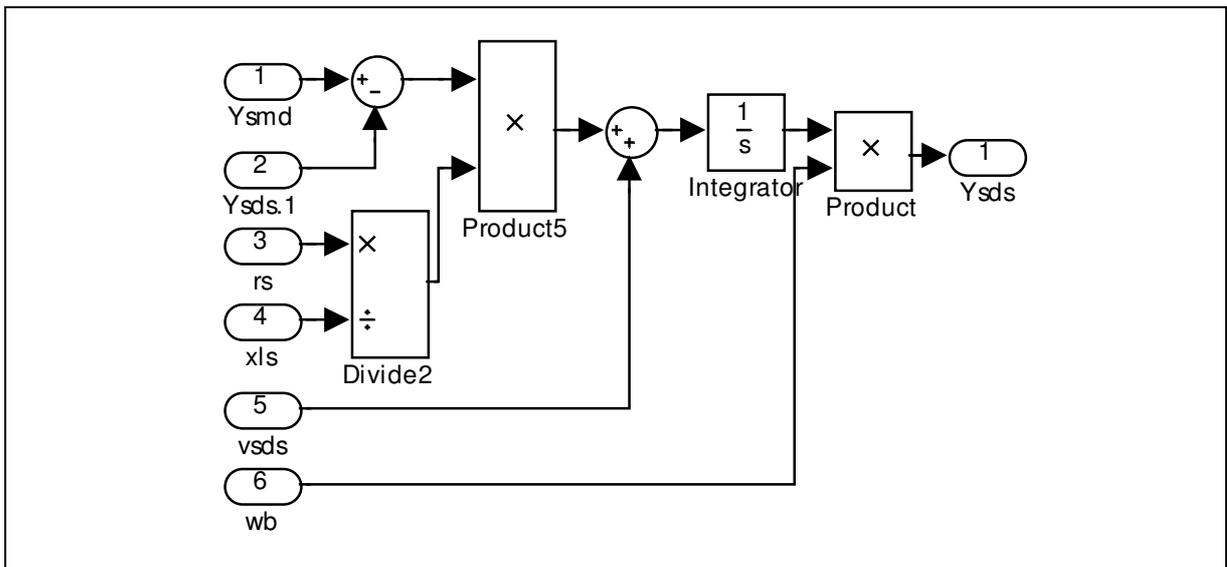


Figura A.12 – Diagrama de bloco do fluxo no eixo “d”

Fonte: Autoria própria

A equação (A.36) apresenta a transformação do fluxo do estator da máquina e o fluxo no eixo “d” à velocidade síncrona.

$$\psi_{ds}^s = \omega_b \int \left\{ v_{ds}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md}^s - \psi_{ds}^s) \right\} dt \quad (\text{A.36})$$

onde:

$\psi_{ds}^s$  é o fluxo no eixo “d” [Wb];

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$v_{ds}^s$  é a tensão do estator no eixo “d” [V];

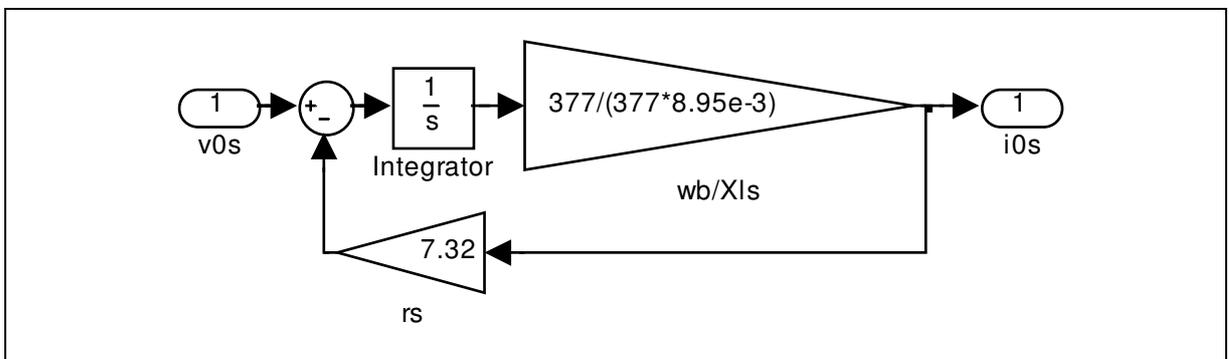
$r_s$  é a resistência do estator [ $\Omega$ ];

$x_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$\psi_{md}^s$  é o fluxo no estator da máquina no eixo “d” [Wb];

$\psi_{ds}^s$  é o fluxo no estator no eixo “d” [Wb].

Na Figura A.13 apresenta a transformação da corrente do estator no eixo “0” por meio da transformação inversa com “ $\theta$ ” igual a zero.



**Figura A.13 - Diagrama de bloco da corrente no eixo “0”**

Fonte: Autoria própria

A equação (A.37) apresenta a transformação da corrente do estator no eixo “0”

$$i_{0s} = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int \{v_{0s} - i_{0s} r_s\} dt \quad (\text{A.37})$$

onde:

$i_{0s}$  é a corrente no eixo “0” [A];

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$x_{ls}$  - é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$v_{0s}$  - é a tensão do estator no eixo “0” [V];

$i_{0s}$  - é a corrente do estator no eixo "0" [A];

$r'_s$  - é a resistência ôhmica do estator [ $\Omega$ ].

Na Figura A.14 apresenta a transformação dos fluxos do rotor referidos ao estator no eixo "q".

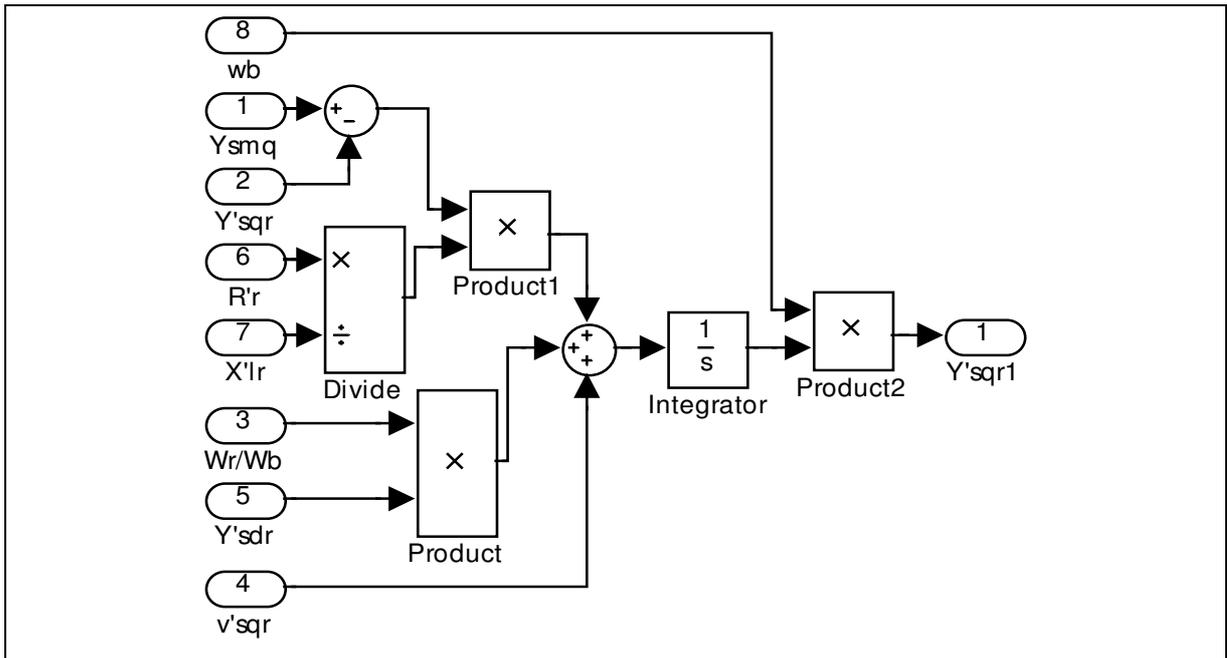


Figura A.14 – Diagrama de bloco do fluxo referido no eixo "q" do rotor

Fonte: Autoria própria

A equação (A.38) apresenta a transformação do fluxo do rotor referido ao estator no eixo "q".

$$\psi_{qr}^{1s} = \omega_b \int \left\{ v_{qr}^{1s} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{dr}^{1s} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq}^s - \psi_{qr}^{1s}) \right\} dt \quad (\text{A.38})$$

onde:

$\psi_{qr}^{1s}$  é o fluxo do rotor no eixo "q" [Wb];

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$v_{qr}^{1s}$  é a tensão no rotor no eixo “q” [V];

$\omega_r$  é a velocidade angular do rotor [rad/s];

$\psi_{dr}^{1s}$  é o fluxo do rotor no eixo “d” [Wb];

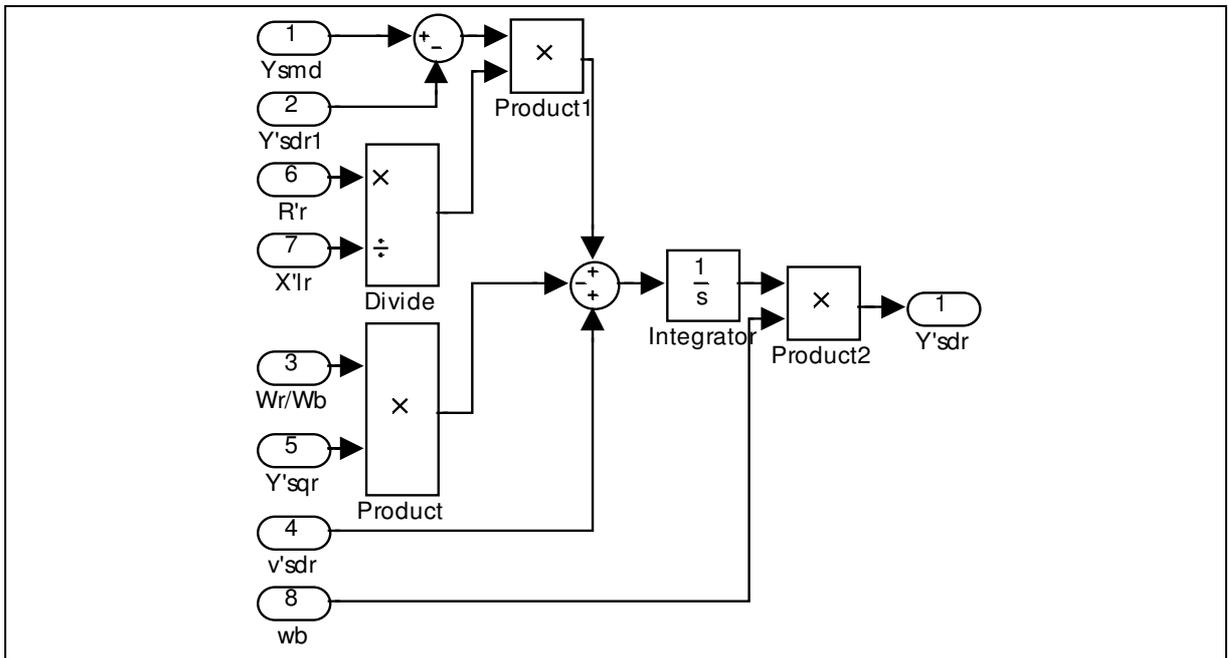
$r_r'$  é a resistência ôhmica do rotor [ $\Omega$ ];

$x_{lr}'$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];

$\psi_{mq}^s$  é o fluxo do estator da máquina [Wb];

$\psi_{qr}^{1s}$  é o fluxo do rotor no eixo “q” [Wb].

Na Figura A.15 apresenta o diagrama de blocos da transformação dos fluxos do rotor da máquina referido ao estator no eixo “d”.



**Figura A.15 – Diagrama de bloco do fluxo referido no eixo “d” do rotor**

**Fonte: Autoria própria**

A equação (A.39) apresenta a transformação do fluxo do rotor referida ao estator no eixo “d”.

$$\psi_{dr}^{1s} = \omega_b \int \left\{ v_{dr}^{1s} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}^{1s} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{md}^s - \psi_{dr}^{1s}) \right\} dt \quad (\text{A.39})$$

onde:

$\psi_{dr}^{1s}$  é o fluxo do rotor no eixo “d” [Wb];

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$v_{dr}^{1s}$  é a tensão do rotor no eixo “d” [V];

$\omega_r$  é a velocidade angular do rotor [rad/s];

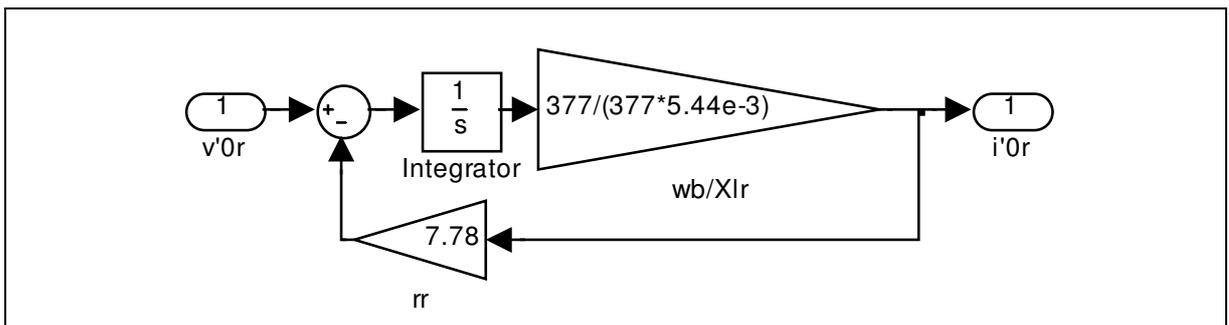
$\psi_{qr}^{1s}$  é o fluxo do rotor no eixo “q” [Wb];

$r'_r$  é a resistência ôhmica do rotor [ $\Omega$ ];

$x'_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];

$\psi_{dr}^{1s}$  é o fluxo do estator da máquina [Wb].

