

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MARIA TERESA MENDOZA LLERENA**

**ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS  
ASSÍNCRONAS SUJEITAS A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Porto Alegre

2006

**MARIA TERESA MENDOZA LLERENA**

**ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS  
ASSÍNCRONAS SUJEITAS A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro - Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Petry Homrich

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2006

MARIA TERESA MENDOZA LLERENA

## **ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS SUJEITAS A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. ROBERTO PETRY HOMRICH, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho, UNICAMP

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Prof. Dra. Marília Amaral da Silveira, UFRGS - ULBRA

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Renato Machado de Brito, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dra. Gladis Bordin Schuch, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Marcelo Soares Lubaszewski

Porto Alegre, Maio de 2006.

*Salimos de la ignorancia y llegamos así nuevamente a la ignorancia, pero a una ignorancia mas rica, mas compleja, hecha de pequeñas e infinitas sabidurías.*

*Ernesto Sábato*

*... pero aún así, ignorancia*

## RESUMO

Os afundamentos de tensão são reduções de curta duração entre o 10% a 90% da magnitude de tensão eficaz. Usualmente, estes afundamentos são associados com falhas no sistema de energia elétrica, mas podem ser causados pela elevada corrente de partida de motores de indução ou energização de transformadores. Apesar de sua curta duração, tais eventos podem causar sérios problemas para alguns equipamentos. As conseqüências dos afundamentos de tensão sobre a máquina assíncrona são: perda de velocidade durante o afundamento e picos de corrente e de conjugado que aparecem na queda de tensão e no instante de restabelecimento. Este estudo visa analisar o comportamento da máquina assíncrona diante de afundamentos de tensão e as características destes, devido à influência do motor assíncrono como carga. Enfocando-se neste ponto, é que foram considerados diferentes tipos de afundamentos devido a diferentes falhas, que produziram quedas de tensão nos terminais da máquina assíncrona com variações na magnitude e no argumento de tensão. As simulações foram realizadas aplicando um método numérico tradicional e um método simplificado, o método simplificado lineariza as equações diferenciais elétricas da máquina assíncrona considerando a velocidade mecânica constante, para o cálculo dos transitórios elétricos no início da queda de tensão e no restabelecimento da mesma. Os transitórios obtidos pelo método numérico tradicional (Runge Kutta quarta ordem) e o método simplificado foram comparados, para verificar a precisão deste método com respeito ao numérico tradicional, concluindo-se, que o método simplificado poderá aplicar-se em máquinas de baixo escorregamento e elevada constante de inércia. Além disso, foram realizados experimentos, submetendo o sistema a diferentes quedas de tensão, considerando diferentes magnitudes e durações no afundamento.

**Palavras-chaves:** Engenharia elétrica. Afundamentos de tensão. Transitórios elétricos. Transitórios mecânicos. Variações de tensão.

## **ABSTRACT**

Voltage sags are fast reductions between 10% to 90% in the voltage magnitude. Sags are usually associated with system faults, but can also be caused by motors starting or by the transformers energizing. Despite their small duration, such events can cause serious problems for a wide range of equipments. The consequences of voltage sags on the induction machine are: decrease of the speed during the sag and current and torque peaks in the voltage drop and recovery times. This study aims to analyze the behavior of the induction machine during voltage sags and find the characteristics of these sags due to the influence of the induction motor as load, taking into account the different voltage sags types due to different fault types, considering variations in the magnitude, phase angle voltage and variations of the mechanical load of the motor. The simulations were carried out by means of a linear and simplified induction motor model using Matlab, this simplified method separates the electric transient of the mechanical transient, resulting in a large speed of calculation when compared with the numerical method (fourth order Runge-Kutta). The transients obtained by the simplified method were compared with the calculated by the numerical method. Besides, the experiments were carried out under the same bases as the simulations, submitting the system to different voltage drops during several intervals of time.

**Keywords: Electrical engineering. Induction machine. Voltage sags. Electric transients. Mechanical transients.**

## SUMÁRIO

<i>RESUMO</i> .....	5
<i>Abstract</i> .....	6
<i>SUMÁRIO</i> .....	7
<i>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</i> .....	10
<i>LISTA DE TABELAS</i> .....	13
<i>SÍMBOLOS E NOTAÇÕES</i> .....	15
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1 OBJETIVO E ESCOPO DO TRABALHO .....	19
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE</b> .....	20
<b>3 MÁQUINA ASSÍNCRONA</b> .....	24
3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO .....	25
3.2 PRINCÍPIOS GERAIS DE OPERAÇÃO.....	26
<b>4 MODELO MATEMÁTICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA</b> .....	27
4.1 EQUAÇÕES DE TENSÃO.....	28
4.2 MODELO DQ0.....	31
4.3 MODELO VETORIAL .....	33
4.3.1 VANTAGENS DO MODELO VETORIAL .....	36
4.4 SISTEMA MECÂNICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA .....	36
4.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA MECÂNICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA.....	37
4.4.2 TIPOS DE CONJUGADO DE CARGA.....	38
<b>5 SIMULAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA (Matlab/Simulink)</b> .....	40

<b>6</b>	<b><i>QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA</i></b> .....	<b>46</b>
<b>6.1</b>	<b><i>AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</i></b> .....	<b>48</b>
<b>6.1.1</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b> .....	<b>49</b>
<b>6.1.2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>6.1.2.1</b>	<b>Magnitude do afundamento de tensão</b> .....	<b>52</b>
<b>6.1.2.2</b>	<b>Duração do afundamento</b> .....	<b>53</b>
<b>6.1.2.3</b>	<b>Deslocamento do ângulo de fase da tensão</b> .....	<b>54</b>
<b>6.1.2.4</b>	<b>Assimetria das tensões de fase</b> .....	<b>56</b>
<b>6.1.2.5</b>	<b>Instante de restabelecimento da tensão</b> .....	<b>57</b>
<b>6.2</b>	<b>INFLUÊNCIA DE CARGAS DINÂMICAS SOBRE OS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b> .....	<b>59</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Fator de assimetria PN (Positivo-Negativo)</b> .....	<b>59</b>
<b>6.3</b>	<b>EFEITOS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NA MÁQUINA ASSÍNCRONA</b> .....	<b>61</b>
<b>7</b>	<b><i>MÉTODO SIMPLIFICADO</i></b> .....	<b>62</b>
<b>7.1</b>	<b>TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS PRODUZIDOS POR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b> .....	<b>64</b>
<b>7.2</b>	<b>TRANSITÓRIOS MECÂNICOS PRODUZIDOS POR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b> .....	<b>68</b>
<b>7.3</b>	<b>LINEARIZAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA ATRAVÉS DA EXPANSÃO DE TAYLOR</b> .....	<b>70</b>
<b>8</b>	<b><i>SIMULAÇÕES REALIZADAS</i></b> .....	<b>73</b>
<b>8.1</b>	<b>Influência do instante inicial do afundamento</b> .....	<b>73</b>
<b>8.2</b>	<b>Influência do deslocamento inicial no ângulo de fase de tensão</b> .....	<b>77</b>
<b>8.3</b>	<b>Influência do fator de assimetria</b> .....	<b>80</b>
<b>8.4</b>	<b>Influência da carga mecânica do motor</b> .....	<b>81</b>
<b>9</b>	<b><i>ENSAIOS EXPERIMENTAIS</i></b> .....	<b>89</b>
<b>9.1</b>	<b>Características do motor assíncrono</b> .....	<b>90</b>
<b>9.2</b>	<b>Calibração do conjugado</b> .....	<b>90</b>



9.3	Transitórios na partida da máquina assíncrona.....	91
9.4	Transitórios no afundamento de tensão.....	93
10	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>100</b>
	<i>Referências.....</i>	<i>104</i>
	<b>ANEXO A: MODELAGEM DO MOTOR ASSÍNCRONO .....</b>	<b>108</b>
	<b>ANEXO B: CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PELA TEORIA DE COMPONENTES SIMÉTRICAS .....</b>	<b>110</b>
	<b>ANEXO C: DISTÂNCIA EUCLIDIANA.....</b>	<b>114</b>
	<b>ANEXO D: PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO.....</b>	<b>117</b>
	<b>ANEXO E: CÓDIGO FONTE – MÉTODO NUMÉRICO TRADICIONAL E SIMPLIFICADO.....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3. 1 Constituição do motor de indução [S.I.].....	24
Figura 4. 1 Máquina assíncrona trifásica de dois pólos (KRAUS, 1995) .....	28
Figura 4. 2 Esquema da transformação física equivalente .....	31
Figura 4. 3 Esquema da transformação do modelo trifásico a modelo vetorial .....	33
Figura 4. 4 Bobinado trifásico do estator com a fase “a” energizada: a) representação simbólica b) distribuição da densidade de corrente (HOLTZ, 2002).....	34
Figura 4. 5 Diagrama de blocos para o cálculo da variável de estado - corrente .....	36
Figura 4. 6 Conjugado constante – velocidade de carga variável .....	38
Figura 4. 7 Conjugado variável – velocidade de carga variável.....	39
Figura 4. 8 Carga de potência constante.....	39
Figura 5. 1 Modelo completo da máquina assíncrona – Matlab/Simulink.....	41
Figura 5. 2 Transformação das tensões no sistema trifásico <i>abc</i> s ao sistema <i>dqs</i> .....	41
Figura 5. 3 Diagrama de blocos para a obtenção do fluxo concatenado através das tensões no sistema <i>dqs</i> e da velocidade mecânica.....	42
Figura 5. 4 Diagrama de bloco do fluxo concatenado.....	42
Figura 5. 5 Diagrama de blocos para obtenção das correntes e do conjugado eletromagnético .....	43
Figura 5. 6 Transformação das correntes no sistema <i>dqs</i> ao sistema trifásico <i>abc</i> s.....	43
Figura 5. 7 Grandezas do motor de indução na partida, modelo Matlab/Simulink ( $T_l = T_b/2$ )..	44
Figura 5. 8 Grandezas do motor de indução - afundamento nas três fases ( $60\%V_n$ , 400 ms), modelo simulink/matlab (motor 20 HP, $T_l = T_b/2$ ).....	44
Figura 5. 9 Curvas de tolerância da magnitude do afundamento considerando o incremento do escorregamento como fator limitante ( $\Delta s = 1\%, 2\%, 5\%, 10\%, 12\%$ ).....	45
Figura 6. 1 Esquema - qualidade de energia elétrica.....	46
Figura 6. 2 Distúrbios comuns da qualidade de energia [S.I.].....	48