Na Figura A.16 apresenta o diagrama de blocos da transformação da corrente do rotor para o eixo “0”.



**Figura A.16 – Diagrama de bloco da corrente do rotor referida no eixo “0”**

Fonte: Autoria própria

A equação (A.40) apresenta a transformação da corrente do rotor para o eixo “0”.

$$i'_{0r} = \frac{\omega_b}{x'_{lr}} \int \{v'_{0r} - i'_{0r} r'_r\} dt \quad (\text{A.40})$$

onde:

$i'_{0r}$  é a corrente do rotor no eixo “0” [A];

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$x'_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];

$v'_{0r}$  é a tensão do rotor no eixo “0” [V];

$i'_{0r}$  é a corrente do rotor no eixo “0” [A];

$r'_r$  é a resistência ôhmica do rotor [ $\Omega$ ].

Na Figura A.17 apresenta o diagrama de blocos da transformação dos fluxos para a corrente do estator a velocidade síncrona no eixo “q”.

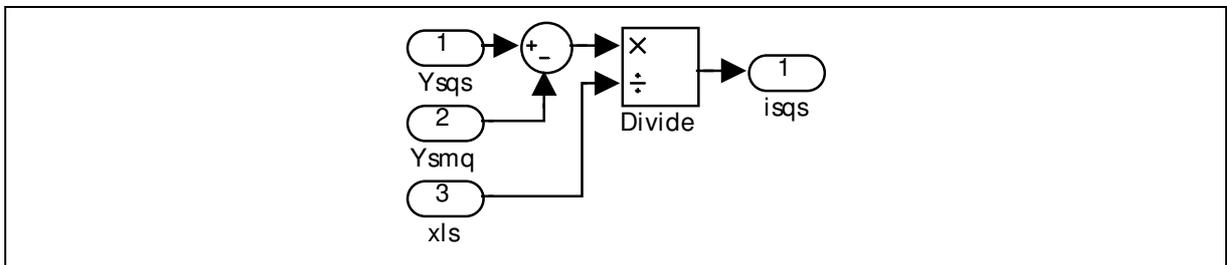


Figura A.17 – Diagrama de bloco de corrente no eixo “q” do estator

Fonte: Autoria própria

A equação (A.41) apresenta a transformação do fluxo e da corrente a velocidade síncrona da máquina no eixo “q”.

$$\psi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + \psi_{mq}^s \quad i_{qs}^s = \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \quad (\text{A.41})$$

onde:

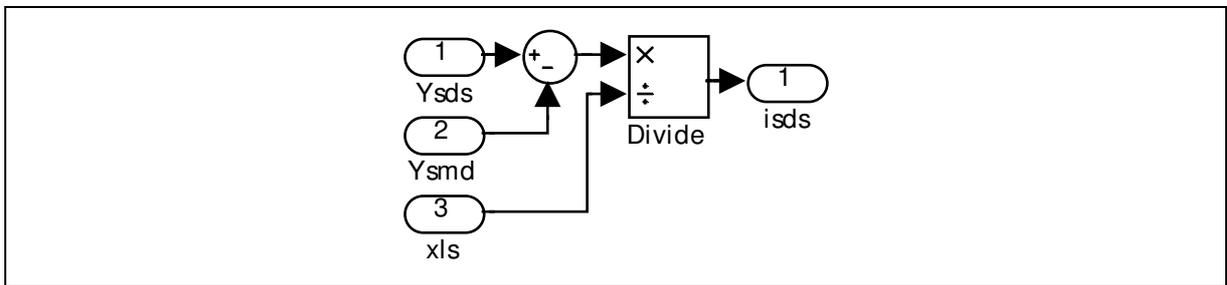
$\psi_{qs}^s$  é o fluxo do estator no eixo “q” [Wb];

$x_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$i_{qs}^s$  é a corrente do estator no eixo “q” [A];

$\psi_{mq}^s$  é o fluxo da máquina no eixo “q” [Wb].

Na Figura A.18 apresenta o diagrama de blocos da transformação da corrente do estator a velocidade síncrona, no eixo “d”.



**Figura A.18 – Diagrama de bloco de corrente no eixo “d” do estator**

Fonte: Autoria própria

A equação (A.42) apresenta a transformação do fluxo e da corrente a velocidade síncrona da máquina no eixo “d”.

$$\psi_{ds}^s = x_{ls} i_{ds}^s + \psi_{md}^s \quad i_{ds}^s = \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} \quad (\text{A.42})$$

onde:

$\psi_{ds}^s$  é o fluxo do estator no eixo “d” [Wb];

$x_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$i_{ds}^s$  é a corrente do estator no eixo “d” [A];

$\psi_{md}^s$  é o fluxo da máquina no eixo “d” [Wb].

Na Figura A.19 apresenta o diagrama de blocos da transformação dos fluxos para a corrente do rotor referida ao estator no eixo “q”.

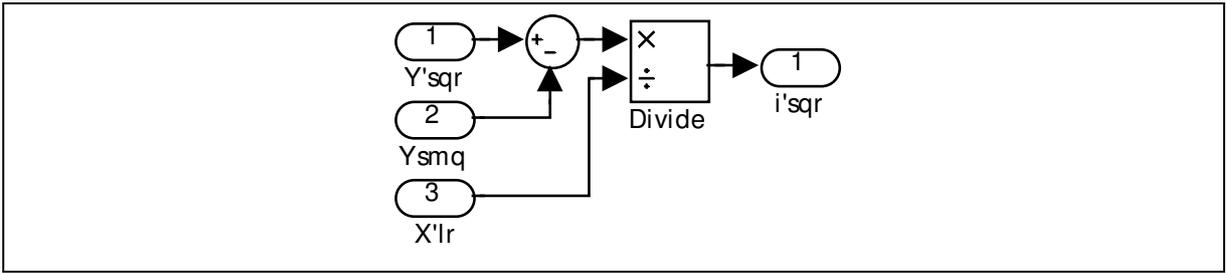


Figura A.19 – Diagrama de bloco de corrente referida no eixo “q” do rotor

Fonte: Autoria própria

A equação (A.43) apresenta a transformação dos fluxos e da corrente do rotor referido ao estator da máquina no eixo “q”.

$$\psi_{qr}^{1s} = x'_{lr} i_{qr}^{1s} + \psi_{mq}^s \quad i_{qr}^{1s} = \frac{\psi_{qr}^{1s} - \psi_{mq}^s}{x'_{lr}} \quad (\text{A.43})$$

onde:

$\psi_{qr}^{1s}$  é o fluxo do estator no eixo “q” [Wb];

$x'_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];

$i_{qr}^{1s}$  é a corrente do estator no eixo “q” [A];

$\psi_{mq}^s$  é o fluxo da máquina no eixo “q” [Wb].

Na Figura A.20 apresenta o diagrama de blocos da transformação dos fluxos do rotor da máquina para a corrente do rotor referido ao estator no eixo “d”.

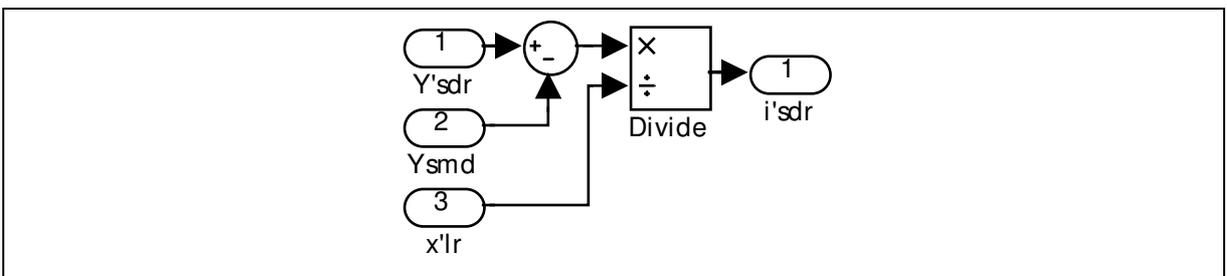


Figura A.20 – Diagrama de bloco de corrente referida no eixo “d” do rotor

Fonte: Autoria própria

A equação (A.44) apresenta a transformação do fluxo e da corrente do rotor da máquina referida ao estator no eixo “d”.

$$\psi'_{dr} = x'_{lr} i'_{dr} + \psi_{md} \quad i'_{dr} = \frac{\psi'_{dr} - \psi_{md}}{x'_{lr}} \quad (\text{A.44})$$

onde:

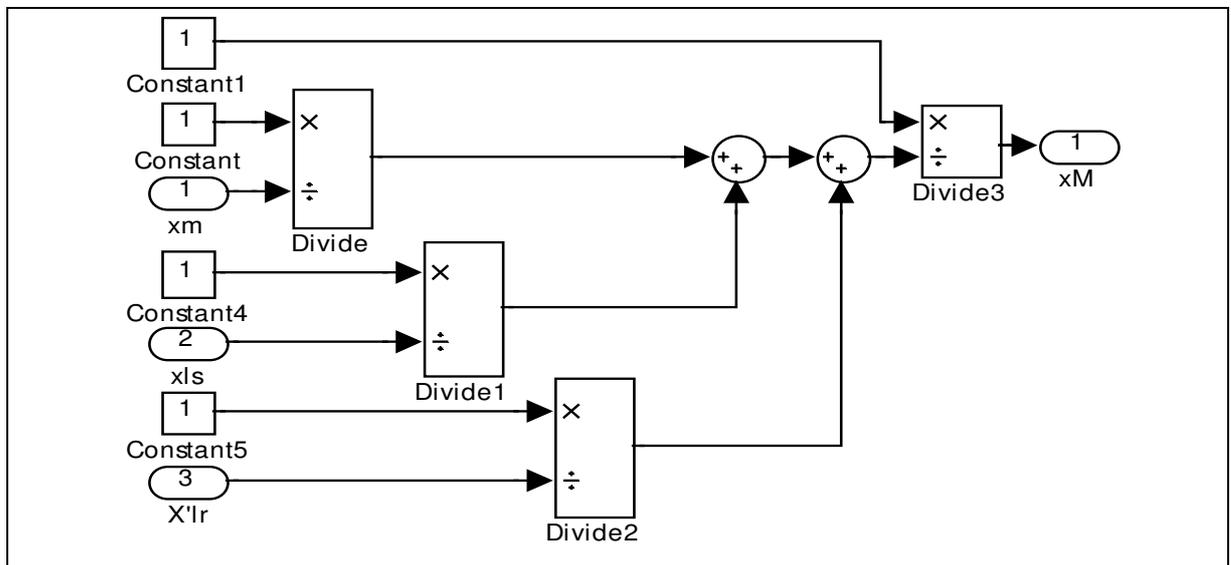
$\psi'_{dr}$  é o fluxo do rotor no eixo “d” [Wb];

$x'_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ];

$i'_{dr}$  é a corrente do rotor no eixo “d” [A];

$\psi_{md}$  é o fluxo da máquina no eixo “d” [Wb].

Na Figura A.21 apresenta o diagrama de blocos da transformação da reatância da máquina.



**Figura A.21 – Reatância da máquina**

Fonte: Autoria própria

A equação (A.45) apresenta a transformação da reatância da máquina.

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}} \quad (\text{A.45})$$

onde:

$x_M$  é a reatância da máquina [Wb];

$x_m$  é a reatância da magnetizante [Wb]

$x_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$x'_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ].

Na Figura A.22 apresenta o diagrama de blocos da transformação dos fluxos e fluxos referidos para fluxo da máquina no eixo “ $q$ ”.

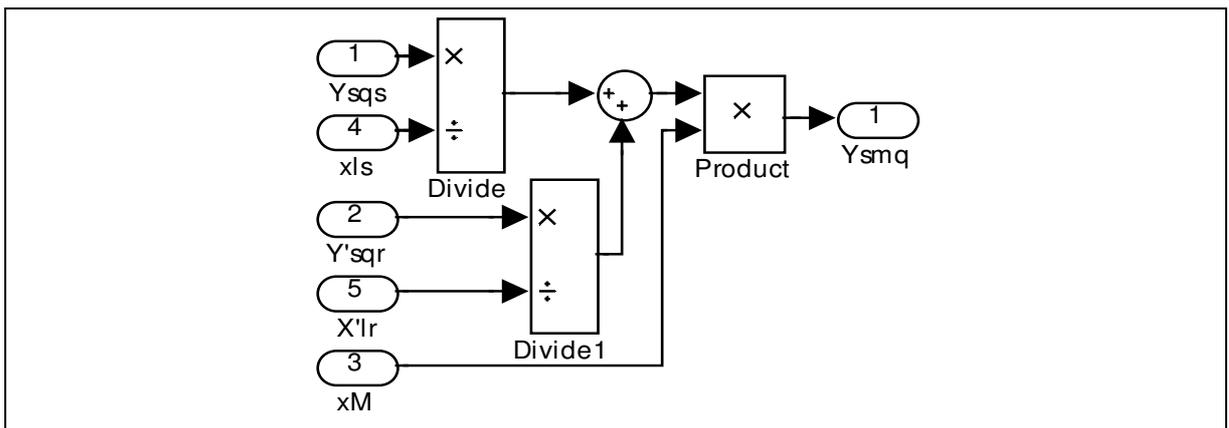


Figura A.22 – Diagrama de bloco do fluxo da máquina no eixo “ $q$ ”

Fonte: Autoria própria

A equação (A.46) apresenta a transformação para o fluxo da máquina no eixo “ $q$ ” a velocidade síncrona.

$$\psi_{mq}^s = x_M \left( \frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}^{1s}}{x'_{lr}} \right) \quad (\text{A.46})$$

onde:

$\psi_{mq}^s$  é o fluxo da máquina no eixo “ $q$ ” [Wb];

$x_M$  é a reatância da máquina [Wb];

$\psi_{qs}^s$  é o fluxo do estator no eixo “q” [Wb];

$x_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$\psi_{qr}^{1s}$  é o fluxo do rotor no eixo “q” [Wb];

$x'_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ].

Na Figura A.23 apresenta o diagrama de blocos da transformação dos fluxos, fluxos referidos para o fluxo da máquina no eixo “d” a velocidade síncrona.

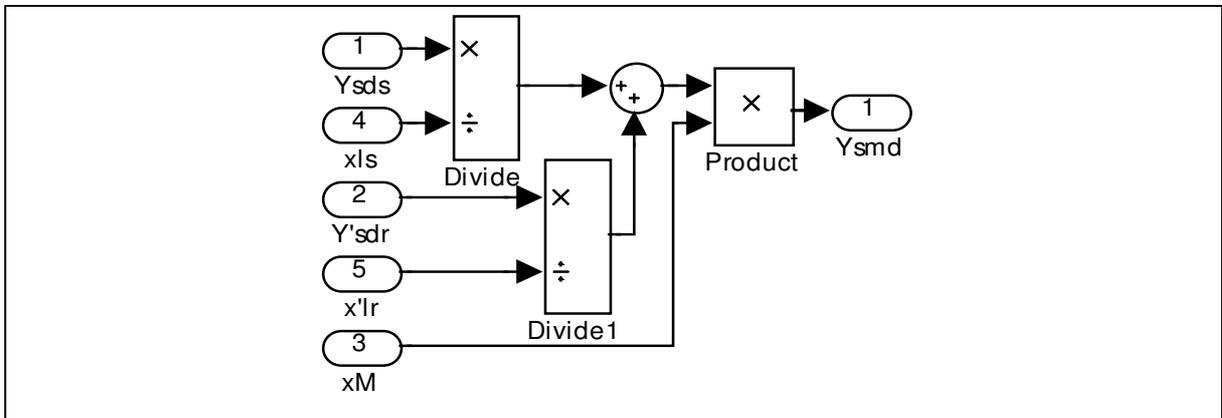


Figura A.23 – Diagrama de bloco do fluxo da máquina no eixo “d”

Fonte: Autoria própria

A equação (A.47) apresenta a transformação para o fluxo da máquina no eixo “d” a velocidade síncrona.

$$\psi_{md}^s = x_M \left( \frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}^{1s}}{x'_{lr}} \right) \quad (\text{A.47})$$

onde:

$\psi_{md}^s$  é o fluxo da máquina no eixo “d” [Wb];

$x_M$  é a reatância da máquina [Wb];

$\psi_{ds}^s$  é o fluxo do estator no eixo “d” [Wb];

$x_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator [ $\Omega$ ];

$\psi_{dr}^{s}$  é o fluxo do rotor no eixo “d” [Wb];

$x'_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor [ $\Omega$ ].

#### A1.5.11 Diagramas de blocos de torque, velocidade e ângulo (Figura A.24)

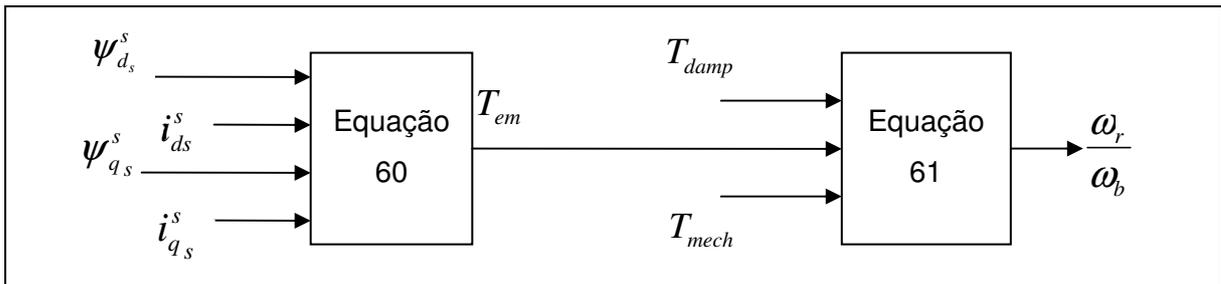


Figura A.24 - Torque, velocidade e ângulo.

Fonte: Ong (1997)

##### A1.5.11.1 O torque eletromagnético

Na Figura A.25 apresenta o diagrama de blocos da transformação dos fluxos e correntes do eixo “qd0”, considerando os polos e velocidade angular da máquina para torque eletromagnético.

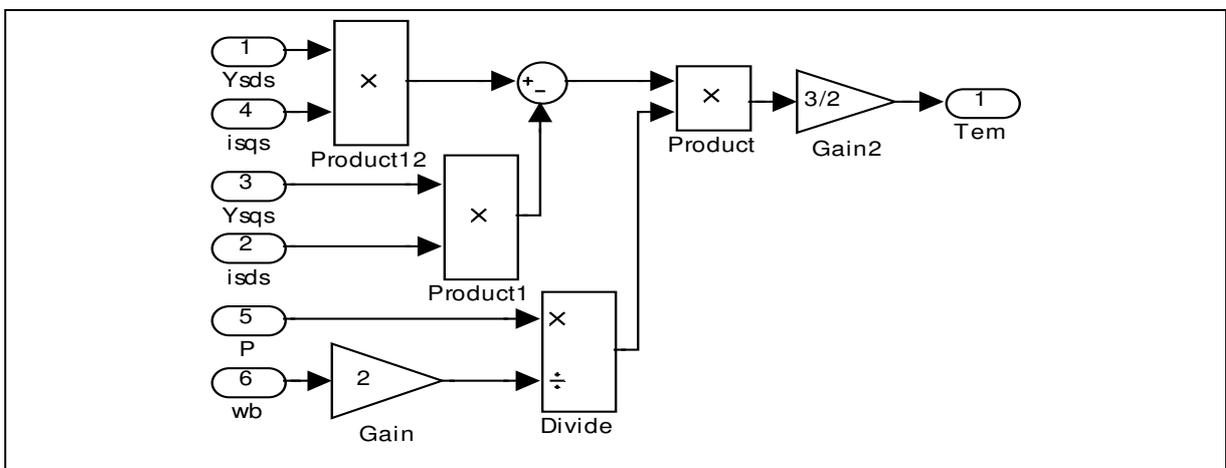


Figura A.25 – Diagrama de bloco do torque eletromagnético da máquina

Fonte: Autoria própria

A equação (A.48) apresenta a o torque eletromagnético em termos dos fluxos e das correntes do estator concatenados com eixo da máquina “ $qd0$ ”.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (\text{A.48})$$

onde:

$T_{em}$  é o torque eletromagnético da máquina [Nm];

$P$  é o número de polos da máquina;

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$\psi_{ds}^s$  é o fluxo do estator no eixo “ $d$ ” [Wb];

$\psi_{qs}^s$  é o fluxo do estator no eixo “ $q$ ” [Wb];

$i_{ds}^s$  é a corrente do estator no eixo “ $d$ ” [A].

Na Figura A.26 apresenta o diagrama de blocos da transformação do torque eletromagnético, mecânico e de amortecimento para velocidade angular.

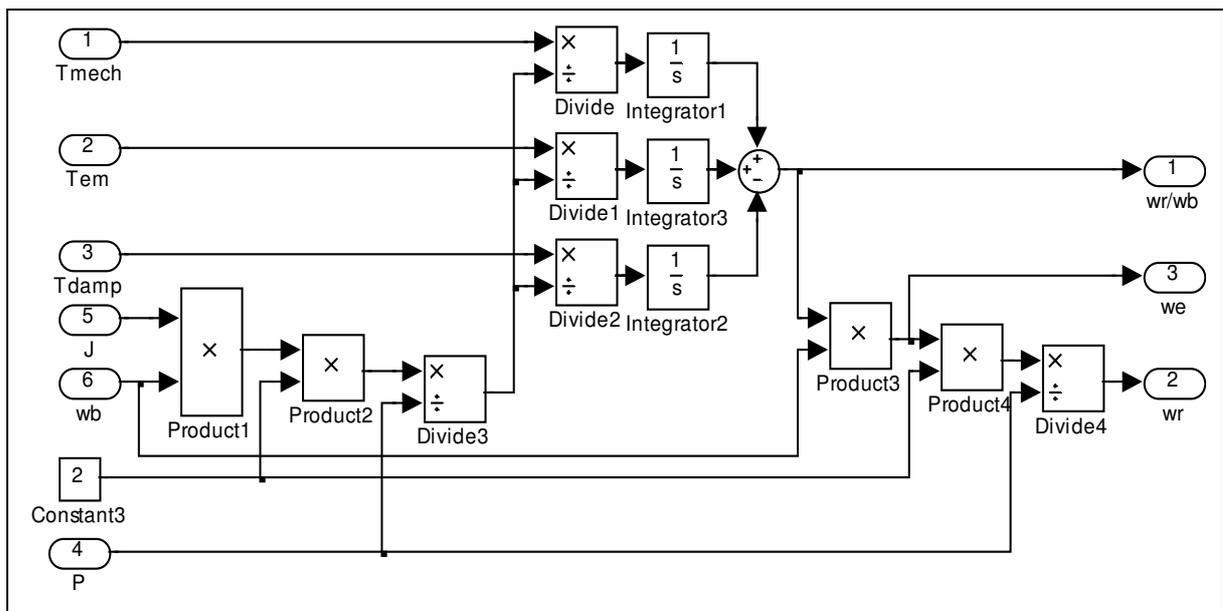


Figura A.26 – Diagrama de bloco da velocidade angular  $\omega_r / \omega_b$

Fonte: Autoria própria

A equação (A.49) apresenta os toques do rotor por integração da velocidade  $\omega_r / \omega_b$ .

$$\frac{2J\omega_b}{P} \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \text{ Nm} \quad (\text{A.49})$$

onde:

$J$  é o momento de inércia [Kg.m<sup>2</sup>];

$\omega_b$  é a velocidade angular ( $=2\pi f$ ) [rad/s];

$\omega_r$  é a velocidade angular do rotor [rad/s];

$T_{em}$  é o torque eletromagnético da máquina [Nm];

$T_{mech}$  é o torque mecânico [Nm];

$T_{damp}$  é o torque de amortecimento [Nm].

Potência	1 [CV]
Resistência do estator	7,32 [ $\Omega$ ]
Resistência do rotor	2,78 [ $\Omega$ ]
Indutância de dispersão do enrolamento do estator	$8,95 \times 10^{-3}$ [H]
Indutância de dispersão do enrolamento do rotor	$5,44 \times 10^{-3}$ [H]
Indutância de magnetização	$1,41 \times 10^{-1}$ [H]
Momento de inércia do motor	$2,71 \times 10^{-3}$ [kg.m <sup>2</sup> ]
Velocidade síncrona	188,49 [rad/s]
Escorregamento nominal	3,8 [%]
Torque nominal	4,1 [Nm]

Quadro A.1 - Parâmetros do MIT, IV polos, 60 Hz, 220/380 V

Fonte: Goedtel (2007)

### A1.5.12 Sistema de engrenagens e uma carga representativa de um processo de torneamento

Na Figura A.27 apresenta um sistema de transmissão de potência do motor por engrenagens para um processo de torneamento, considerando os números de dentes das engrenagens, momentos de inércia, coeficientes de atrito viscoso, coeficiente de amortecimento viscoso e velocidade de giro e angular do conjunto.

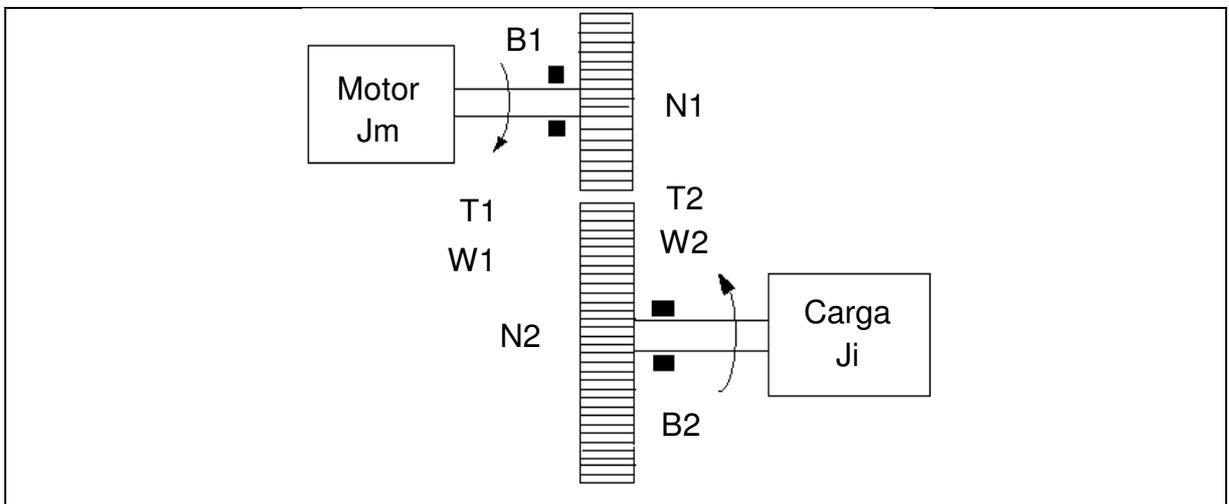


Figura A.27 - Sistema motor, engrenagens e carga

Fonte: Krishnan (2001)

Número de dentes $N1$	100
Número de dentes $N2$	500
Relação de dentes (fornecido)	5:1
Momento de inércia do motor $J_1$	0,00271 [kg.m <sup>2</sup> ]
Momento de inércia da carga $J_i$	0,01355 [kg.m <sup>2</sup> ]
$D_1$ é o coeficiente de atrito viscoso do motor	0,01 [Nm.s/rad]
$D_i$ é o coeficiente de atrito viscoso da máquina	0,01 [Nm.s/rad]

Quadro A.2 - Parâmetros adotados para o sistema

Fonte: Autoria própria

### A1.5.12.1 Equações para refletir todas as impedâncias para $\theta$

A equação (A.50) apresenta a transformação para refletir todas as impedâncias para  $\theta_{1(s)}$ .

$$T_{1(s)} = \theta_{1(s)} (J_{es}^2 + D_{es}) \quad (\text{A.50})$$

onde:

$T_{1(s)}$  é o torque no eixo de entrada da engrenagem motora [Nm];

$\theta_{1(s)}$  é o ângulo de giro [rad/s];

$J_{es}^2$  é o momento de inércia [Kg.m<sup>2</sup>];

$D_{es}$  é o coeficiente de amortecimento viscoso para sistema mecânico em rotação [Nm.s/rad].