Figura 6. 3 Diagramas fasoriais dos tipos de afundamentos de tensão .....	50
Figura 6. 4 Magnitude característica no domínio do tempo .....	53
Figura 6. 5 Afundamento de tensão, magnitude $70 \%V_n$ com $45^\circ$ de defasagem angular .....	54
Figura 6. 6 Diagrama unifilar de um sistema de energia elétrica .....	55
Figura 6. 7 Comportamento da máquina assíncrona frente a um afundamento de tensão assimétrico de 400 ms de duração e uma magnitude de $60\% V_n$ (simulado - Matlab) .....	61
Figura 7. 1 Método numérico tradicional e simplificado – corrente .....	66
Figura 7. 2 Método numérico tradicional e simplificado - conjugado .....	66
Figura 7. 3 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - velocidade mecânica.....	69
Figura 8. 1 Picos de corrente e de conjugado em diferentes pontos iniciais – afundamento tipo A; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada) ....	75
Figura 8. 2 Picos de corrente e de conjugado - afundamento de tensão tipo B; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada).....	75
Figura 8. 3 Picos de corrente e de conjugado - afundamento de tensão tipo C; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada).....	75
Figura 8. 4 Picos de corrente e de conjugado - afundamento de tensão tipo D; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada).....	76
Figura 8. 5 Picos de corrente e de conjugado - afundamento de tensão tipo E; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada).....	76
Figura 8. 6 Picos de corrente e de conjugado - afundamento de tensão tipo F; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada).....	76
Figura 8. 7 Picos de corrente, (em cinza, valores máximos considerando todos os tipos de afundamentos; em preto picos de corrente para um afundamento tipo B, $T_l= Tb/2$ ) .....	83
Figura 8. 8 Picos de conjugado, (em cinza, valores máximos considerando todos os tipos de afundamentos; em preto picos de conjugado para um afundamento tipo B, $T_l=k\omega_m^2$ ) .....	84
Figura 8. 9 Queda da velocidade no instante final do afundamento, (em cinza, superfície para um afundamento A, $T_l=k\omega_m^2$ e em preto superfície para um afundamento tipo B, $T_l=Tb/2$ ).....	84

Figura 8. 10 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento de tensão tipo A ( motor 20 HP, $T_l=k\omega_m^2$ ) .....	87
Figura 8. 11 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento de tensão tipo B (motor 20 HP, $T_l=k\omega_m^2$ ) .....	87
Figura 8. 12 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento de tensão tipo C .....	87
Figura 8. 13 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento tipo D (motor 20HP, $T_l=k\omega_m^2$ ) .....	88
Figura 9. 1 Esquema de aquisição de dados do motor.....	89
Figura 9. 2 Tela de usuário de aquisição de dados – LABVIEW.....	90
Figura 9. 3 Característica da corrente durante livre aceleração $ I/\sqrt{2}I_n $ – sem carga.....	92
Figura 9. 4 Característica do conjugado durante livre aceleração $ T_e/T_n $ – sem carga.....	92
Figura 9. 5 Característica da velocidade durante livre aceleração $ \omega_m/\omega_b $ – sem carga .....	93
Figura 9. 6 Característica da corrente no restabelecimento da tensão $ I/\sqrt{2}I_n $ a) sem carga b) com carga ( $T_L = T_b/4$ ).....	94
Figura 9. 7 Característica do conjugado no restabelecimento da tensão $ T_e/T_n $ a) sem carga b) com carga.....	94
Figura 9. 8 Característica da velocidade no restabelecimento da tensão $ \omega_m/\omega_b $ – com carga.....	94
Figura 9. 9 Afundamento tipo A: (a) tensão em valores unitários, (b) corrente $ I/\sqrt{2}I_n $ .....	95
Figura 9. 10 Afundamento tipo B: (a) tensão em valores unitários, (b) corrente $ I/\sqrt{2}I_n $ ,.....	96
Figura 9. 11 Afundamento tipo E: (a) tensão em valores unitários, (b) corrente $ I/\sqrt{2}I_n $ ,.....	96
Figura 9. 12 Picos de corrente para um afundamento tipo A (500 ms e 60% da magnitude do afundamento).....	97
Figura 9. 13 Picos de corrente para um afundamento tipo B (500 ms e 60% da magnitude do afundamento).....	98
Figura 9. 14 Picos de corrente para um afundamento tipo E (500 ms e 60% da magnitude do afundamento).....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 6. 1 Classificação dos afundamentos de tensão .....	51
Tabela 6. 2 Categorias e características dos fenômenos eletromagnéticos do sistema de energia elétrica.....	54
Tabela 6. 3 Afundamentos de tensão considerando uma variação inicial do ângulo de fase $\varphi$	56
Tabela 7. 1 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - picos de corrente devido a afundamentos de tensão .....	67
Tabela 7. 2 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - picos de conjugado.....	67
Tabela 7. 3 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - queda da velocidade .....	69
Tabela 7. 4 Comparação entre o método simplificado e numérico para máquina de diferentes potências (40% $V_n$ - duração 400ms).....	72
Tabela 8. 1 Picos de corrente para diferentes instante iniciais na onda de tensão.....	73
Tabela 8. 2 Picos de conjugado para diferentes instantes iniciais na onda de tensão .....	74
Tabela 8. 3 Picos de corrente devido a afundamentos de tensão considerando diferentes ângulos de deslocamento (afundamento 30% $V_n - 300$ ms).....	77
Tabela 8. 4 Picos de conjugado devido a afundamentos de tensão considerando diferentes ângulos de deslocamento (afundamento 30% $V_n - 300$ ms).....	78
Tabela 8. 5 Perda da velocidade devido a afundamentos de tensão considerando diferentes ângulos de deslocamento (afundamento 30% $V_n - 300$ ms).....	78
Tabela 8. 6 Picos de corrente considerando um ângulo de deslocamento e um ponto inicial sobre a onda de tensão (afundamento 30% $V_n - 300$ ms).....	79
Tabela 8. 7 Picos de conjugado considerando um ângulo de deslocamento e um ponto inicial (afundamento 30% $V_n - 300$ ms).....	79

Tabela 8. 8 Picos de corrente devido a afundamentos de tensão considerando o fator de assimetria.....	80
Tabela 8. 9 Picos de conjugado devido a afundamentos de tensão considerando o fator de assimetria.....	80
Tabela 8. 10 Distância euclidiana normalizada dos picos de corrente com relação a uma matriz máxima para diferentes tipos de carga.....	82
Tabela 8. 11 Distância euclidiana normalizada dos picos de conjugado com relação a uma matriz máxima para diferentes tipos de carga.....	82
Tabela 8. 12 Distância euclidiana normalizada da perda de velocidade para diferentes tipos de carga.....	82
Tabela 8. 13 Distância euclidiana entre os diferentes tipos de afundamento – picos de corrente.....	85
Tabela 8. 14 Distância euclidiana entre os diferentes tipos de afundamento – picos de conjugado.....	85
Tabela 8. 15 Distância euclidiana entre os diferentes tipos de afundamento – perda de velocidade mecânica.....	86
Tabela 9. 1 Resultados da calibração do conjugado.....	91
Tabela 9. 2 Comparação entre os resultados experimentais e os simulados pelo método simplificado: picos de corrente.....	97
Tabela B. 1 Classificação dos afundamentos de tensão segundo as componentes simétricas	112
Tabela D. 1 Parâmetros do motor de indução.....	118

## SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

$E$  : Força eletromotriz

$H$  : Constante de inércia

$i_{ds}$  : Corrente no estator no eixo  $d$

$i_{qs}$  : Corrente no estator no eixo  $q$

$i_{as}$  : Corrente no estator na fase  $a$

$i_{bs}$  : Corrente no estator na fase  $b$

$i_{cs}$  : Corrente no estator na fase  $c$

$i_{ar}$  : Corrente no rotor na fase  $a$

$i_{br}$  : Corrente no rotor na fase  $b$

$i_{cr}$  : Corrente no rotor na fase  $c$

$I_n$  : Corrente nominal

$J$  : Momento de inércia total

$J_c$  : Momento de inércia de carga

$L_{ls}$  : Indutância de dispersão do estator

$L_{lr}$  : Indutância de dispersão do rotor

$L_s$  : Indutância própria do estator

$L_r$  : Indutância própria do rotor

$L_m$  : Indutância mutua entre as fases do estator e do rotor

$M_s$  : Indutância de magnetização entre as fases do estator

$M_r$  : Indutância de magnetização entre as fases do rotor

$N_n$  : Velocidade nominal em rotações por minuto

$P$  : Número de pólos

$p$  : operador diferencial  $d/dt$

$P_n$  : Potência nominal

$R_s$  : Resistências do estator

$R_r$  : Resistências do rotor

$s$  : escorregamento

$S$  : Potência aparente elétrica

$T_e$  : Conjugado eletromagnético

$T_L$  : Conjugado de carga

$v_{as}$  : Tensão no estator na fase  $a$

$v_{bs}$  : Tensão no estator na fase  $b$

$v_{cs}$  : Tensão no estator na fase  $c$

$v_{ds}$  : Tensão no estator no eixo  $d$

$v_{qs}$  : Tensão no estator no eixo  $q$

$\vec{v}_s$  : Tensão vetorial do estator

$\vec{v}_r$  : Tensão vetorial do rotor

$X_{ls}$  : Reatância de dispersão do estator

$X_{lr}$  : Reatância de dispersão do rotor

$X_M$  : Reatância de magnetização

$X_s$  : Reatância própria do estator

$X_r$  : Reatância própria do rotor

$\omega_s$  : Velocidade angular síncrona

$\omega_r$  : Velocidade angular do rotor

$\omega_m$  : Velocidade mecânica

$\theta_m$  : Ângulo mecânico que mede o deslocamento do rotor em relação ao estator

$\theta_r$  : Ângulo elétrico do rotor que mede o deslocamento do rotor em relação ao estator

$\lambda_s$  : Fluxo do estator

$\lambda_r$  : Fluxo do rotor

$\psi_{qs}$  : fluxo concatenado por segundo do estator no eixo  $q$

$\psi_{ds}$  : fluxo concatenado por segundo do estator no eixo  $d$

$\psi_{as}$  : fluxo concatenado por segundo na fase  $a$  do estator



$\psi_{bs}$  : fluxo concatenado por segundo na fase  $b$  do estator

$\psi_{cs}$  : fluxo concatenado por segundo na fase  $c$  do estator

$\sigma$  : Coeficiente de dispersão  $= 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

$B$  : Coeficiente de atrito viscoso

$\tau$  : Constante de tempo do sistema

$\delta_{sr}$  : ângulo entre os eixos magnéticos

$\text{Re}\{ \}$  : Parte real do termo complexo

$\text{Im}\{ \}$  : Parte imaginária do termo complexo

## 1 INTRODUÇÃO

Os afundamentos de tensão são provavelmente uns dos problemas mais importantes da qualidade de energia elétrica que não só afeta o comportamento da máquina assíncrona, mas também o dos transformadores, acionamentos de velocidade variável, computadores e outros. Os afundamentos de tensão são reduções de curta duração entre 10% a 90% da tensão eficaz, podendo ser simétricos ou assimétricos o que dependerá das causas de sua origem no sistema de energia elétrica. Curto-circuitos trifásicos ou uma elevada corrente de partida nos motores produzem afundamentos simétricos. Já, falhas monofásicas ou bifásicas no sistema produzem afundamentos assimétricos. As falhas trifásicas resultam em afundamentos severos, mas este tipo de falha não é comum no sistema.

Analisa-se o comportamento da máquina assíncrona sujeita a afundamentos de tensão, tratando assim, um dos principais problemas da qualidade de energia elétrica com a máquina elétrica mais usada. Os efeitos causados pelos afundamentos de tensão sobre a máquina assíncrona são: perda de velocidade, e picos de corrente e de conjugado no instante inicial e final do afundamento. Estes efeitos transitórios dependem de muitos fatores não só da magnitude e duração do afundamento, como também, do tipo de falha que produziu a queda de tensão, da configuração do sistema elétrico, do deslocamento do ângulo de fase da tensão durante a falha, do instante inicial e final do afundamento sobre a onda de tensão e dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina.