A equação (A.51) apresenta o torque refletido das impedâncias mecânicas de saída para o eixo de entrada considerando o momento de inércia, coeficiente de amortecimento, velocidade angular e ângulo de giro.

$$T_{1(s)} = \theta_{1(s)} (J_{es}^2 \omega_{rm} + D_{es} \omega_{rm}) \quad (\text{A.51})$$

onde:

$T_{1(s)}$  é o torque no eixo de entrada da engrenagem motora [Nm];

$\theta_{1(s)}$  é o ângulo de giro [rad/s];

$J_{es}^2$  é o momento de inércia [Kg.m<sup>2</sup>];

$\omega_{rm}$  é a velocidade angular do motor [rad/s];

$D_{es}$  é o coeficiente de amortecimento viscoso para sistema mecânico em rotação em [Nm.s/rad].

A equação (A.52) apresenta a transformação da impedância  $J_1$  do eixo de entrada para o eixo de saída onde as impedâncias refletidas pelo fator  $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$ .

$$J_e = J_1 + J_i \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (\text{A.52})$$

onde:

$J_e$  é o momento de inércia do conjunto (motor e engrenagens) [Kg.m<sup>2</sup>];

$J_1$  é o momento de inércia do motor [Kg.m<sup>2</sup>];

$J_i$  é o momento de inércia na carga [Kg.m<sup>2</sup>];

$N_1$  é o número de dentes da engrenagem motora;

$N_2$  é o número de dentes da engrenagem movida.

A equação (A.53) apresenta a transformação da impedância  $D_1$  do eixo de entrada para o eixo de saída onde as impedâncias refletidas pelo fator  $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$ .

$$D_e = D_1 + D_i \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (\text{A.53})$$

onde:

$D_e$  é o coeficiente de atrito viscoso do conjunto [Nm.s/rad];

$D_1$  é o coeficiente de atrito viscoso do motor [Nm.s/rad];

$D_i$  é o coeficiente de atrito viscoso da máquina [Nm.s/rad];

$N_1$  é o número de dentes da engrenagem motora;

$N_2$  é o número de dentes da engrenagem movida.

A1.5.13 Diagrama de blocos do motor de indução trifásico gaiola de esquilo

O diagrama foi elaborado a partir das equações matemáticas apresentadas anteriormente e acoplada a um sistema de engrenagens de um processo de torneamento (Figura A.28) utilizando os parâmetros dos Quadros A.1 e A.2.

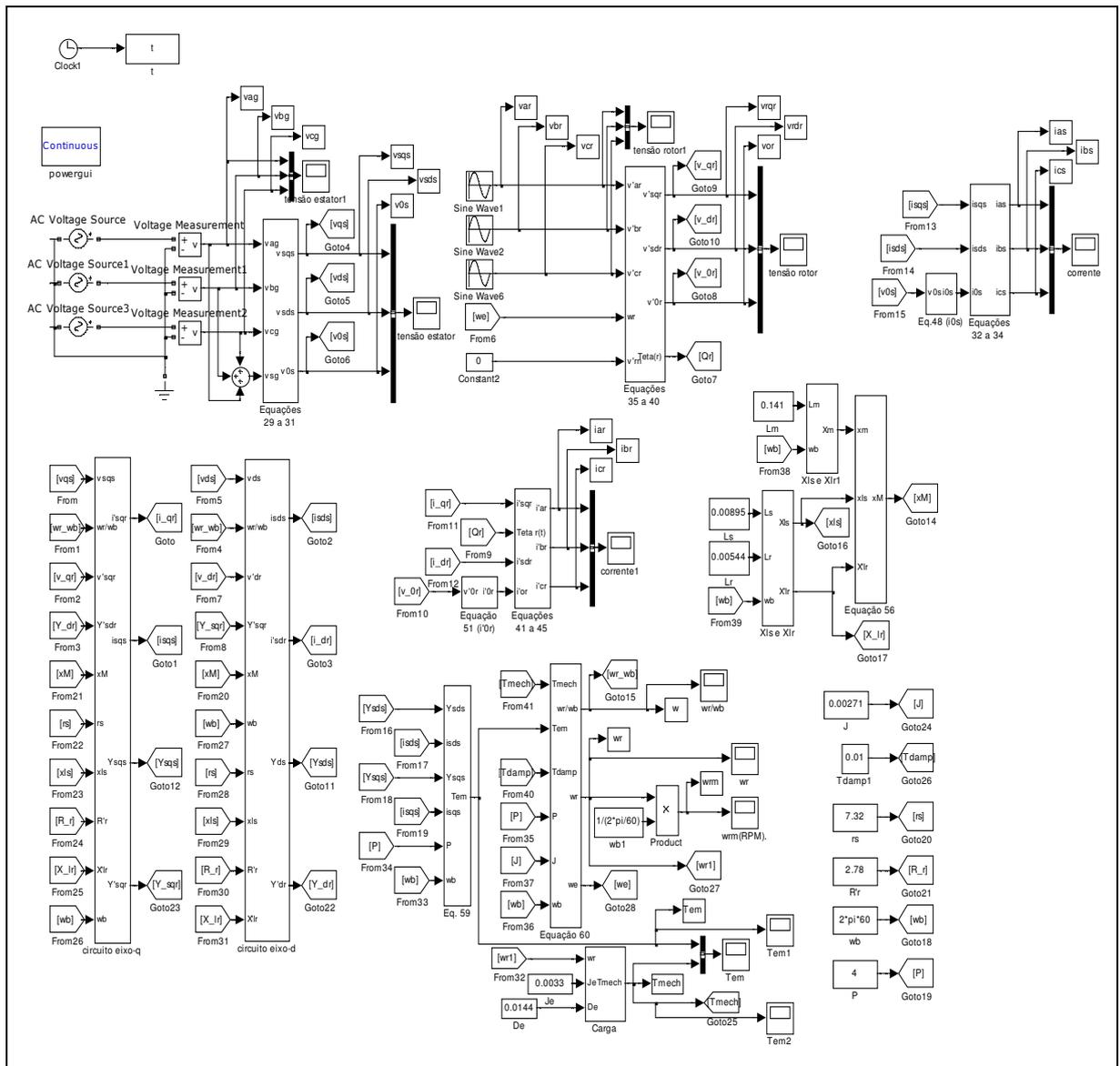


Figura A.28 – Diagrama de blocos do motor de 1 CV / 220 V

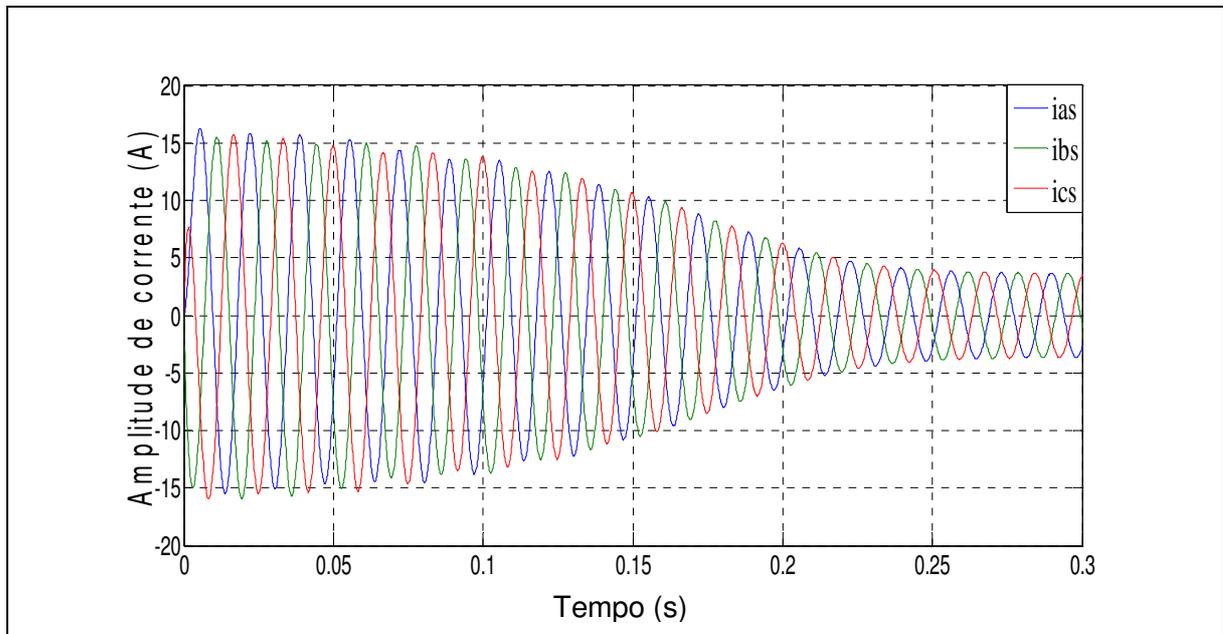
Fonte: Autoria própria

## A1.6 Resultados obtidos da simulação (*MatlabSimulink*) do motor

O objetivo da obtenção das curvas através da simulação do motor permitirá avaliar a influência ou não da qualidade de energia no acabamento superficial de uma peça submetida a um processo de torneamento.

A condição de alimentação imposta ao motor, inicialmente equilibrada e posteriormente desequilibrada (+10% na fase A e -10% na fase B).

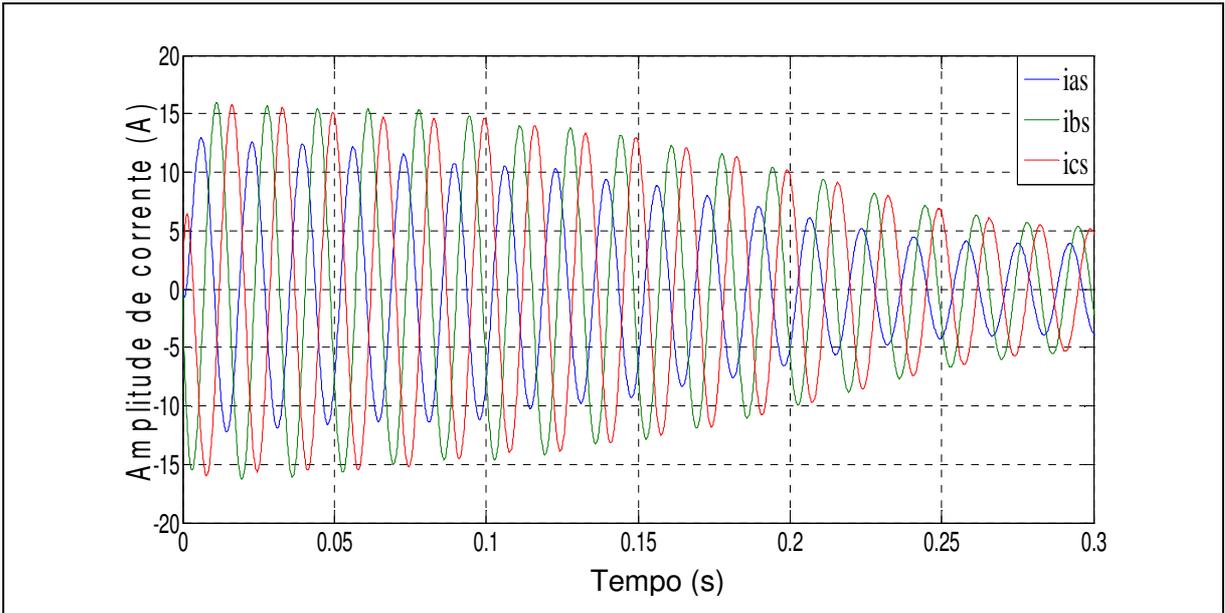
A Figura A.29 mostra as curvas de correntes do estator ( $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  e  $i_{cs}$ ) na condição de tensão de alimentação equilibrada.



**Figura A.29 - Curvas de corrente do estator - alimentação equilibrada**

**Fonte: Autoria própria**

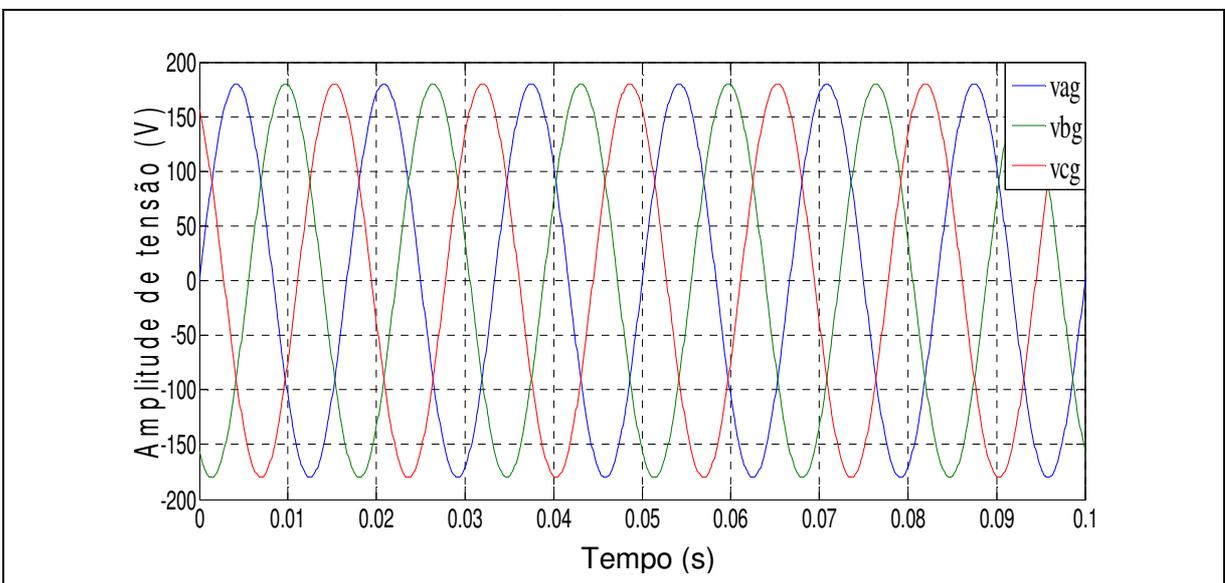
A Figura A.30 mostra as curvas de correntes do estator ( $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  e  $i_{cs}$ ) na condição de tensão de alimentação desequilibrada com redução da amplitude da corrente  $i_{as}$  (-10%) e aumento da amplitude de corrente  $i_{bs}$  (+10%).