Este estudo apresenta, inicialmente, os conceitos básicos da máquina assíncrona para a construção do seu modelo matemático e sua posterior análise em regime transitório. Um método simplificado foi desenvolvido com a finalidade de obter os transitórios elétricos na máquina, no instante inicial e final do afundamento com uma maior velocidade de cálculo que a conseguida com o método numérico tradicional empregado (Runge Kutta quarta ordem). O método simplificado consiste em separar os transitórios elétricos do cálculo da velocidade mecânica. Este método foi aplicado em (CORCOLES, 1999) considerando o comportamento dinâmico das variáveis elétricas num ponto de operação, onde a velocidade mecânica é constante, assim a máquina assíncrona é tratada como um sistema linear. Em (KRAUS, 1995) utiliza-se a linearização para análise e projeto do controle de máquinas assíncronas e síncronas. As grandezas da máquina assíncrona obtidas pelo método simplificado foram comparadas com as calculadas pelo método numérico tradicional. Analisou-se, também, o

comportamento do motor sujeito a afundamentos assimétricos, assim como as características do afundamento no sistema de energia elétrica considerando motores de indução como cargas.

Para o desenvolvimento deste estudo foi implementado um programa de aquisição de dados, através do “software” **Labview**, para a obtenção das informações elétricas da máquina assíncrona de forma sincronizada, durante as variações de tensão. A motivação do estudo baseia-se na importância da máquina assíncrona, assim como na importância da qualidade de energia elétrica no sistema.

## **1.1 OBJETIVO E ESCOPO DO TRABALHO**

O objetivo deste trabalho é a análise do comportamento dinâmico da máquina assíncrona sujeita a afundamentos de sua tensão de alimentação, o que se justifica devido ao uso difundido da máquina nos setores industriais e comerciais. O escopo do trabalho resume-se em:

- modelagem matemática e análise da máquina assíncrona trifásica;
- estudo e análise dos afundamentos de tensão no sistema de energia elétrica;
- análise do comportamento da máquina assíncrona sujeita a diferentes tipos de afundamentos de tensão;
- implementação de um método simplificado no cálculo dos transitórios elétricos na máquina assíncrona, devido a afundamentos de tensão;
- aproximação do método simplificado com o método numérico tradicional empregado (Runge Kutta quarta ordem);
- análise do comportamento da máquina assíncrona sujeita a afundamentos de tensão assimétricos através da teoria de componentes simétricas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE

Para a elaboração deste capítulo foram revisados diversos livros, artigos e trabalhos relacionados com o tema. Para entender o alcance de cada trabalho, será apresentada uma descrição resumida dos trabalhos mais relacionados ao tema principal. Dividiu-se o estado da arte em duas partes, como segue.

Na primeira parte, apresenta-se a obtenção dos parâmetros das máquinas elétricas por diferentes métodos e a estimativa dos mesmos em tempo real. Na segunda parte são descritos trabalhos que tem como objetivo a análise dos transitórios em máquinas elétricas devido a variações de tensão, principalmente, o “afundamento de tensão”.

### - Estimativa dos Parâmetros Elétricos e Mecânicos da Máquina Assíncrona

Os artigos consultados citados na referência possuem um enfoque na obtenção dos parâmetros elétricos e mecânicos através de métodos simplificados, numéricos ou experimentais. Toliyat et. al. (2003) apresentam uma revisão das várias técnicas usadas para a estimativa dos parâmetros da máquina assíncrona. Neste artigo são ilustradas as semelhanças e as diferenças das diversas técnicas de estimativa dos parâmetros.

Córcoles et. al. (2002) apresentam a identificação numérica dos parâmetros elétricos da máquina assíncrona, para simples e dupla gaiola de esquilo com ou sem perdas no núcleo. Introduzem a idéia de modelos invariáveis (MIVs, função dos parâmetros que definem completamente os comportamentos de estado estável e dinâmico da máquina).

Em Vas (1993) descreve-se o modelo completo do motor de indução de quinta ordem com uma posterior redução para ordem menor. Utiliza um modelo vetorial complexo, assim como diversos tipos de modelagem para controlar o motor.

As informações, obtidas dos livros voltados à área de máquinas elétricas, contribuem com a construção de modelos numéricos tradicionais e simplificados que auxiliam na análise da máquina assíncrona. Coube a publicações mais específicas como os livros de Kraus (1995), Vas (1993), Boldea (1998) e Fitzgerald (1990) a análise matemática da máquina assíncrona.

## - Estudo e Análise dos Afundamentos de Tensão

Complementando a análise matemática da máquina assíncrona, os seguintes artigos apresentam o seu comportamento quando sujeita a transitórios. Córcoles et. al. (1999) apresentam um método simplificado para o cálculo das grandezas internas do motor de indução submetido a afundamentos de tensão simétricos. As variáveis calculadas são a corrente, o conjugado e a velocidade da máquina, quando a magnitude e a duração do afundamento de tensão variam. O método usado supõe que a velocidade varie de forma insignificante durante os primeiros ciclos, no início do afundamento e no instante de restabelecimento da tensão. Neste artigo analisa-se a sensibilidade da máquina considerando diferentes magnitudes e durações do afundamento de tensão.

Guasch et. al. (2004) apresentam os efeitos causados por afundamentos de tensão simétricos e assimétricos sobre o motor de indução. Os afundamentos foram classificados fasorialmente em sete tipos com variações na magnitude e no argumento de tensão. Neste estudo, concluiu-se que as grandezas da máquina assíncrona não dependem somente da magnitude e da duração do afundamento. Considera-se aqui a influência de diferentes pontos no início do afundamento sobre a onda de tensão, concluindo-se que os transitórios devido a quedas simétricas dependem da magnitude e da duração do afundamento, enquanto que, os transitórios devido a quedas assimétricas dependem da magnitude, da duração do afundamento e do instante inicial sobre a onda de tensão. As variáveis escolhidas para estudar o comportamento da máquina, diante de afundamentos de tensão foram a corrente, o conjugado e a velocidade mecânica.

Carlsson (2003) apresenta a influência dos afundamentos de tensão na máquina assíncrona sobre o fluxo do estator. O modelo matemático da máquina assíncrona foi implementado através do “*software*” Matlab. Das simulações resultou que existe saturação no restabelecimento da tensão, para quedas de tensão superiores a 60% da tensão eficaz e com durações de ciclos completos mais médio ciclo. Além disso, obteve-se que os maiores picos de corrente e de conjugado foram devido a afundamentos de tensão simétricos ou quedas de tensão em duas das fases. Neste artigo, também, comparou-se o comportamento de uma máquina síncrona e de uma máquina assíncrona durante e depois do afundamento, a diferença principal obtida foram os menores picos de conjugado depois do afundamento de tensão numa máquina assíncrona, devido à queda rápida do fluxo do rotor.

Gómez et. al. (2002) realizaram testes experimentais e algumas simulações do motor de indução diante de afundamentos de tensão e pequenas interrupções (*short interruptions*). Este estudo envolve o afundamento de tensão no sistema de energia elétrica e o motor de indução como carga. Os dados experimentais obtidos, neste artigo, das grandezas do motor de indução foram de afundamentos de tensão simétricos. Concluindo-se, neste estudo, que diante de afundamentos simétricos obtêm-se picos de corrente e de conjugado mais severos, como também uma maior redução na velocidade do motor. Além disso, observou-se dos testes experimentais que o restabelecimento da tensão fora de fase produz picos de corrente. Neste artigo é ressaltada a importância dos afundamentos de tensão, como um dos principais problemas da qualidade de energia elétrica. De sua análise experimental realizada observa-se que os afundamentos de tensão profunda e pequenas interrupções representam os piores casos de esforço térmico no motor, como também para o circuito e para as cargas sensíveis vizinhas.

Yalçinkaya et. al. (1998) descrevem as várias características dos afundamentos de tensão dentro de um sistema de distribuição, dando uma ênfase especial para as características dos afundamentos de tensão no sistema quando a carga é um motor de indução. Das simulações realizadas, neste artigo, com o auxílio do “*software*” EMTP, foi obtido que, durante uma falha o motor operará como um gerador por um curto período de tempo o que causará um incremento na magnitude do afundamento. O restabelecimento de tensão depois da falha resultará em um afundamento de tensão pós-falha. O estudo considera a influência do motor de indução sujeita a afundamentos assimétricos devido a falhas linha-terra (SLGF) ou linha-linha (LLF). A característica dos afundamentos têm sido analisada pela teoria de componentes simétricas, usando as seqüências positiva e negativa da corrente, da tensão e da impedância do motor.

Bollen (2003a) apresenta dois algoritmos para estimar as características dos afundamentos de tensão em cargas trifásicas, a partir das tensões de fase. O “algoritmo de seis fases” fácil de interpretar mas apresenta problemas na estimativa das características considerando grandes variações no ângulo de fase, e o “algoritmo de componentes simétricas” que apresentou valores corretos em quase todos os casos.

O algoritmo de componentes simétricas determina o tipo de afundamento através do cálculo das tensões de seqüências positiva e negativa. A tensão de seqüência positiva será a

mesma para todos os tipos de afundamentos (considerando como referência a tensão da fase pré-falha), a tensão de seqüência negativa terá uma magnitude equivalente, mas diferente argumento. Assim, o ângulo entre a tensão de seqüência positiva e negativa deverá ser um múltiplo de  $60^\circ$ , o ângulo obtido das medidas é usado para obter o tipo de afundamento. Para o algoritmo de seis fases, a tensão eficaz é obtida das tensões de fase e das tensões de linha, o tipo de afundamento é determinado de acordo ao valor da tensão eficaz mais baixo.

Bollen (2003b) apresenta a análise do restabelecimento de tensão após um afundamento, devido aos diferentes tipos de falha no sistema de energia elétrica. O restabelecimento da tensão é descrito de maneira sistemática, utilizando a classificação fasorial dos afundamentos de tensão em sete tipos, dada em Bollen (1997). Este artigo apresenta a interface entre os sistemas de potência trifásicos e os equipamentos finais dos usuários. O restabelecimento de tensão será diferente para diferentes tipos de afundamentos. Para quedas de tensão devido a uma falha fase-terra ou fase-fase, o restabelecimento terá lugar num mesmo instante de tempo para todas as fases. Nos afundamentos devido às falhas fase-fase-terra e falhas trifásicas, o restabelecimento de tensão poderá ter lugar em dois ou mais instantes de tempo, para as três fases.

De outro lado, tem-se que, os acionamentos de velocidade ajustável são os tipos de dispositivos mais sensíveis diante de afundamentos de tensão, devido a seu sistema de controle e proteção. Em Bollen (1997) são apresentados o comportamento de acionamentos de velocidade variável diante de afundamentos de tensão simétricos e assimétricos. Neste artigo é introduzida a classificação de afundamentos de tensão fasorialmente para cargas trifásicas. Um modelo simplificado de um acionamento de velocidade variável, é usado para analisar o comportamento deste, devido a afundamentos.

Com base na revisão da literatura realizada, o presente trabalho objetiva, analisar o comportamento dinâmico da máquina assíncrona sujeita a afundamentos de tensão, considera-se nesta análise, as diferentes características do afundamento de tensão.

### 3 MÁQUINA ASSÍNCRONA

A máquina assíncrona com rotor de gaiola esquilo é a máquina mais utilizada e difundida por suas condições de projeto. Entre as suas principais vantagens pode-se citar: robustez, construção simples, eliminação de atrito de todos seus contatos elétricos deslizantes, custo reduzido. Motivo do interesse do estudo desta máquina sujeita aos problemas da qualidade de energia elétrica, considerando principalmente os afundamentos de tensão, que causam transitórios elétricos e mecânicos na mesma.

O motor de indução com rotor de gaiola esquilo consiste de duas partes, um estator estacionário e um rotor rotativo. O rotor é uma estrutura que gira dentro do estator separado por um pequeno entreferro. O enrolamento do rotor é um sistema de barras paralelas, ligeiramente inclinadas em relação ao eixo mecânico e curto-circuitadas em seus extremos por dois anéis, formando uma “gaiola de esquilo”. A bobinagem trifásica do estator consiste de enrolamentos distribuídos e deslocados entre si  $120^\circ$  elétricos. Na figura (3.1) pode-se visualizar, de forma mais detalhada os diversos elementos que constituem o motor de indução.

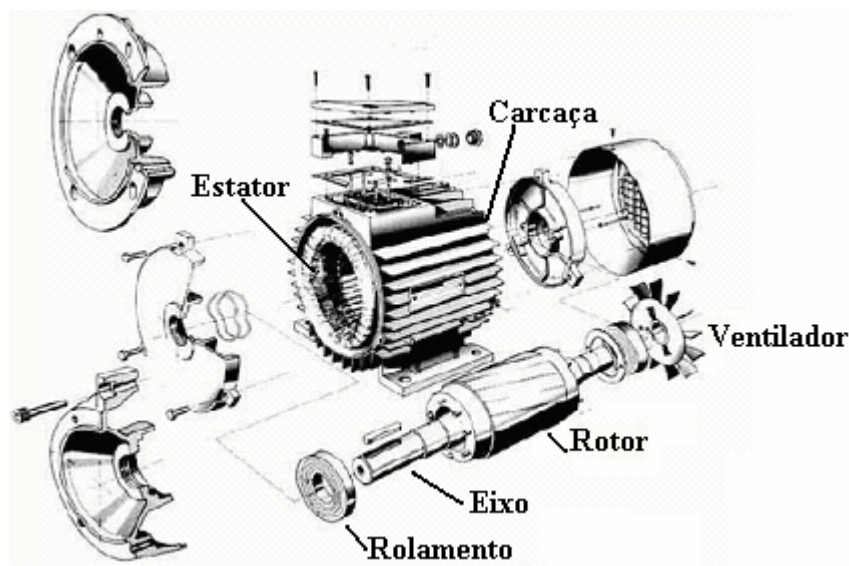


Figura 3. 1 Constituição do motor de indução [S.I.]

Apesar destas vantagens os motores de indução não tinham muita importância até os anos 80, pois quando se considerava condição de velocidade variável precisava-se de um equipamento auxiliar ou então havia grandes perdas de potência. O progresso da tecnologia de



semicondutores tornou possível construir conversores estáticos de frequência, que associados com microprocessadores de alto desempenho, possibilitam a construção de servos sistemas, utilizando motores de indução a baixo custo.

### 3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

As tensões trifásicas aplicadas aos enrolamentos do estator estabelecem correntes trifásicas através das bobinas, estas correntes dão origem a campos magnéticos alternados no entreferro, que somados, dão origem a um único campo magnético, formando assim um campo magnético girante bastante senoidal. O campo magnético tem direção radial, as superfícies entre o estator e rotor são consideradas geralmente lisas e a permeabilidade do ferro comparada com a do entreferro é admitida infinita. Considerando que os efeitos nas extremidades são desprezados, o campo magnético torna-se bidimensional. A velocidade do campo girante da máquina é determinada pelo número de pólos e a frequência aplicada ao estator, como mostra a equação (3.1):

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (3.1)$$

Sendo:

$N_s$ : Velocidade em rotações por minuto (rpm)

$f$ : Frequência (Hz)

$P$ : Número de pólos da máquina

As correntes nos enrolamentos da máquina criam fluxos magnéticos no entreferro entre o estator e o rotor. As trajetórias destes fluxos se completam com o ferro do rotor e do estator. O conjugado se produz pela tendência dos campos magnéticos existentes no estator e no rotor a alinhar seus eixos magnéticos. O conjugado é proporcional à amplitude das ondas de força magnetomotriz (fmm) do estator e do rotor, e do ângulo entre eles.

Para uma máquina assíncrona, o campo girante e o rotor têm velocidades angulares diferentes, segundo as quais o funcionamento pode ser:

- velocidade do rotor menor que a velocidade do campo girante mas no mesmo sentido, comportamento como motor fornecendo potência mecânica ao seu eixo;
- velocidade do rotor maior do que a síncrona, funcionamento como gerador. Neste caso utiliza-se outra máquina ligada ao eixo da primeira, e desta forma transfere-se energia mecânica que será convertida em energia elétrica nos terminais do estator da primeira máquina;
- campo girante do rotor e da armadura com sentidos de rotação opostos, a máquina encontra-se na região de frenagem.

A diferença entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor é conhecida como escorregamento das rotações ou escorregamento de rotação ou de fase. Prefere-se apresentar o escorregamento ( $s$ ), correspondente a uma determinada velocidade  $N$  (rpm) como uma fração da velocidade síncrona  $N_s$  (rpm), pela seguinte equação:

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (3.2)$$

### 3.2 PRINCÍPIOS GERAIS DE OPERAÇÃO

Os princípios de operação da máquina assíncrona são:

- o conjugado do motor de indução varia aproximadamente com o quadrado da tensão aplicada a seus terminais;
- a baixa resistividade das barras do rotor resulta em alta rotação nominal (baixo escorregamento), o que resulta em alto rendimento. Perdas do rotor são proporcionais ao escorregamento;
- a alta resistência do rotor resulta em alto conjugado de partida com baixa corrente de partida, mas resulta em baixo rendimento nominal;
- a frequência da tensão no rotor é proporcional ao escorregamento, sendo zero na rotação síncrona. Mas atinge o valor máximo na rotação próxima a zero (situação de operação como motor);
- as perdas do rotor são proporcionais ao escorregamento e estão todas confinadas dentro do rotor.

#### 4 MODELO MATEMÁTICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

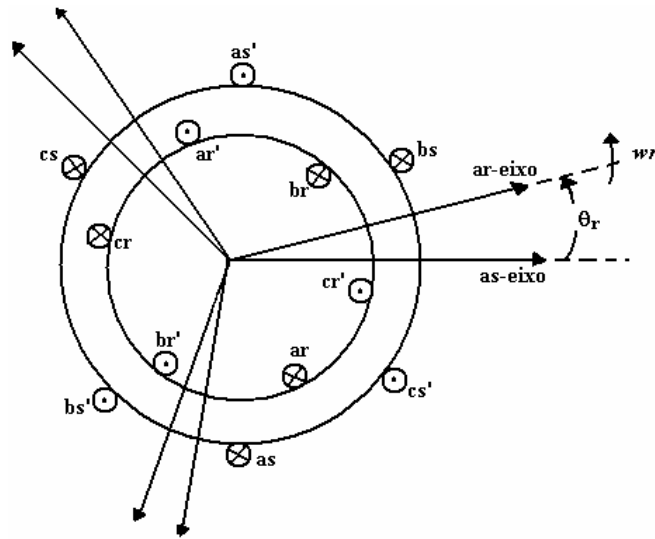
A análise matemática da máquina assíncrona consiste de equações diferenciais não lineares. A modelagem matemática é obtida através do conhecimento da estrutura construtiva da máquina, o que permite representar por meio de um circuito elétrico, fenômenos eletromagnéticos e mecânicos. O comportamento dinâmico da máquina assíncrona será obtido através das equações de tensão, corrente, fluxo concatenado, conjugado eletromagnético e posição angular.

A modelagem matemática da máquina assíncrona pode ser estudada através de um modelo trifásico, um modelo bifásico (dq0) e de um modelo vetorial. O modelo **trifásico** tem como desvantagem, o número de equações diferenciais, que faz seu processamento mais demorado e difícil.

O modelo bifásico **dq0**, diminui o número de variáveis das expressões matemáticas para descrever o comportamento dinâmico da máquina. Neste tipo de análise, se o sistema for equilibrado ou sem conexão de neutro a denominada fase “0” será eliminada, resultando num sistema de duas coordenadas (dq).

Contudo, os melhores avanços com relação aos *servosistemas* de corrente alternada foram obtidos com o uso de variáveis complexas, **modelo vetorial**. Esta técnica é definida com base no modelo bifásico (dq0), porém impondo-se que este plano configura um plano complexo, com um eixo real e outro imaginário.

Sabe-se que a máquina de indução trifásica é caracterizada por três bobinas distribuídas senoidalmente no estator e no rotor,  $\theta_r$  é a defasagem angular elétrica entre o eixo magnético do estator e do rotor, cada fase será defasada  $120^\circ$  elétricos em seu perímetro, como se observa na figura (4.1).



**Figura 4. 1 Máquina assíncrona trifásica de dois pólos (KRAUS, 1995)**

O campo magnético na máquina tem direção radial, considera-se que as superfícies entre o estator e o rotor são lisas e que a permeabilidade do ferro com relação à do entreferro é admitida infinita.

#### 4.1 EQUAÇÕES DE TENSÃO

As equações elétricas relacionam o comportamento de um circuito resistivo-indutivo acoplado magneticamente. As tensões do estator e do rotor para cada uma das fases (KRAUS, 1995) são dados pelas seguintes equações:

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

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

O subscrito (*s*) representa as grandezas de tensão, fluxo e corrente do estator e o subscrito (*r*) as grandezas do rotor. Os termos de fluxo presentes nas equações (4.1 e 4.2), representam o fluxo total concatenado por fase, composto pelas indutâncias próprias do estator e rotor ( $L_s$  e  $L_r$ ), pelas indutâncias de dispersão do estator e rotor ( $L_{ls}$  e  $L_{lr}$ ), e pela indutância mútua entre as fases do enrolamento do estator e rotor ( $L_m$ ). O fluxo concatenado por fase pode ser escrito da seguinte forma,  $\lambda_{as}$ :

$$\lambda_{as} = L_s i_{as} + L_s \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) i_{bs} + L_s \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) i_{cs} + L_m \cos(\theta_r) i_{ar} + L_m \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) i_{br} + L_m \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) i_{cr} \quad (4.3)$$

Considerando as três fases e usando o sistema matricial para compactar as expressões no sistema trifásico, a seguinte equação é obtida:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & pM_s & pM_s & pL_m \cos\theta_r & pL_m \cos\theta_{r1} & pL_m \cos\theta_{r2} \\ pM_s & R_s + pL_s & pM_s & pL_m \cos\theta_{r2} & pL_m \cos\theta_r & pL_m \cos\theta_{r1} \\ pM_s & pM_s & R_s + pL_s & pL_m \cos\theta_{r1} & pL_m \cos\theta_{r2} & pL_m \cos\theta_r \\ pL_m \cos\theta_r & pL_m \cos\theta_{r1} & pL_m \cos\theta_{r2} & R_r + pL_r & pM_r & pM_r \\ pL_m \cos\theta_{r2} & pL_m \cos\theta_r & pL_m \cos\theta_{r1} & pM_r & R_r + pL_r & pM_r \\ pL_m \cos\theta_{r1} & pL_m \cos\theta_{r2} & pL_m \cos\theta_r & pM_r & pM_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Sendo:

$M_s$ : Indutância mútua entre as fases do estator

$M_r$ : Indutância mútua entre as fases do rotor

$\theta_r$ : defasagem angular entre os enrolamentos da fase “a” do estator e “a” do rotor

$\theta_{r1}$ : ( $\theta_r - 2\pi/3$ ) defasagem angular entre os enrolamentos da fase “b” do estator e do rotor

$\theta_{r2}$ : ( $\theta_r + 2\pi/3$ ) defasagem angular entre os enrolamentos da fase “c” do estator e do rotor

$p$ : operador diferencial (d/dt)

A velocidade de um deslocamento angular arbitrário ( $\theta_g$ ) com relação à fase “a” do estator, é definido por:

$$w_g(t) = \frac{d}{dt} \theta_g(t) \quad (4.5)$$

Usualmente adota-se um referencial arbitrário como sendo um daqueles que possam ser definidos no próprio motor. Desta forma adota-se um dos seguintes referenciais:

- referencial fixo no estator  $w_g = 0$
- referencial fixo no rotor  $w_g = w_r$
- referencial fixo no campo do estator  $w_g = w_s$

Para obter o modelo dinâmico se faz necessário o cálculo do conjugado eletromagnético. O conjugado eletromagnético é produzido pela interação dos fluxos do estator e do rotor, esta interação se manifesta na variação da indutância mútua estator – rotor em função da posição do eixo. A expressão para o conjugado eletromagnético pode ser obtida da seguinte equação, (KRAUS, 1995):

$$T_e = \frac{PLm}{2\sqrt{3}\sigma L_s L_r} (\lambda_{as} (\lambda_{cr} - \lambda_{br}) + \lambda_{bs} (\lambda_{ar} - \lambda_{cr}) + \lambda_{cs} (\lambda_{br} - \lambda_{ar})) \quad (4.6)$$

Sendo  $P$  o número de pólos, e  $\sigma$  o coeficiente de dispersão global. Na equação (4.6), nota-se a presença de um duplo índice, onde o primeiro termo representa qual fase esta sendo analisada “a”, “b” e “c” e o segundo termo representa se é em relação ao estator ou ao rotor.

É mais conveniente expressar os parâmetros e as variáveis da máquina em valores unitários. A potência base e a tensão base são selecionadas, e todos os parâmetros e variáveis devem ser normalizados utilizando estas quantidades base. Sob este propósito, o conjugado base, pode ser expresso em função da potência e da frequência base da máquina:

$$T_b = \frac{P_b}{(2/P)w_b} \quad (4.7)$$

Finalizando, a modelagem trifásica do comportamento dinâmico do motor de indução requer da solução do sistema mecânico. A equação do sistema mecânico relaciona as variáveis elétricas do motor com a carga, esta descreve a evolução da velocidade mecânica  $w_m$  ou da posição do eixo em função do conjugado eletromagnético e dos parâmetros da carga,

dados pelo conjugado de carga  $T_L$ , o momento de inércia  $J$  e o coeficiente de atrito  $B$ . A equação diferencial de primeira ordem do conjugado eletromagnético é reescrita aqui por:

$$T_e = J \frac{d}{dt} \omega_m + B \omega_m + T_L \quad (4.8)$$

## 4.2 MODELO DQ0

Para simplificar o modelo do motor de indução trifásico e reduzir o número de variáveis dadas na equação (4.4), introduz-se o modelo dq0 (VAS, 1993). Substituindo-se o sistema trifásico de três eixos defasados  $120^\circ$  elétricos entre si, por um sistema bifásico de dois eixos defasados entre si de  $90^\circ$  elétricos. Na figura (4.2) representa-se a disposição física do sistema trifásico e do sistema dq0.

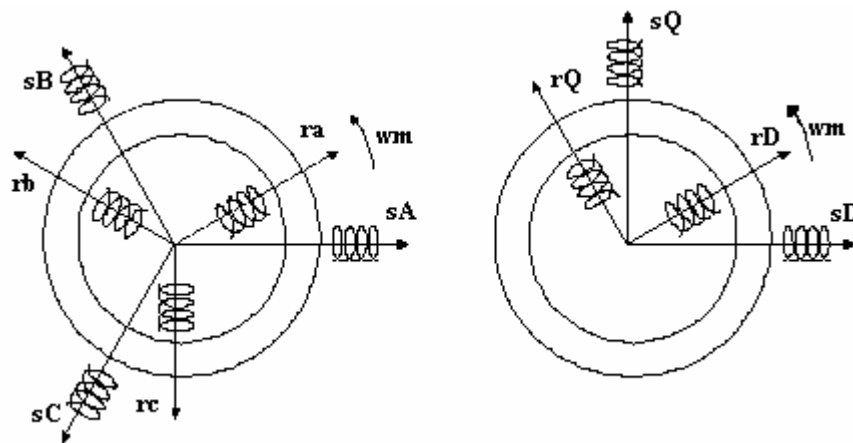


Figura 4. 2 Esquema da transformação física equivalente

A representação nos dois eixos elimina o acoplamento magnético mútuo entre os bobinados de fase ( $M_s$  e  $M_r$ ). Com isso o fluxo concatenado num eixo é independente do outro. Substituindo-se assim o sistema trifásico de três eixos por um sistema de dois eixos.

Em uma máquina trifásica simétrica, as magnitudes do estator do eixo direto (D) e de quadratura (Q) são fictícias. A equivalência para estas magnitudes do eixo direto e de quadratura com as magnitudes por fase é dada através da seguinte equação, (VAS, 1993):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_g) & \cos\left(\theta_g - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_g + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta_g) & \sin\left(\theta_g - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_g + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

O cálculo das tensões por fase, será obtido das magnitudes do eixo direto e de quadratura.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_g) & -\sin(\theta_g) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta_g - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_g - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta_g + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_g + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

O termo (2/3) corresponde ao fator de escala para que as grandezas do sistema bifásico tenham a mesma magnitude do sistema trifásico. Com as hipóteses usuais de simetria e linearidade (a saturação, o efeito pelicular e as perdas do núcleo não são consideradas), o modelo da máquina assíncrona de quarta ordem expresso em correntes e tensões  $dq$  é dado pela seguinte equação, (KRAUS, 1995):

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{w_b} X_{ss} & \frac{w_g}{w_b} X_{ss} & \frac{p}{w_b} X_M & \frac{w_g}{w_b} X_M \\ -\frac{w_g}{w_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{w_b} X_{ss} & -\frac{w_g}{w_b} X_M & \frac{p}{w_b} X_M \\ \frac{p}{w_b} X_M & \left(\frac{w_g - w_r}{w_b}\right) X_M & r'_r + \frac{p}{w_b} X'_{rr} & \left(\frac{w_g - w_r}{w_b}\right) X'_{rr} \\ -\left(\frac{w_g - w_r}{w_b}\right) X'_M & \frac{p}{w_b} X_M & -\left(\frac{w_g - w_r}{w_b}\right) X'_{rr} & r'_r + \frac{p}{w_b} X'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Na equação (4.11) as indutâncias aparecem como impedâncias, na frequência elétrica base 60 Hz (377 rad/s). Todas as quantidades do rotor são referidas ao estator. As correntes e as tensões são expressas na estrutura rotativa síncrona  $dq$ . O conjugado eletromagnético considerando as correntes no modelo  $dq$  é dado por, (KRAUS, 1995):



$$Te = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (4.12)$$

### 4.3 MODELO VETORIAL

A notação vetorial permite a transformação de valores instantâneos num sistema trifásico sobre um plano complexo. Neste plano, o fasor de espaço gira com uma velocidade angular equivalente à frequência angular do sistema trifásico da fonte. Na figura (4.3) é mostrado o esquema equivalente para este novo modelo.

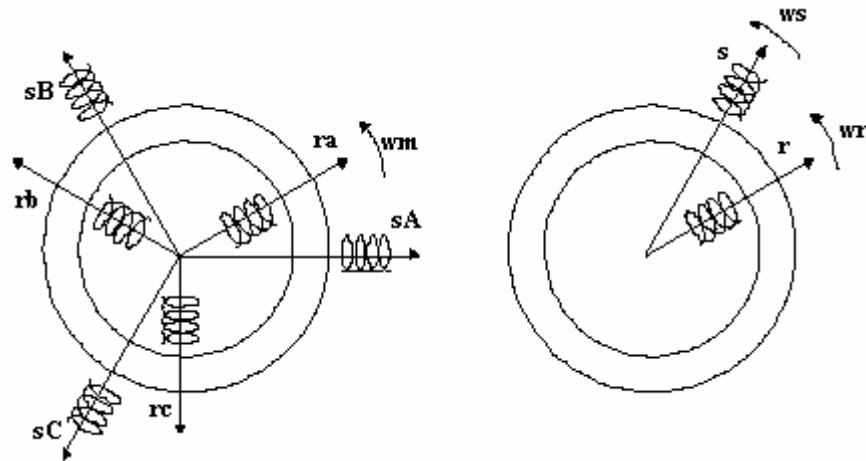


Figura 4.3 Esquema da transformação do modelo trifásico a modelo vetorial

A notação vetorial significa que se tem uma representação espacial, todas as grandezas elétricas serão representadas como entidades complexas num eixo real e imaginário. O vetor complexo da tensão do estator é definido por:

$$\vec{v}_s = \frac{2}{3} (v_{as}(t) + a v_{bs}(t) + a^2 v_{cs}(t)) \quad (4.13)$$

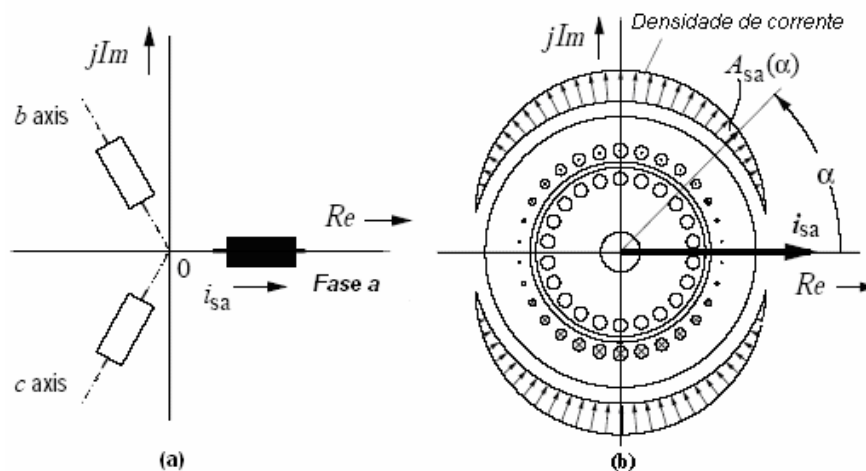
Sendo:  $a = e^{j120^\circ} = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ) = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$

Os três termos do lado direito da equação (4.13) são vetores complexos. Suas magnitudes são determinadas por valores instantâneos das respectivas tensões de fase, e sua

orientação espacial depende da direção do eixo de cada bobinado. A expressão (4.13) representa a tensão resultante nas três fases. As tensões de cada fase podem ser obtidas a partir da notação vetorial, por:

$$\begin{aligned} v_{as} &= \text{Re}\{\bar{v}_s\} \\ v_{bs} &= \text{Re}\{a^2\bar{v}_s\} \\ v_{cs} &= \text{Re}\{a\bar{v}_s\} \end{aligned} \quad (4.14)$$

O uso de vetores de espaço, é um método eficiente para o modelo dinâmico da máquina assíncrona. Para descrever o conceito do vetor de espaço no motor de indução, um bobinado trifásico é considerado na figura (4.4), a bobina da fase *a* é alinhada com o eixo real do plano complexo, as fases *b* e *c* têm um deslocamento angular de  $120^\circ$  e  $240^\circ$  elétricos, respectivamente, apenas a fase *a* é energizada para obter a distribuição da densidade de corrente, conforme é ilustrado na figura (4.4). Cada corrente de fase cria uma fmm senoidal, cuja amplitude é proporcional à respectiva magnitude da corrente, enquanto a orientação espacial é determinada pela direção do respectivo eixo de fase e da polaridade da corrente. A fmm total no estator é obtida da superposição da distribuição da densidade de corrente nas três fases.