**Figura A.30 - Curvas de corrente do estator - alimentação desequilibrada**

Fonte: Autoria própria

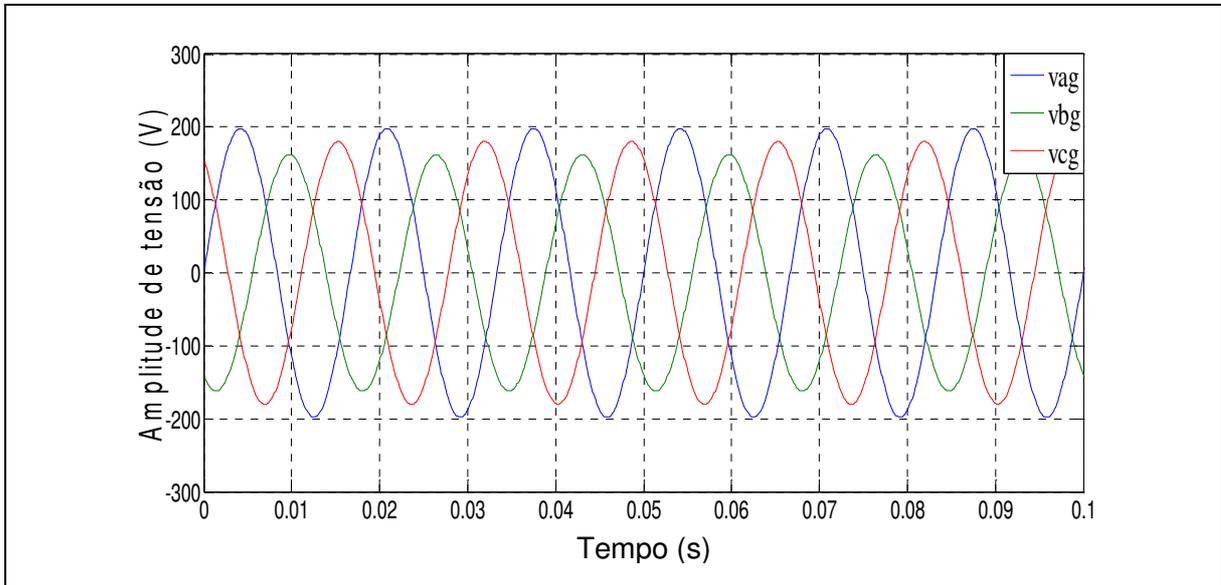
A Figura A.31 mostra as curvas de tensões do estator ( $v_{ag}$ ,  $v_{bg}$  e  $v_{cg}$ ) na condição de alimentação equilibrada.



**Figura A.31 - Curvas de tensão do estator - alimentação equilibrada**

Fonte: Autoria própria

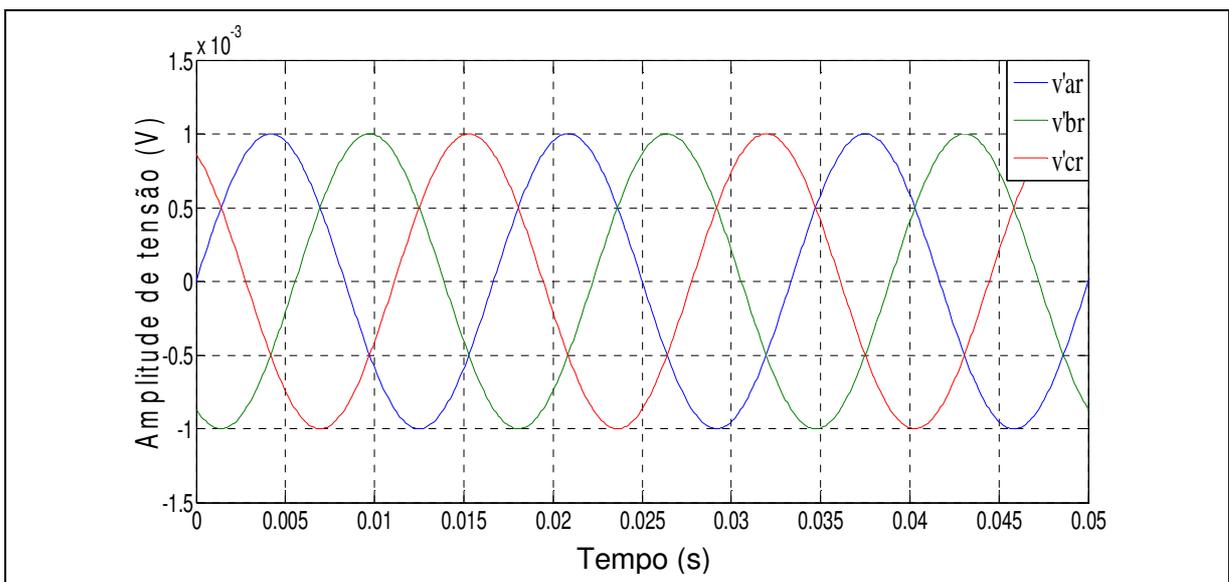
A Figura A.32 mostra as curvas de tensões do estator ( $v_{ag}$ ,  $v_{bg}$  e  $v_{cg}$ ) na condição de alimentação desequilibrada com redução da amplitude de tensão  $v_{bg}$  (-10%) e aumento da amplitude de tensão  $v_{ag}$  (+10%).



**Figura A.32 - Curvas de tensão do estator - alimentação desequilibrada**

Fonte: Autoria própria

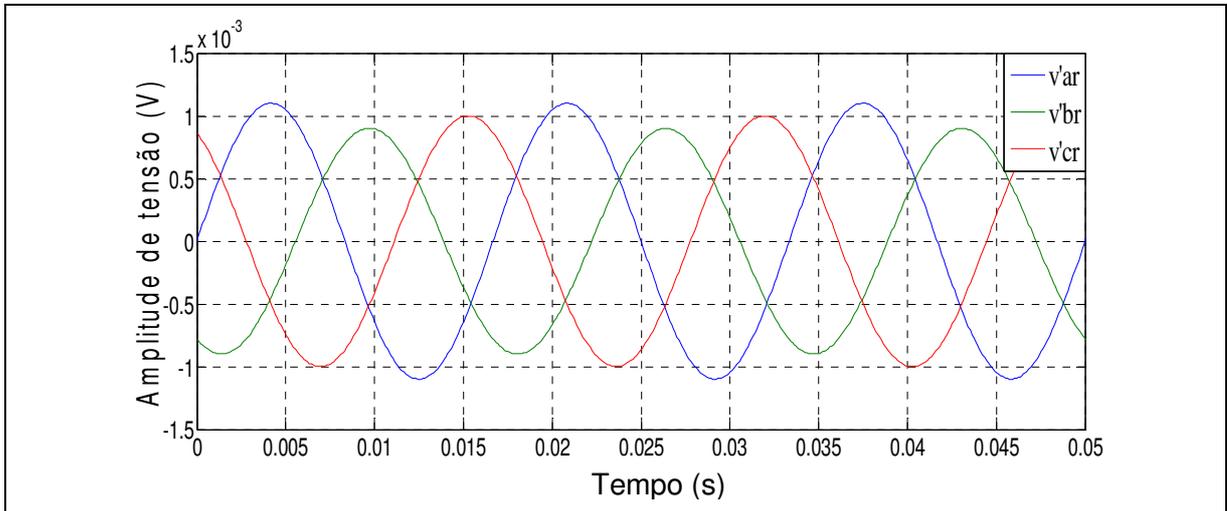
A Figura A.33 mostra as curvas de tensões do rotor ( $v'_{ar}$ ,  $v'_{br}$  e  $v'_{cr}$ ) na condição de alimentação equilibrada.



**Figura A.33 - Curvas de tensão do rotor - alimentação equilibrada**

Fonte: Autoria própria

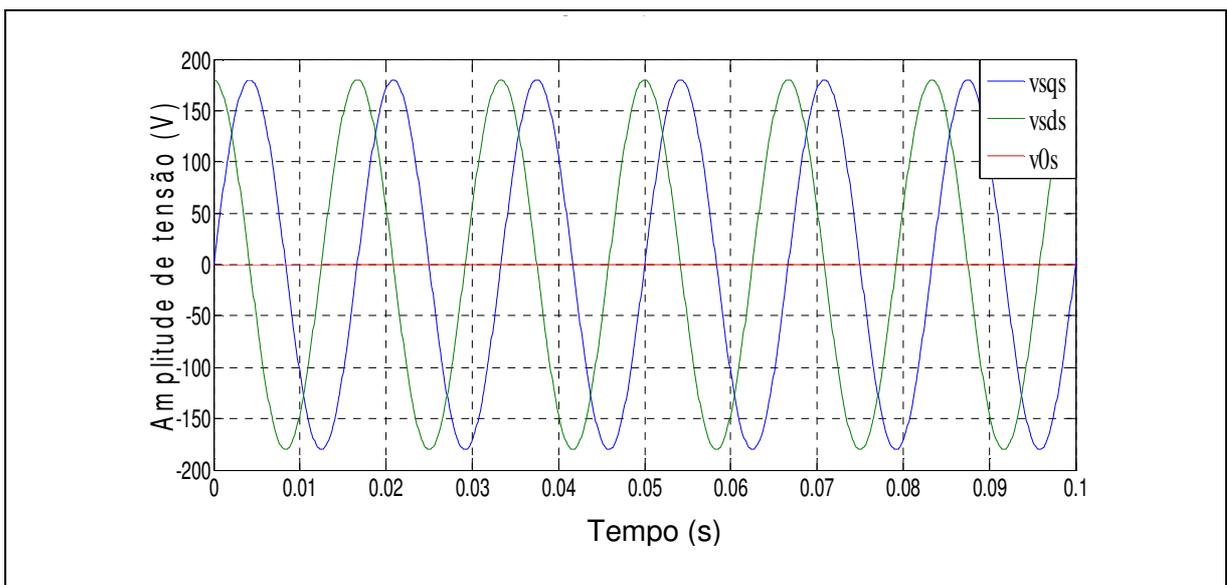
A Figura A.34 mostra as curvas de tensões no rotor ( $v'_{ar}$ ,  $v'_{br}$  e  $v'_{cr}$ ) na condição de alimentação desequilibrada com redução da amplitude de tensão  $v'_{br}$  (-10%) e aumento da amplitude de tensão  $v'_{ar}$  (+10%).



**Figura A.34 - Curvas de tensão do rotor - alimentação desequilibrada**

Fonte: Autoria própria

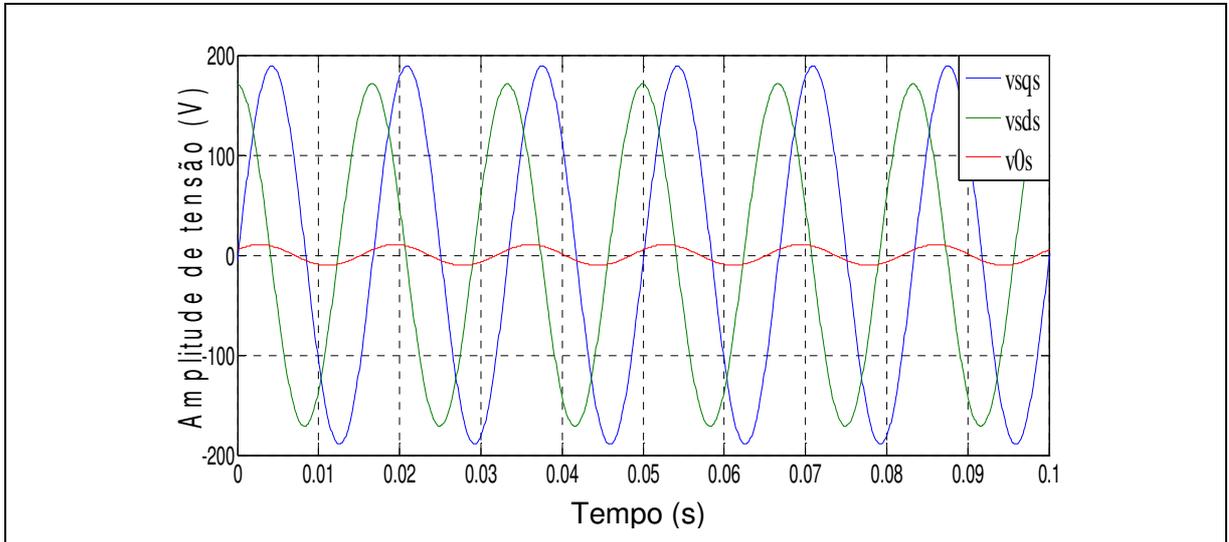
A Figura A.35 mostra as curvas de tensões no eixo “ $qd0$ ” do estator ( $v_{sq}$ ,  $v_{sd}$  e  $v_0$ ) na condição de alimentação equilibrada ( $v_{sq}$ ,  $v_{sd}$  defasadas de  $90^\circ$  e  $v_0$  zero).



**Figura A.35 - Curvas de tensões de “abc” para “qd0” do estator – alimentação equilibrada**

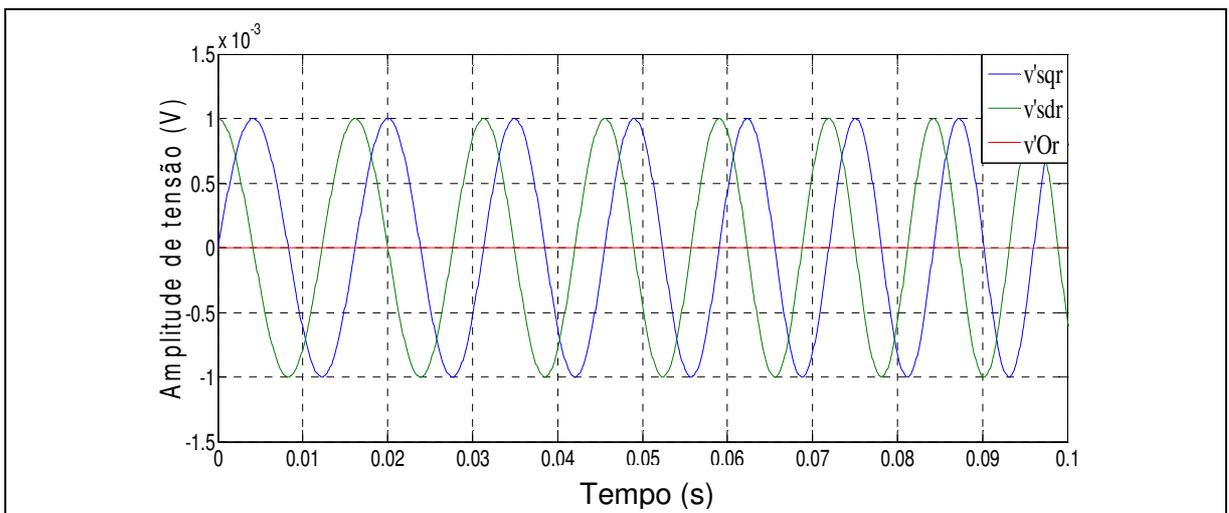
Fonte: Autoria própria

A Figura A.36 mostra as curvas de tensões no eixo “ $qd0$ ” do estator ( $vsqs$ ,  $vsds$  e  $v0s$ ) na condição de alimentação desequilibrada ( $vsqs$ ,  $vsds$  defasadas de  $90^\circ$  e  $v0s$  diferente zero).



**Figura A.36 - Curvas de tensões de “ $abc$ ” para “ $qd0$ ” do estator – alimentação desequilibrada**  
**Fonte: Autoria própria**

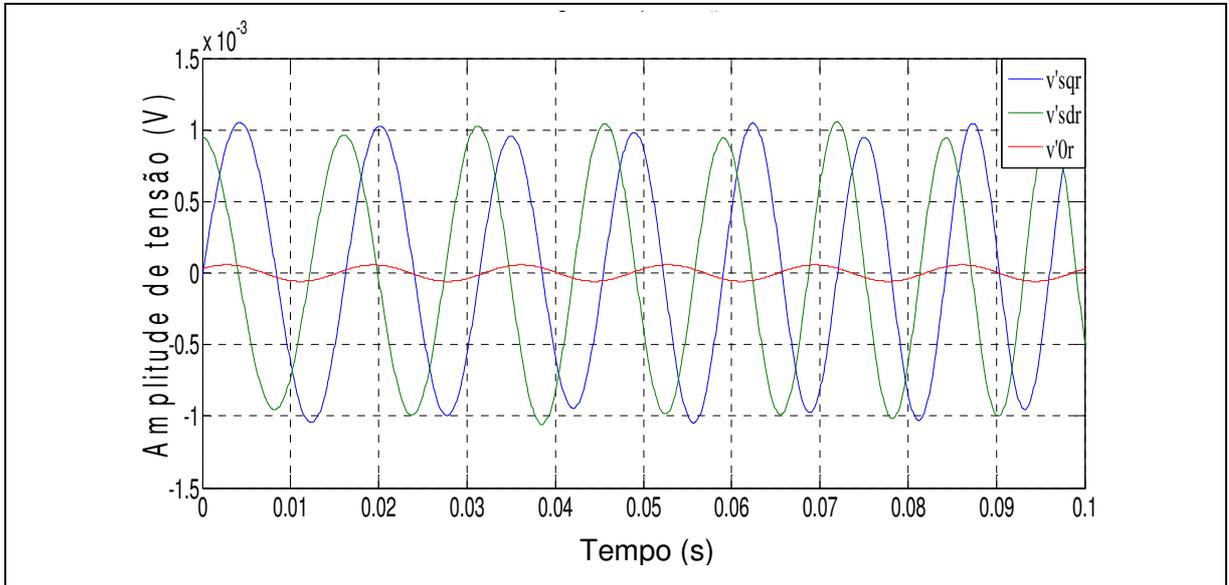
A Figura A.37 mostra as curvas de tensões no eixo “ $qd0$ ” do rotor ( $vsqs$ ,  $vsds$  e  $v0s$ ) na condição de alimentação equilibrada ( $vsqs$ ,  $vsds$  defasadas de  $90^\circ$  e  $v0s$  zero).



**Figura A.37 - Curvas de tensões de “ $abc$ ” para “ $qd0$ ” do rotor – alimentação Equilibrada**

**Fonte: Autoria própria**

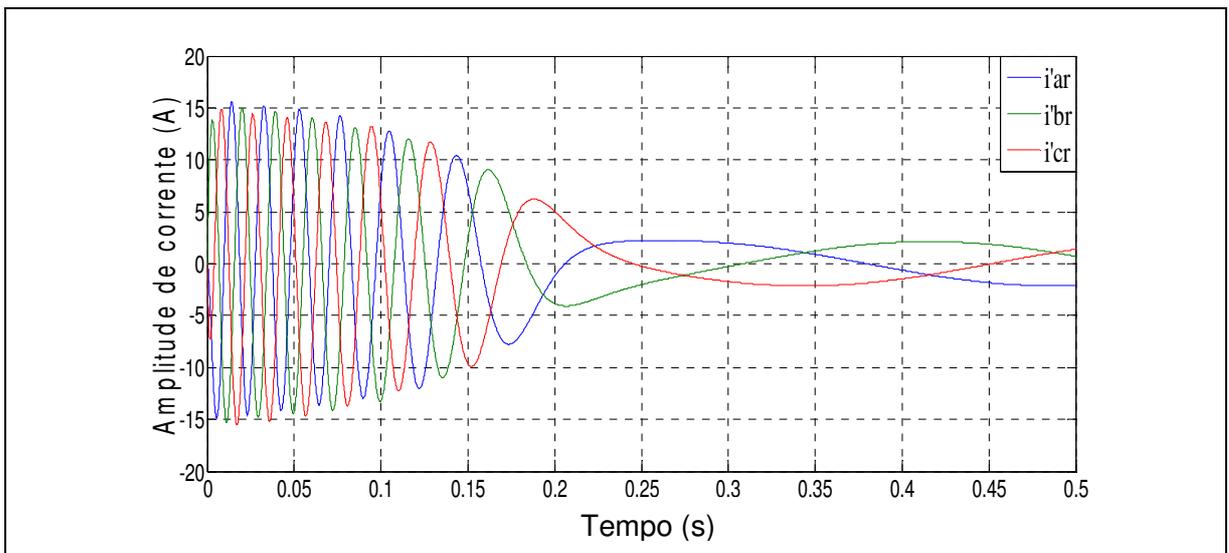
A Figura A.38 mostra as curvas de tensões no eixo “ $qd0$ ” do rotor ( $v_{sq}$ ,  $v_{sd}$  e  $v_0$ ) na condição de alimentação desequilibrada ( $v_{sq}$ ,  $v_{sd}$  defasadas de  $90^\circ$  e  $v_0$  diferente de zero).



**Figura A.38 - Curvas de tensões de “ $abc$ ” para “ $qd0$ ” do rotor – alimentação desequilibrada**

Fonte: Autoria própria

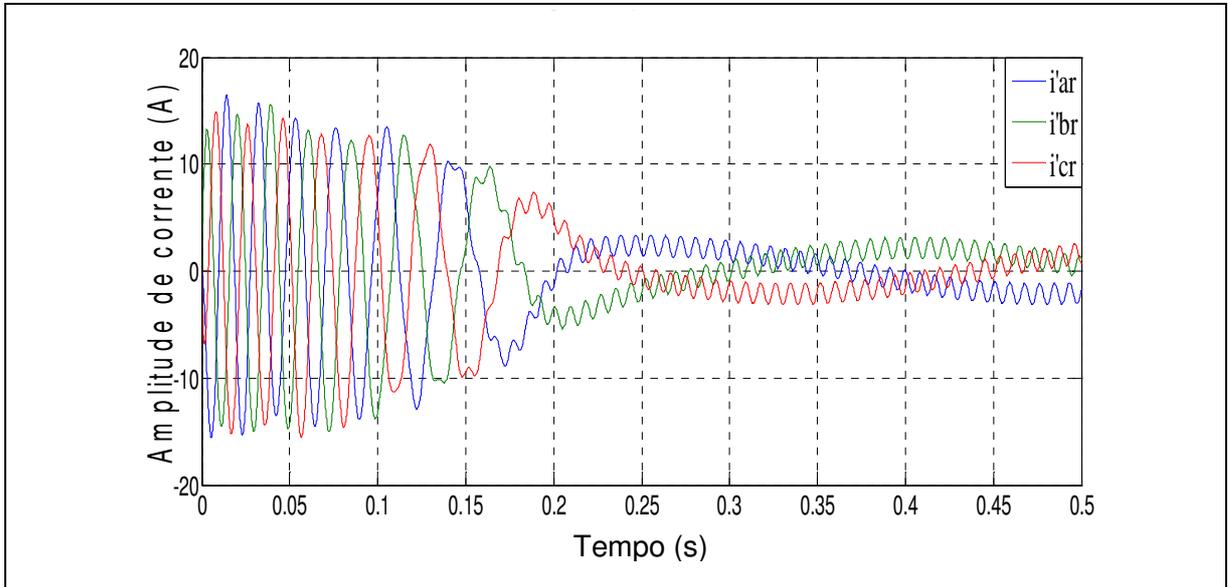
A Figura A.39 mostra as curvas de correntes no eixo “ $qd0$ ” referidas ao rotor ( $i'_{ar}$ ,  $i'_{br}$  e  $i'_{cr}$ ) na condição de alimentação equilibrada.



**Figura A.39 - Curvas de corrente no eixo “ $qd0$ ” referidas ao rotor – alimentação equilibrada**

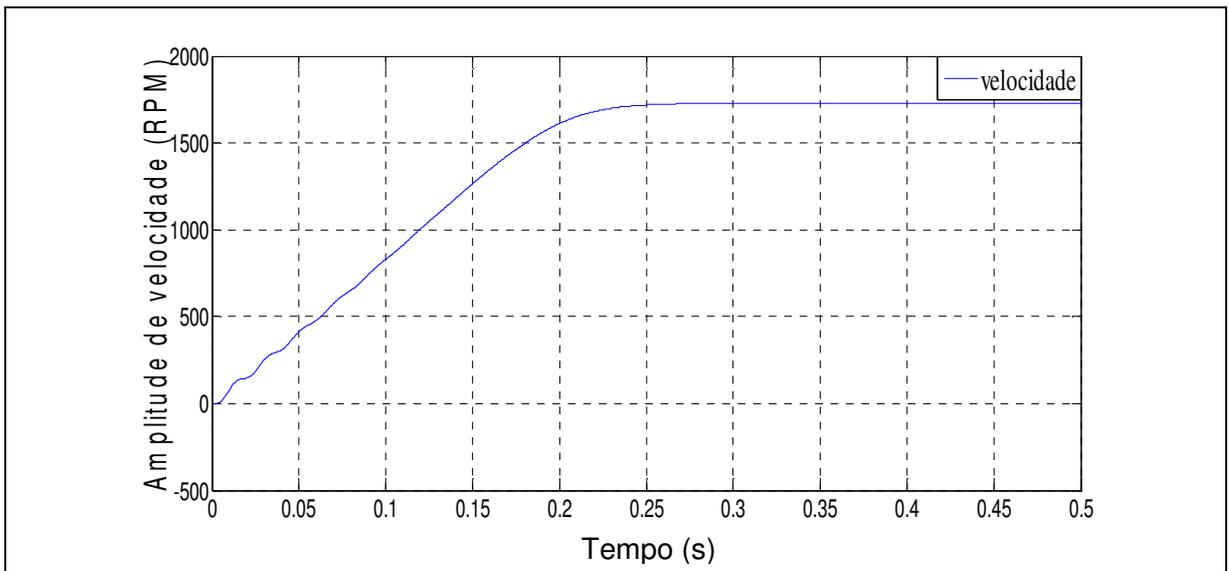
Fonte: Autoria própria

A Figura A.40 mostra as curvas de correntes no eixo “ $qd0$ ” referidas ao rotor ( $i'_{ar}$ ,  $i'_{br}$  e  $i'_{cr}$ ) na condição de alimentação desequilibrada gerando oscilações nas curvas.