**Figura 4.4** Bobinado trifásico do estator com a fase “a” energizada: a) representação simbólica b) distribuição da densidade de corrente (HOLTZ, 2002)

Os vetores de espaço, para o fluxo e a corrente são definidos de forma análoga à equação de tensão no sistema vetorial.

$$\vec{i} = \frac{2}{3}(i_{as}(t) + ai_{bs}(t) + a^2i_{cs}(t)) \quad (4.15)$$

$$\vec{\lambda} = \frac{2}{3}(\lambda_{as}(t) + a\lambda_{bs}(t) + a^2\lambda_{cs}(t)) \quad (4.16)$$

Com base nas equações anteriores, a equação diferencial para o cálculo do fluxo concatenado em variáveis complexas da máquina assíncrona é obtida da seguinte equação, (HOLTZ, 2002):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{\lambda}_s \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & -a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\lambda}_s \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{v}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

As constantes complexas da equação diferencial (4.17) são:

$$a_{11} = \frac{R_s}{\sigma L_s} + jw_g; \quad a_{22} = \frac{R_r}{\sigma L_r} + j(w_g - w_r); \quad a_{12} = \frac{L_m}{L_r} \frac{R_s}{\sigma L_s}; \quad a_{21} = \frac{L_m}{L_s} \frac{R_r}{\sigma L_r}$$

Considerando a corrente como variável de estado, a equação diferencial do modelo fasorial é dada por, (HOLTZ, 2002):

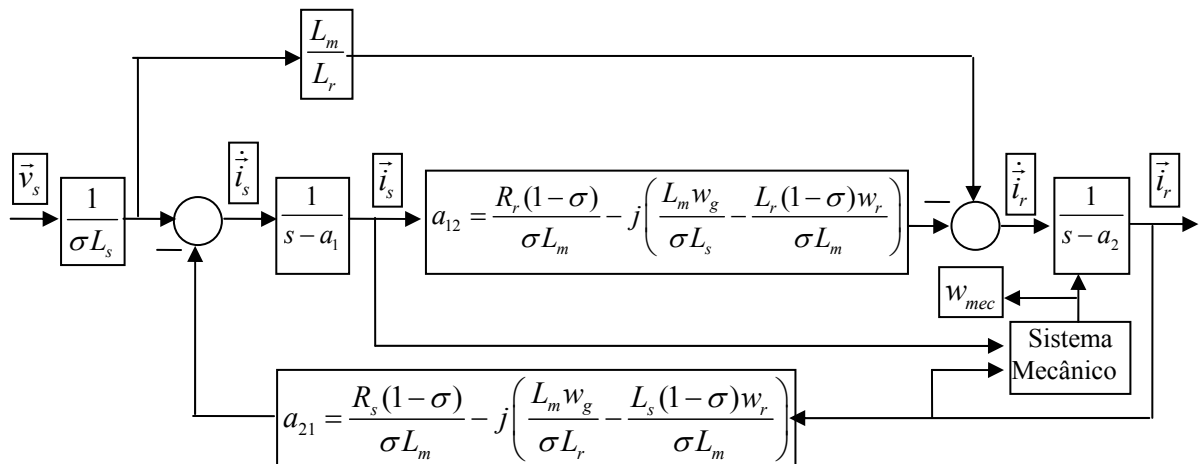
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s & M \\ -M & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_s + jw_s L_s & jw_s M \\ j(w_s - w_r)M & r_r' + j(w_s - w_r)L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M \\ -M & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \vec{v}_s \\ \vec{v}_r \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

O conjugado eletromagnético do modelo vetorial complexo utilizando o fluxo e a corrente como variável de estado é dado por, (HOLTZ, 2002):

$$Te = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \text{Im}(\lambda_s \lambda_r') \quad (4.19)$$

$$Te = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \text{Im}(i_s i_r') \quad (4.20)$$

A representação do modelo dinâmico completo em diagrama de blocos, para a variável de estado corrente é:



**Figura 4. 5 Diagrama de blocos para o cálculo da variável de estado - corrente**

O diagrama é caracterizado como função de transferência complexa, o que confere a descrição matemática de uma forma bastante compacta. Este diagrama, auxilio a construção do modelo realizado em Simulink/Matlab.

#### 4.3.1 VANTAGENS DO MODELO VETORIAL

Algumas das vantagens do modelo vetorial são:

- as grandezas da máquina em variáveis complexas proporcionam um módulo e um ângulo, o que dá uma característica fisicamente espacial. Descrevendo assim o comportamento dinâmico mais exato das grandezas da máquina;
- as grandezas da máquina no sistema vetorial são utilizadas para o controle das variáveis da máquina;
- o sistema vetorial representa variações na amplitude ou velocidade angular das variáveis do sistema;
- a defasagem vetorial entre duas variáveis será representada pelo deslocamento angular dos respectivos vetores de espaço.

#### 4.4 SISTEMA MECÂNICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

Há muitos fatores que interferem o comportamento da máquina assíncrona quando esta é submetida a quedas de tensão: tipo de falha que produziu o afundamento, tempo de

restauração da falha no sistema, configuração do sistema elétrico, parâmetros elétricos e mecânicos da máquina, etc.

Para considerar a influência do sistema mecânico da máquina assíncrona sujeita a um afundamento de tensão, é preciso conhecer a inércia, o conjugado de carga, etc. A demanda de potência do motor será dependente das características da carga. O conjugado de carga do motor de indução poderá ser linearmente dependente do quadrado da velocidade mecânica do motor ou poderá ser constante. O comportamento do motor devido a afundamentos de tensão será observado quando a carga mecânica é constante ou quando esta depende do quadrado da velocidade mecânica do motor.

#### 4.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA MECÂNICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

A equação do sistema mecânico do motor assíncrono é, em geral, dado por:

$$T_e - T_L = J \frac{dw_m}{dt} \quad (4.21)$$

Onde,  $T_e$  é o conjugado eletromagnético do motor,  $T_L$  é o conjugado de carga do motor e  $J$  é o momento de inércia do eixo do rotor e da carga. O conjugado de carga em muitos casos depende da velocidade do motor, e em alguns casos este tem um valor constante. De forma geral representa-se o conjugado de carga por:

$$T_L = k_1 + k_2 w_r + k_3 w_r^2 \quad (4.22)$$

Uma máquina pode ter um conjugado de carga com um ou mais coeficientes do conjugado de carga  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ . Considerando que a máquina entrega a mesma quantidade de potência de saída à carga, pode-se escrever:

$$w_{req} T_{Leq} = \sum_{i=1}^n w_{r,i} T_{L,i} \quad (4.23)$$

#### 4.4.2 TIPOS DE CONJUGADO DE CARGA

Uma diminuição da tensão nos terminais do motor causa uma queda no conjugado e na velocidade. As cargas mecânicas conectadas ao motor conseqüentemente influenciam no comportamento da máquina assíncrona sujeita a afundamento de tensão.

O sistema mecânico do motor deve ser dito estável quando o conjugado desenvolvido por este é equivalente ao conjugado requerido pela carga, quando isso ocorre, o motor funcionará em estado estável com velocidade fixa. A resposta do motor considerando algumas variações na tensão dará alguma idéia acerca da estabilidade do sistema e do comportamento da máquina considerando diferentes tipos de carga. Têm-se diferentes tipos de carga com diferentes curvas conjugado versus velocidade que afetam o comportamento do motor de formas distintas, conforme é mostrado a seguir.

##### – Conjugado constante – carga de velocidade variável

O conjugado requerido para este tipo de carga é constante, e a potência é linearmente proporcional à velocidade. As máquinas como compressores, transporte, tem esta característica, como mostra a figura (4.6).

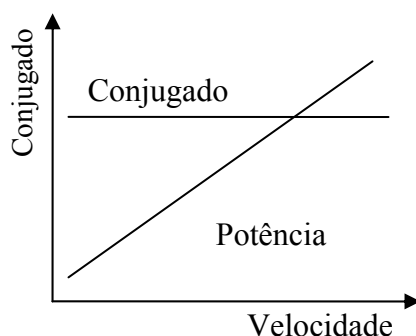
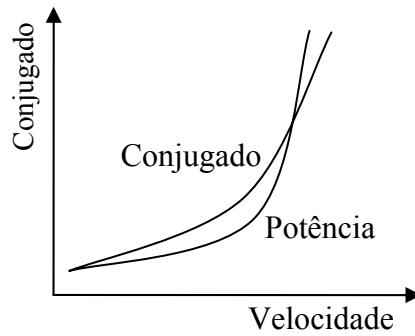


Figura 4. 6 Conjugado constante – velocidade de carga variável

##### – Conjugado variável – carga de velocidade variável

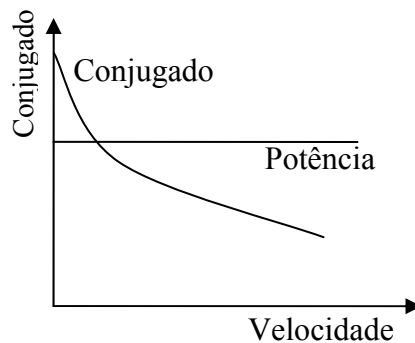
Comumente encontrada na indústria e algumas vezes são conhecidas como conjugado de carga quadrático. O conjugado é o quadrado da velocidade mecânica do motor, enquanto que a potência é o cubo da velocidade. Esta é a característica típica de bombas e ventiladores, que pode ser vista na figura (4.7).



**Figura 4. 7 Conjugado variável – velocidade de carga variável**

– **Carga de potência constante**

Este tipo de carga não é comum, mas algumas vezes encontrada na indústria. A potência permanece constante enquanto que o conjugado varia, como é ilustrado na figura (4.8).



**Figura 4. 8 Carga de potência constante**

O conjugado é inversamente proporcional à velocidade, o qual teoricamente significa que o conjugado é infinito em uma velocidade zero e que o conjugado é zero em uma velocidade infinita. Na prática, há sempre um valor finito para o conjugado, chamado *breakaway*. Este tipo de carga é encontrado em sistemas de tração que requerem um elevado conjugado em baixas velocidades, para a aceleração inicial, e um conjugado reduzido quando se chega à velocidade nominal.