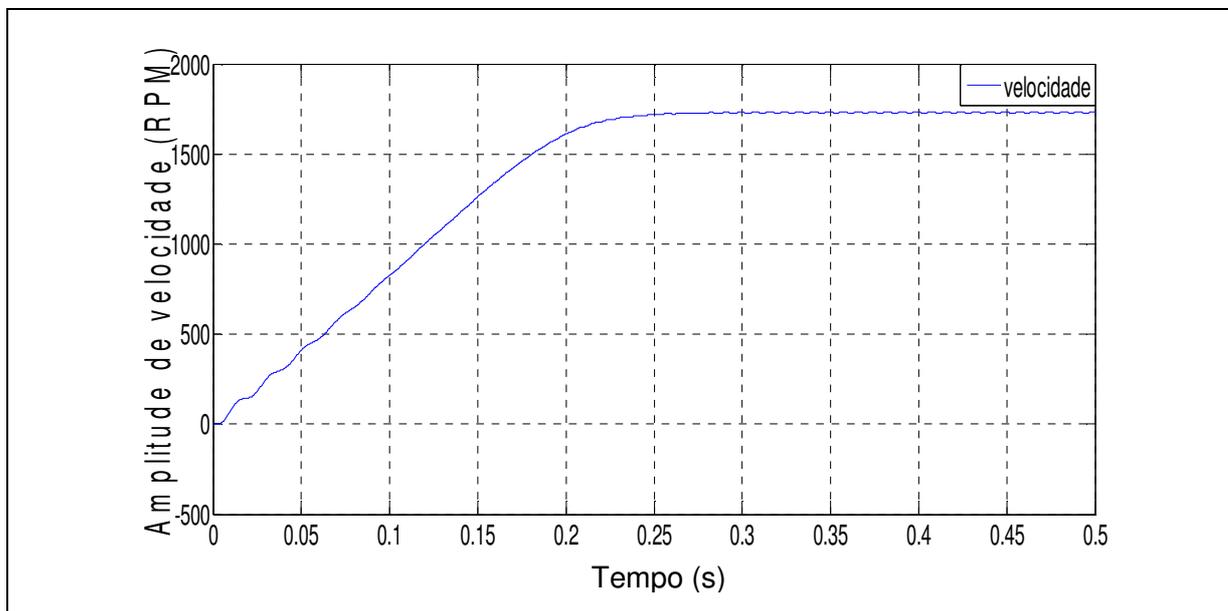
**Figura A.40 – Curvas de corrente no eixo “ $qd0$ ” referidas ao rotor – alimentação desequilibrada**  
**Fonte: Autoria própria**

A Figura A.41 mostra a curva de velocidade na condição de alimentação equilibrada.



**Figura A.41 - Curva de velocidade do motor – alimentação equilibrada**  
**Fonte: Autoria própria**

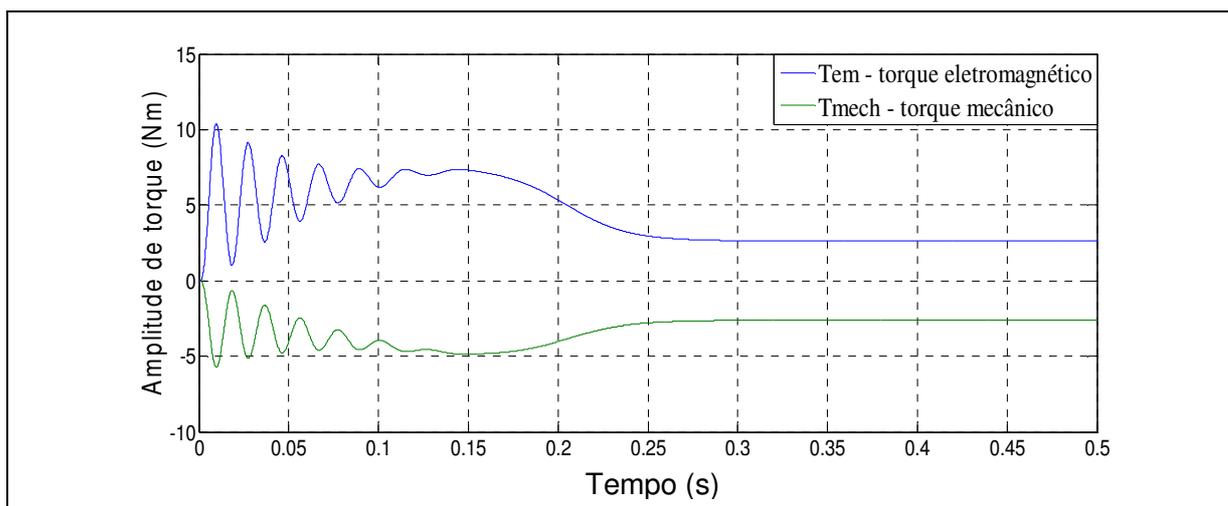
A Figura A.42 mostra a curva de velocidade na condição de alimentação desequilibrada.



**Figura A.42 - Curva de velocidade do motor – alimentação desequilibrada**

Fonte: Autoria própria

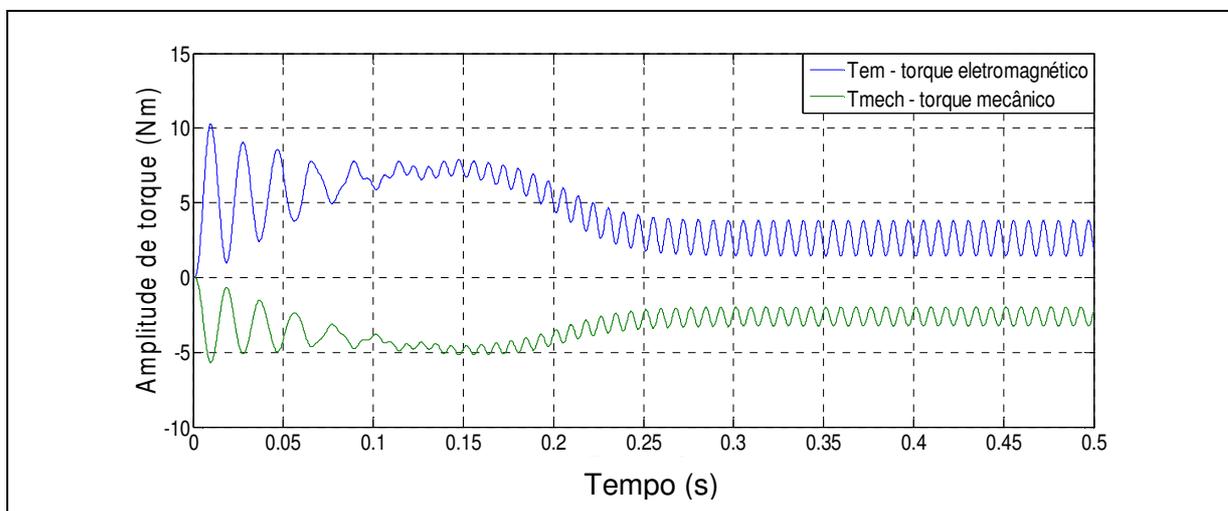
A Figura A.43 mostra as curvas de torque eletromagnético e mecânico na condição de alimentação equilibrada, considerando todas as inércias.



**Figura A.43 - Curvas de torque eletromagnético e mecânico do motor – alimentação equilibrada**

Fonte: Autoria própria

A Figura A.44 mostra as curvas de torque eletromagnético e mecânico na condição de alimentação desequilibrada gerando oscilações nas curvas, considerando todas as inércias.



**Figura A.44 - Curvas de torque eletromagnético e mecânico do motor - alimentação desequilibrada**

**Fonte: Autoria própria**

De acordo com as curvas apresentadas, nota-se uma oscilação das curvas quando a condição de alimentação do motor é desequilibrada.

**APÊNDICE B**

Quadro B.1 – Condições 1, 2 e 3 de ensaios e valores de rugosidade obtidos.

	1ª Condição		Corpo prova	2ª Condição		Corpo prova	3ª Condição		Corpo prova
	$V_c = 398,982$ $f = 0,074$			$V_c = 398,982$ $f = 0,150$			$V_c = 398,982$ $f = 0,251$		
Desequilíbrio									
0%	R <sub>1</sub> = 1,07 R <sub>2</sub> = 1,06 R <sub>3</sub> = 1,04	Ra <sub>1</sub> 1,0567	01	R <sub>37</sub> = 1,24 R <sub>38</sub> = 1,31 R <sub>39</sub> = 1,27	Ra <sub>13</sub> 1,2733	07	R <sub>73</sub> = 1,67 R <sub>74</sub> = 1,77 R <sub>75</sub> = 1,79	Ra <sub>25</sub> 1,7433	13
Falta Fase	R <sub>4</sub> = 1,20 R <sub>5</sub> = 1,13 R <sub>6</sub> = 1,18	Ra <sub>2</sub> 1,1700		R <sub>40</sub> = 1,40 R <sub>41</sub> = 1,31 R <sub>42</sub> = 1,25	Ra <sub>14</sub> 1,3200		R <sub>76</sub> = 1,63 R <sub>77</sub> = 1,64 R <sub>78</sub> = 1,67	Ra <sub>26</sub> 1,6467	
-1%	R <sub>7</sub> = 0,97 R <sub>8</sub> = 0,97 R <sub>9</sub> = 0,99	Ra <sub>3</sub> 0,9767	02	R <sub>43</sub> = 1,24 R <sub>44</sub> = 1,26 R <sub>45</sub> = 1,24	Ra <sub>15</sub> 1,2467	08	R <sub>79</sub> = 1,71 R <sub>80</sub> = 1,71 R <sub>81</sub> = 1,77	Ra <sub>27</sub> 1,7300	14
-2%	R <sub>10</sub> = 0,91 R <sub>11</sub> = 0,87 R <sub>12</sub> = 0,92	Ra <sub>4</sub> 0,9000		R <sub>46</sub> = 1,19 R <sub>47</sub> = 1,24 R <sub>48</sub> = 1,48	Ra <sub>16</sub> 1,2167		R <sub>82</sub> = 1,69 R <sub>83</sub> = 1,73 R <sub>84</sub> = 1,58	Ra <sub>28</sub> 1,6667	
-3%	R <sub>13</sub> = 0,88 R <sub>14</sub> = 0,84 R <sub>15</sub> = 0,85	Ra <sub>5</sub> 0,8567	03	R <sub>49</sub> = 1,20 R <sub>50</sub> = 1,25 R <sub>51</sub> = 1,20	Ra <sub>17</sub> 1,2167	09	R <sub>85</sub> = 1,62 R <sub>86</sub> = 1,65 R <sub>87</sub> = 1,56	Ra <sub>29</sub> 1,6100	15
-4%	R <sub>16</sub> = 0,79 R <sub>17</sub> = 0,76 R <sub>18</sub> = 0,73	Ra <sub>6</sub> 0,7600		R <sub>52</sub> = 1,27 R <sub>53</sub> = 1,31 R <sub>54</sub> = 1,37	Ra <sub>18</sub> 1,3167		R <sub>88</sub> = 1,60 R <sub>89</sub> = 1,63 R <sub>90</sub> = 1,59	Ra <sub>30</sub> 1,6067	
-5%	R <sub>19</sub> = 0,84 R <sub>20</sub> = 0,85 R <sub>21</sub> = 0,85	Ra <sub>7</sub> 0,8467	04	R <sub>55</sub> = 1,29 R <sub>56</sub> = 1,31 R <sub>57</sub> = 1,35	Ra <sub>19</sub> 1,3167	10	R <sub>91</sub> = 1,53 R <sub>92</sub> = 1,60 R <sub>93</sub> = 1,59	Ra <sub>31</sub> 1,5733	16
-6%	R <sub>22</sub> = 0,77 R <sub>23</sub> = 0,77 R <sub>24</sub> = 0,76	Ra <sub>8</sub> 0,7667		R <sub>58</sub> = 1,32 R <sub>59</sub> = 1,32 R <sub>60</sub> = 1,34	Ra <sub>20</sub> 1,3267		R <sub>94</sub> = 1,51 R <sub>95</sub> = 1,63 R <sub>96</sub> = 1,66	Ra <sub>32</sub> 1,6000	
-7%	R <sub>25</sub> = 0,84 R <sub>26</sub> = 0,84 R <sub>27</sub> = 0,87	Ra <sub>9</sub> 0,8500	05	R <sub>61</sub> = 1,31 R <sub>62</sub> = 1,31 R <sub>63</sub> = 1,27	Ra <sub>21</sub> 1,2967	11	R <sub>97</sub> = 1,61 R <sub>98</sub> = 1,57 R <sub>99</sub> = 1,64	Ra <sub>33</sub> 1,6067	17
-8%	R <sub>28</sub> = 0,82 R <sub>29</sub> = 0,80 R <sub>30</sub> = 0,83	Ra <sub>10</sub> 0,8167		R <sub>64</sub> = 1,39 R <sub>65</sub> = 1,34 R <sub>66</sub> = 1,39	Ra <sub>22</sub> 1,3733		R <sub>100</sub> = 1,51 R <sub>101</sub> = 1,48 R <sub>102</sub> = 1,55	Ra <sub>34</sub> 1,5133	
-9%	R <sub>31</sub> = 0,91 R <sub>32</sub> = 0,84 R <sub>33</sub> = 0,89	Ra <sub>11</sub> 0,8800	06	R <sub>67</sub> = 1,35 R <sub>68</sub> = 1,36 R <sub>69</sub> = 1,36	Ra <sub>23</sub> 1,3567	12	R <sub>103</sub> = 1,60 R <sub>104</sub> = 1,51 R <sub>105</sub> = 1,52	Ra <sub>35</sub> 1,5433	18
-10%	R <sub>34</sub> = 0,89 R <sub>35</sub> = 0,83 R <sub>36</sub> = 0,90	Ra <sub>12</sub> 0,8733		R <sub>70</sub> = 1,34 R <sub>71</sub> = 1,36 R <sub>72</sub> = 1,37	Ra <sub>24</sub> 1,3567		R <sub>106</sub> = 1,60 R <sub>107</sub> = 1,57 R <sub>108</sub> = 1,50	Ra <sub>36</sub> 1,5567	

Fonte: Autoria própria

Quadro B.2 – Condições 4, 5 e 6 de ensaios e valores de rugosidade obtidos.