## 5 SIMULAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA (Matlab/Simulink)

Neste capítulo apresenta-se o modelo do motor de indução, utilizando o “software” MATLAB/Simulink. As equações mencionadas no Capítulo 4 são utilizadas. O modelo completo do motor de indução será composto de sub-blocos, o que facilitará a compreensão da aplicação das equações do motor de indução, Anexo A. Os sub-blocos, são descritos a seguir:

**Bloco *abcs/dqs*:** serve para transformar o sistema de referência trifásico *abcs* ao sistema de referência bifásico *dqs*. Suas entradas são as tensões no sistema trifásico com a soma das correntes nas três fases, e suas saídas são as tensões na referência *dqs*.

**Bloco Fluxo:** as tensões no referencial *dqs* e a velocidade angular são as entradas, através das equações no anexo A, obtém-se o fluxo concatenado no estator e no rotor.

**Bloco Corrente/Conjugado:** tem como entrada o fluxo no referencial *dqs*. Suas saídas são o conjugado eletromagnético e as correntes no referencial *dqs*.

**Bloco *dqs/abcs*:** realiza a transformação do sistema de referência *dqs* ao sistema trifásico *abcs*. Suas entradas são as correntes no referencial *dqs* (dois eixos) e suas saídas são as correntes trifásicas no estator.

As figuras (5.1) a (5.6) apresentam o modelo completo e os sub-blocos, que integram o sistema do motor de indução.



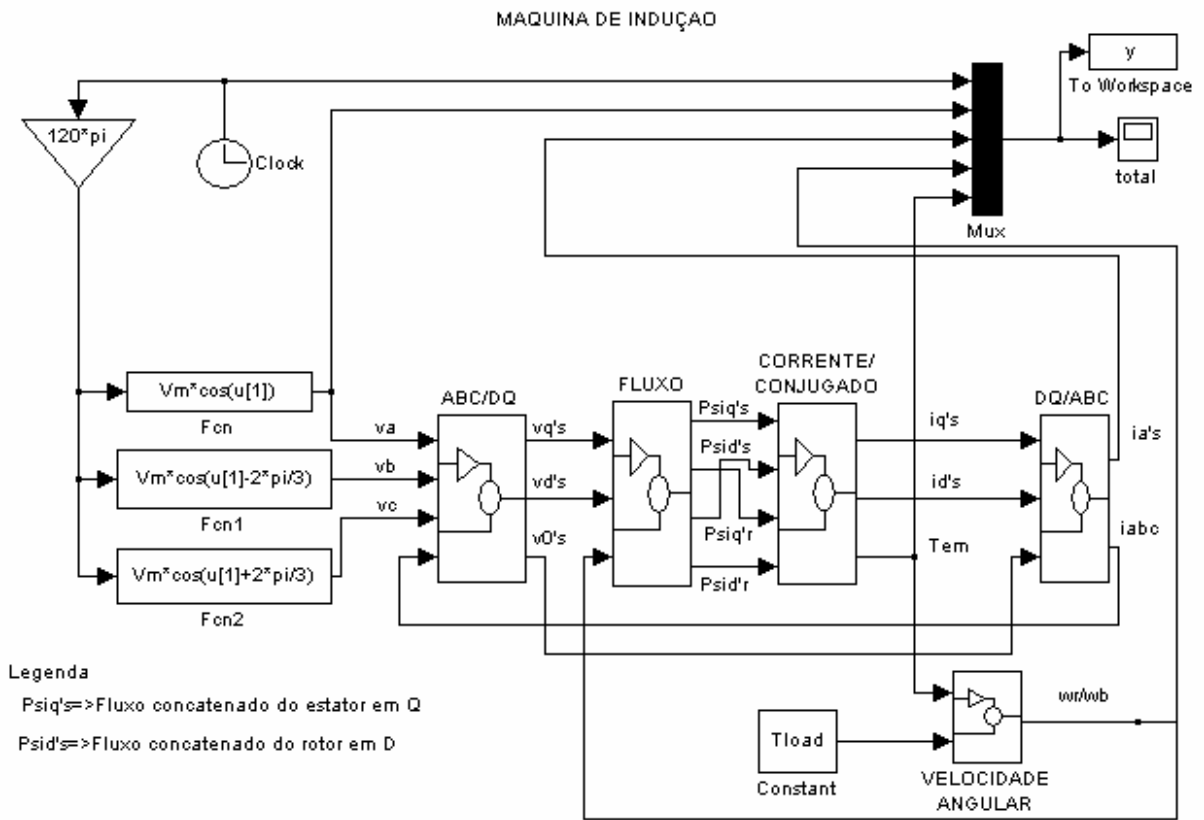


Figura 5. 1 Modelo completo da máquina assíncrona – Matlab/Simulink

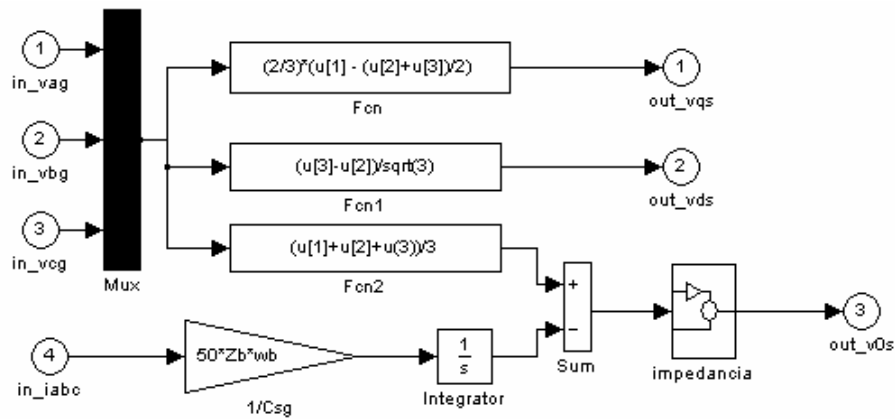
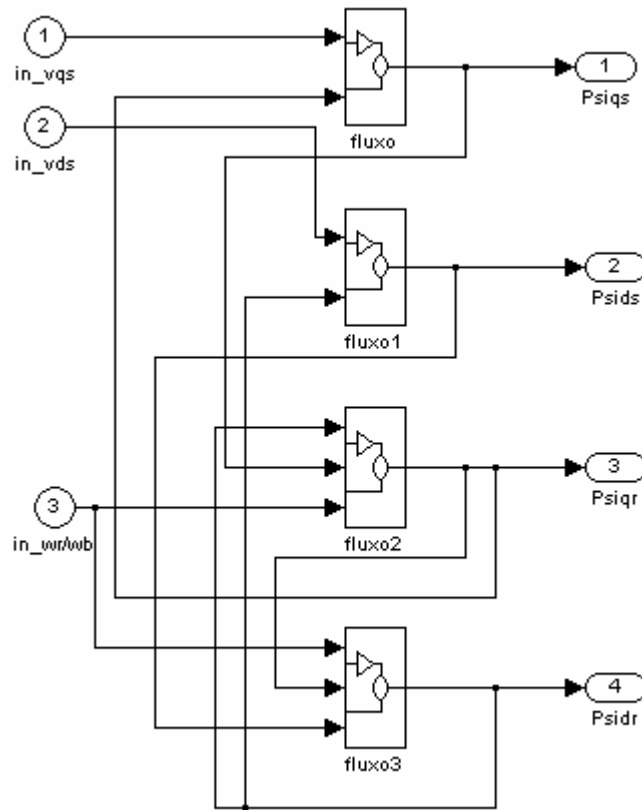
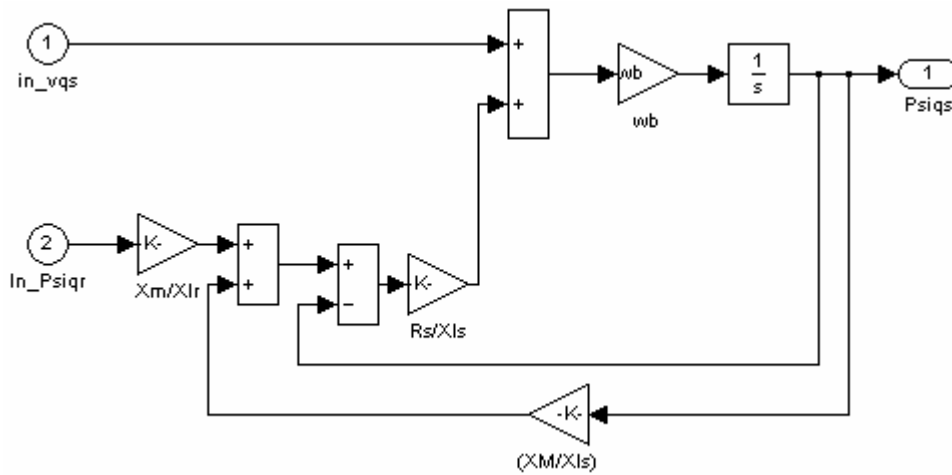


Figura 5. 2 Transformação das tensões no sistema trifásico *abc* ao sistema *dq*s



**Figura 5.3** Diagrama de blocos para a obtenção do fluxo concatenado através das tensões no sistema *dqs* e da velocidade mecânica



**Figura 5.4** Diagrama de bloco do fluxo concatenado

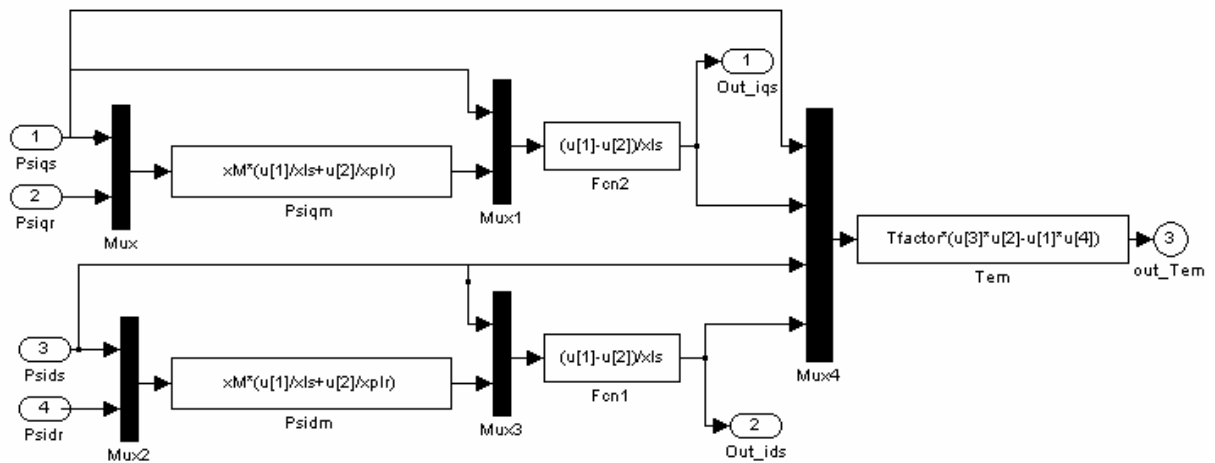


Figura 5. 5 Diagrama de blocos para obtenção das correntes e do conjugado eletromagnético