	4ª Condição		Corpo prova	5ª Condição		Corpo prova	6ª Condição		Corpo prova
	$V_c = 199,500$ $f = 0,074$			$V_c = 199,500$ $f = 0,150$			$V_c = 199,500$ $f = 0,251$		
Desequilíbrio									
0%	R <sub>109</sub> = 0,99 R <sub>110</sub> = 1,05 R <sub>111</sub> = 1,19	Ra <sub>37</sub> 1,0767	19	R <sub>145</sub> = 1,31 R <sub>146</sub> = 1,28 R <sub>147</sub> = 1,26	Ra <sub>49</sub> 1,2833	25	R <sub>181</sub> = 2,00 R <sub>182</sub> = 2,00 R <sub>183</sub> = 2,04	Ra <sub>61</sub> 2,0133	31
Falta Fase	R <sub>112</sub> = 1,14 R <sub>113</sub> = 1,26 R <sub>114</sub> = 1,68	Ra <sub>38</sub> 1,3600		R <sub>148</sub> = 1,47 R <sub>149</sub> = 1,44 R <sub>150</sub> = 1,46	Ra <sub>50</sub> 1,4567		R <sub>184</sub> = 2,09 R <sub>185</sub> = 2,19 R <sub>186</sub> = 2,18	Ra <sub>62</sub> 2,1533	
-1%	R <sub>115</sub> = 1,20 R <sub>116</sub> = 0,97 R <sub>117</sub> = 1,20	Ra <sub>39</sub> 1,1233	20	R <sub>151</sub> = 1,49 R <sub>152</sub> = 1,46 R <sub>153</sub> = 1,48	Ra <sub>51</sub> 1,4767	26	R <sub>187</sub> = 2,07 R <sub>188</sub> = 2,03 R <sub>189</sub> = 2,10	Ra <sub>63</sub> 2,0667	32
-2%	R <sub>118</sub> = 1,26 R <sub>119</sub> = 1,05 R <sub>120</sub> = 1,16	Ra <sub>40</sub> 1,1567		R <sub>154</sub> = 1,44 R <sub>155</sub> = 1,41 R <sub>156</sub> = 1,42	Ra <sub>52</sub> 1,4233		R <sub>190</sub> = 1,89 R <sub>191</sub> = 1,85 R <sub>192</sub> = 1,87	Ra <sub>64</sub> 1,8700	
-3%	R <sub>121</sub> = 1,15 R <sub>122</sub> = 1,00 R <sub>123</sub> = 1,43	Ra <sub>41</sub> 1,1933	21	R <sub>157</sub> = 1,49 R <sub>158</sub> = 1,45 R <sub>159</sub> = 1,45	Ra <sub>53</sub> 1,4467	27	R <sub>193</sub> = 2,10 R <sub>194</sub> = 2,09 R <sub>195</sub> = 2,09	Ra <sub>65</sub> 2,0933	33
-4%	R <sub>124</sub> = 1,15 R <sub>125</sub> = 1,11 R <sub>126</sub> = 1,38	Ra <sub>42</sub> 1,2133		R <sub>160</sub> = 1,45 R <sub>161</sub> = 1,45 R <sub>162</sub> = 1,46	Ra <sub>54</sub> 1,4533		R <sub>196</sub> = 2,20 R <sub>197</sub> = 2,23 R <sub>198</sub> = 2,25	Ra <sub>66</sub> 2,2267	
-5%	R <sub>127</sub> = 1,38 R <sub>128</sub> = 1,16 R <sub>129</sub> = 1,25	Ra <sub>43</sub> 1,2633	22	R <sub>163</sub> = 1,46 R <sub>164</sub> = 1,44 R <sub>165</sub> = 1,45	Ra <sub>55</sub> 1,4500	28	R <sub>199</sub> = 2,34 R <sub>200</sub> = 2,31 R <sub>201</sub> = 2,31	Ra <sub>67</sub> 2,3200	34
-6%	R <sub>130</sub> = 1,55 R <sub>131</sub> = 1,42 R <sub>132</sub> = 1,39	Ra <sub>44</sub> 1,4533		R <sub>166</sub> = 1,43 R <sub>167</sub> = 1,42 R <sub>168</sub> = 1,42	Ra <sub>56</sub> 1,4233		R <sub>202</sub> = 2,40 R <sub>203</sub> = 2,38 R <sub>204</sub> = 2,37	Ra <sub>68</sub> 2,3833	
-7%	R <sub>133</sub> = 1,41 R <sub>134</sub> = 1,24 R <sub>135</sub> = 1,42	Ra <sub>45</sub> 1,3567	23	R <sub>169</sub> = 1,48 R <sub>170</sub> = 1,50 R <sub>171</sub> = 1,47	Ra <sub>57</sub> 1,4833	29	R <sub>205</sub> = 2,40 R <sub>206</sub> = 2,42 R <sub>207</sub> = 2,39	Ra <sub>69</sub> 2,4033	35
-8%	R <sub>136</sub> = 1,52 R <sub>137</sub> = 1,35 R <sub>138</sub> = 1,51	Ra <sub>46</sub> 1,4600		R <sub>172</sub> = 1,47 R <sub>173</sub> = 1,52 R <sub>174</sub> = 1,52	Ra <sub>58</sub> 1,4933		R <sub>208</sub> = 2,32 R <sub>209</sub> = 2,32 R <sub>210</sub> = 2,32	Ra <sub>70</sub> 2,3200	
-9%	R <sub>139</sub> = 1,62 R <sub>140</sub> = 1,52 R <sub>141</sub> = 1,58	Ra <sub>47</sub> 1,5733	24	R <sub>175</sub> = 1,52 R <sub>176</sub> = 1,49 R <sub>177</sub> = 1,52	Ra <sub>59</sub> 1,5200	30	R <sub>211</sub> = 2,37 R <sub>212</sub> = 2,36 R <sub>213</sub> = 2,42	Ra <sub>71</sub> 2,3833	36
-10%	R <sub>142</sub> = 1,60 R <sub>143</sub> = 1,43 R <sub>144</sub> = 1,78	Ra <sub>48</sub> 1,6033		R <sub>178</sub> = 1,54 R <sub>179</sub> = 1,53 R <sub>180</sub> = 1,51	Ra <sub>60</sub> 1,5267		R <sub>214</sub> = 2,36 R <sub>215</sub> = 2,33 R <sub>216</sub> = 2,37	Ra <sub>72</sub> 2,3533	

Fonte: Autoria própria

Quadro B.3 – Condições 7, 8 e 9 de ensaios e valores de rugosidade obtidos.

	7ª Condição		Corpo prova	8ª Condição		Corpo prova	9ª Condição		Corpo prova
	$V_c = 398,982$ $f = 0,074$			$V_c = 398,982$ $f = 0,150$			$V_c = 398,982$ $f = 0,251$		
Desequilíbrio									
+1%	$R_{217} = 0,74$	$R_{a73}$	37	$R_{247} = 1,32$	$R_{a83}$	42	$R_{277} = 2,09$	$R_{a93}$	47
	$R_{218} = 0,78$	0,7533		$R_{248} = 1,33$	1,3167		$R_{278} = 2,08$	2,0633	
	$R_{219} = 0,74$								
+2%	$R_{220} = 0,80$	$R_{a74}$	37	$R_{250} = 1,31$	$R_{a84}$	42	$R_{280} = 2,10$	$R_{a94}$	47
	$R_{221} = 0,84$	0,8067		$R_{251} = 1,32$	1,3100		$R_{281} = 2,11$	2,0900	
	$R_{222} = 0,78$								
+3%	$R_{223} = 0,83$	$R_{a75}$	38	$R_{253} = 1,36$	$R_{a85}$	43	$R_{283} = 2,10$	$R_{a95}$	48
	$R_{224} = 0,81$	0,8267		$R_{254} = 1,34$	1,3433		$R_{284} = 2,08$	2,1000	
	$R_{225} = 0,84$								
+4%	$R_{226} = 0,84$	$R_{a76}$	38	$R_{256} = 1,42$	$R_{a86}$	43	$R_{286} = 2,08$	$R_{a96}$	48
	$R_{227} = 0,88$	0,8533		$R_{257} = 1,35$	1,3667		$R_{287} = 2,07$	2,0833	
	$R_{228} = 0,84$								
+5%	$R_{229} = 0,86$	$R_{a77}$	39	$R_{259} = 1,37$	$R_{a87}$	44	$R_{289} = 2,10$	$R_{a97}$	49
	$R_{230} = 0,87$	0,8567		$R_{260} = 1,42$	1,4033		$R_{290} = 2,07$	2,0900	
	$R_{231} = 0,84$								
+6%	$R_{232} = 0,91$	$R_{a78}$	39	$R_{262} = 1,43$	$R_{a88}$	44	$R_{292} = 2,08$	$R_{a98}$	49
	$R_{233} = 0,91$	0,8933		$R_{263} = 1,45$	1,4467		$R_{293} = 2,05$	2,0800	
	$R_{234} = 0,86$								
+7%	$R_{235} = 0,92$	$R_{a79}$	40	$R_{265} = 1,51$	$R_{a89}$	45	$R_{295} = 2,09$	$R_{a99}$	50
	$R_{236} = 0,89$	0,9100		$R_{266} = 1,45$	1,4800		$R_{296} = 2,05$	2,0667	
	$R_{237} = 0,92$								
+8%	$R_{238} = 0,93$	$R_{a80}$	40	$R_{268} = 1,54$	$R_{a90}$	45	$R_{298} = 2,08$	$R_{a100}$	50
	$R_{239} = 0,95$	0,9233		$R_{269} = 1,56$	1,5600		$R_{299} = 2,03$	2,0600	
	$R_{240} = 0,89$								
+9%	$R_{241} = 0,92$	$R_{a81}$	41	$R_{271} = 1,59$	$R_{a91}$	46	$R_{301} = 2,09$	$R_{a101}$	51
	$R_{242} = 0,95$	0,9300		$R_{272} = 1,50$	1,5300		$R_{302} = 2,07$	2,0800	
	$R_{243} = 0,92$								
+10%	$R_{244} = 0,94$	$R_{a82}$	41	$R_{274} = 1,61$	$R_{a92}$	46	$R_{304} = 2,16$	$R_{a102}$	51
	$R_{245} = 0,93$	0,9300		$R_{275} = 1,52$	1,5600		$R_{305} = 2,08$	2,1033	
	$R_{246} = 0,92$								

Fonte: Autoria própria

Quadro B.4 – Condições 10, 11 e 12 de ensaios e valores de rugosidade obtidos.

	10ª Condição		11ª Condição		12ª Condição	
	$V_c = 199,500$ $f = 0,074$	Corpo prova	$V_c = 199,500$ $f = 0,150$	Corpo prova	$V_c = 199,500$ $f = 0,251$	Corpo prova
Desequilíbrio						
+1%	$R_{307} = 0,83$ $R_{308} = 0,93$ $R_{309} = 0,85$	$Ra_{103}$ 0,8700	$R_{337} = 1,33$ $R_{338} = 1,48$ $R_{339} = 1,41$	$Ra_{113}$ 1,4067	$R_{367} = 2,10$ $R_{368} = 2,17$ $R_{369} = 2,12$	$Ra_{123}$ 2,1300
+2%	$R_{310} = 0,95$ $R_{311} = 0,99$ $R_{312} = 0,99$	$Ra_{104}$ 0,9767	$R_{340} = 1,46$ $R_{341} = 1,37$ $R_{342} = 1,44$	$Ra_{114}$ 1,4233	$R_{370} = 2,15$ $R_{371} = 2,13$ $R_{372} = 2,14$	$Ra_{124}$ 2,1400
+3%	$R_{313} = 1,15$ $R_{314} = 1,07$ $R_{315} = 1,18$	$Ra_{105}$ 1,1333	$R_{343} = 1,52$ $R_{344} = 1,51$ $R_{345} = 1,39$	$Ra_{115}$ 1,4733	$R_{373} = 2,10$ $R_{374} = 2,08$ $R_{375} = 2,13$	$Ra_{125}$ 2,1033
+4%	$R_{316} = 1,16$ $R_{317} = 1,16$ $R_{318} = 1,19$	$Ra_{106}$ 1,1700	$R_{346} = 1,49$ $R_{347} = 1,64$ $R_{348} = 1,49$	$Ra_{116}$ 1,5400	$R_{376} = 2,19$ $R_{377} = 2,12$ $R_{378} = 2,20$	$Ra_{126}$ 2,1700
+5%	$R_{319} = 1,30$ $R_{320} = 1,25$ $R_{321} = 1,27$	$Ra_{107}$ 1,2733	$R_{349} = 1,65$ $R_{350} = 1,49$ $R_{351} = 1,58$	$Ra_{117}$ 1,5733	$R_{379} = 2,12$ $R_{380} = 2,13$ $R_{381} = 2,18$	$Ra_{127}$ 2,1433
+6%	$R_{322} = 1,30$ $R_{323} = 1,27$ $R_{324} = 1,25$	$Ra_{108}$ 1,2733	$R_{352} = 1,52$ $R_{353} = 1,62$ $R_{354} = 1,61$	$Ra_{118}$ 1,5833	$R_{382} = 2,21$ $R_{383} = 2,21$ $R_{384} = 2,24$	$Ra_{128}$ 2,2200
+7%	$R_{325} = 1,27$ $R_{326} = 1,33$ $R_{327} = 1,28$	$Ra_{109}$ 1,2933	$R_{355} = 1,50$ $R_{356} = 1,52$ $R_{357} = 1,54$	$Ra_{119}$ 1,5200	$R_{385} = 2,22$ $R_{386} = 2,22$ $R_{387} = 2,22$	$Ra_{129}$ 2,2200
+8%	$R_{328} = 1,26$ $R_{329} = 1,27$ $R_{330} = 1,26$	$Ra_{110}$ 1,2633	$R_{358} = 1,55$ $R_{359} = 1,45$ $R_{360} = 1,50$	$Ra_{120}$ 1,5000	$R_{388} = 2,22$ $R_{389} = 2,29$ $R_{390} = 2,27$	$Ra_{130}$ 2,2600
+9%	$R_{331} = 1,10$ $R_{332} = 1,10$ $R_{333} = 1,08$	$Ra_{111}$ 1,0933	$R_{361} = 1,45$ $R_{362} = 1,63$ $R_{363} = 1,47$	$Ra_{121}$ 1,5167	$R_{391} = 2,25$ $R_{392} = 2,23$ $R_{393} = 2,27$	$Ra_{131}$ 2,2500
+10%	$R_{334} = 1,10$ $R_{335} = 1,07$ $R_{336} = 1,14$	$Ra_{112}$ 1,1033	$R_{364} = 1,56$ $R_{365} = 1,57$ $R_{366} = 1,52$	$Ra_{122}$ 1,5500	$R_{394} = 2,25$ $R_{395} = 2,29$ $R_{396} = 2,29$	$Ra_{132}$ 2,2767

Fonte: Autoria própria