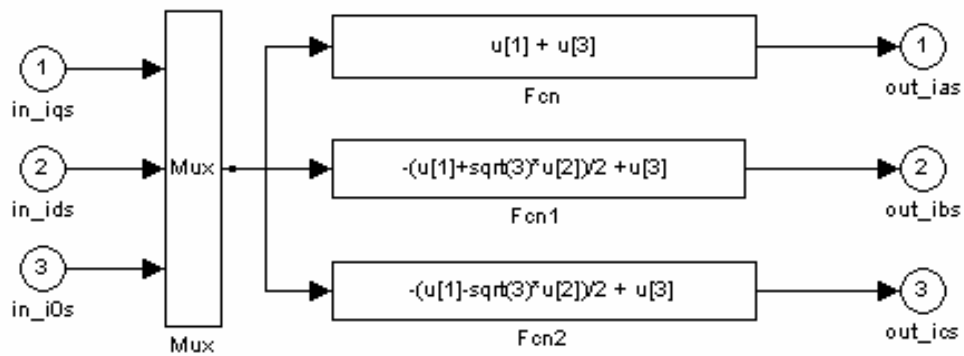


Figura 5. 6 Transformação das correntes no sistema  $dqs$  ao sistema trifásico  $abc$

As equações utilizadas para a simulação da máquina assíncrona são resumidas no Anexo A. As figuras (5.7) e (5.8) mostram a tensão, corrente do estator, e as formas de onda do conjugado e da velocidade para um motor de 20 HP de potência, os dados do motor são apresentados no Anexo D. Considera-se na simulação, figura (5.8), um afundamento simétrico 60% da magnitude da tensão com uma duração de 400 ms, entre 0,8 e 1,2 segundos. O conjugado de carga foi considerado constante ( $T_L = T_b/2$ ),  $T_b$  é o conjugado base do motor, equação (4.7).

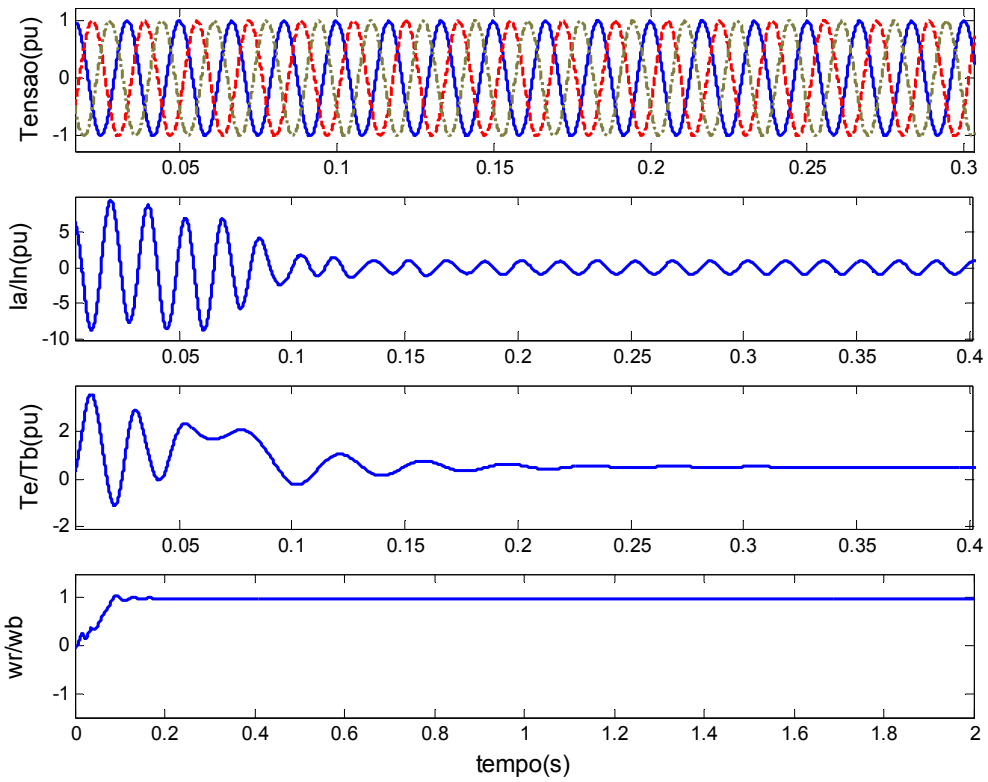


Figura 5. 7 Grandezas do motor de indução na partida, modelo Simulink/Matlab ( $T_L=T_b/2$ )

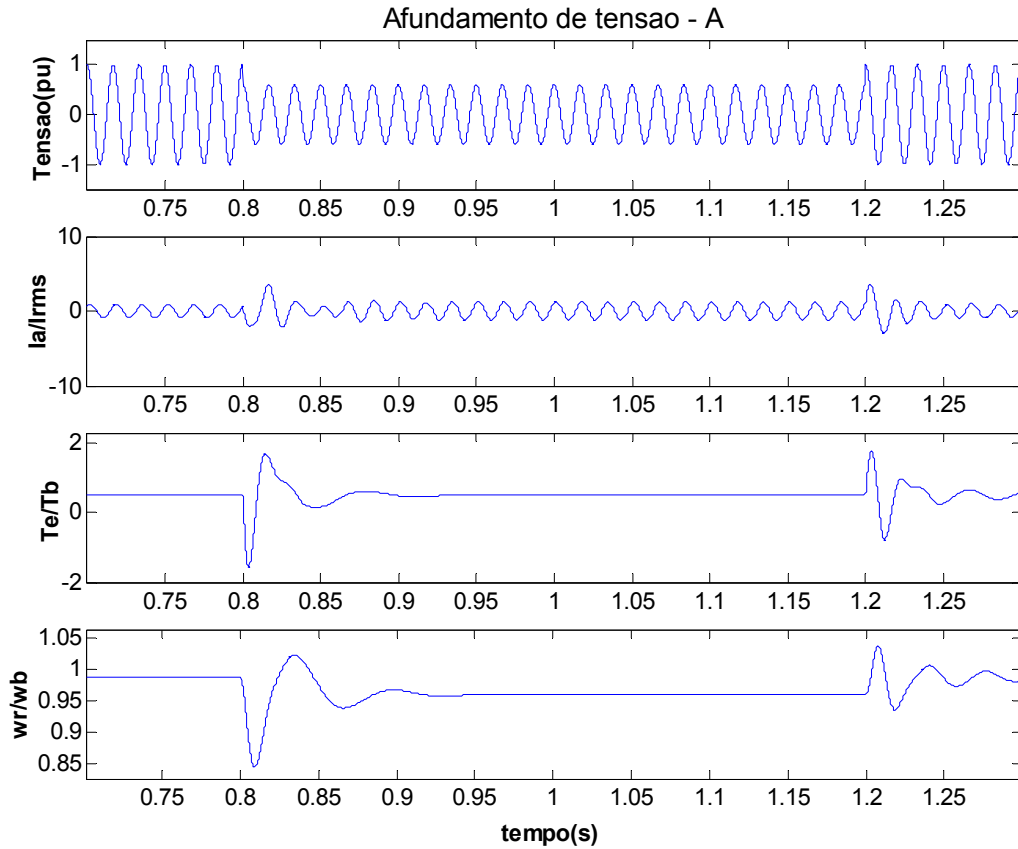


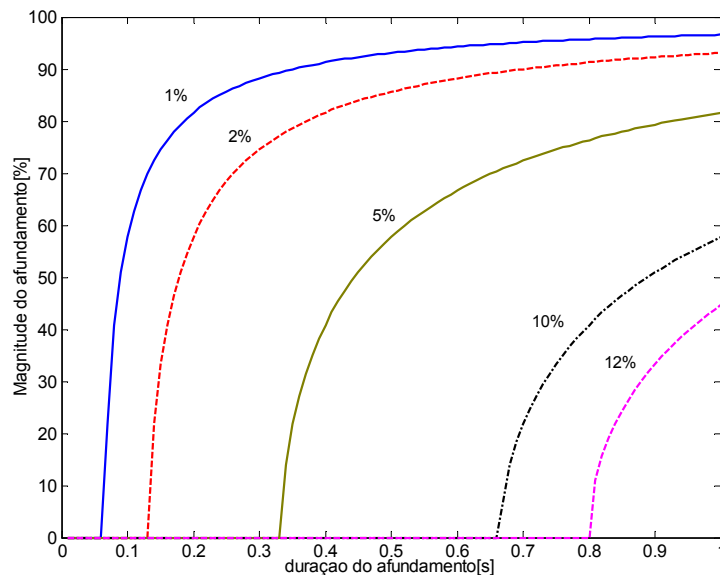
Figura 5. 8 Grandezas do motor de indução - afundamento nas três fases ( $60\%V_N$ , 400 ms), modelo Simulink/Matlab (motor 20 HP,  $T_L = T_b/2$ )

A queda de tensão nos terminais do motor causo picos de corrente e de conjugado no instante inicial e final do afundamento. Assim como, uma pequena queda da velocidade durante o afundamento. Observou-se, também, que a corrente não diminuiu durante o afundamento, devido a que o conjugado de carga é constante, pelo qual manteve-se esta corrente para manter o conjugado eletromagnético durante o afundamento.

Das equações (3.2) e (4.21) do escorregamento e da velocidade mecânica do motor, é obtida uma expressão para o incremento do escorregamento ( $\Delta s$ ) devido ao afundamento de tensão de duração ( $\Delta t$ ), cuja magnitude do afundamento é ( $V_{sag}$ ), (BOLLEN, 2000):

$$\Delta s = \frac{1 - (V_{sag})^2}{2H} \Delta t \quad (5.1)$$

Sob esta equação, foram simuladas as curvas de tolerância da magnitude do afundamento de tensão, considera-se o incremento do escorregamento como fator limitante. A figura (5.9) resultou da simulação de um motor de 20HP (constante de inércia;  $H = 3,33$  s).

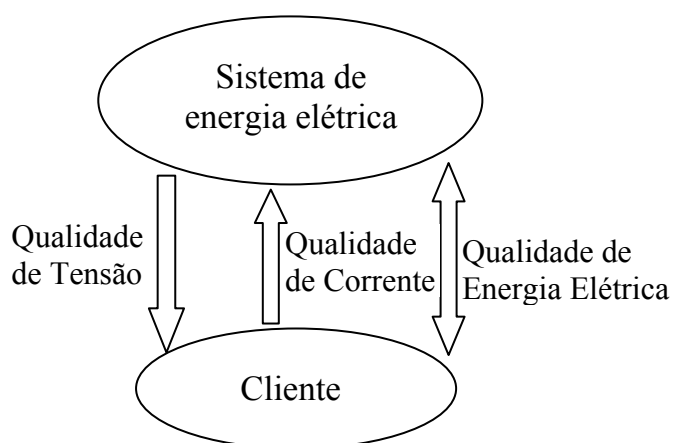


**Figura 5.9** Curvas de tolerância da magnitude do afundamento considerando o incremento do escorregamento como fator limitante ( $\Delta s = 1\%, 2\%, 5\%, 10\%, 12\%$ )

Considerando o escorregamento como fator limitante, o motor de indução não funcionará para algum afundamento cuja magnitude e duração, estejam abaixo destas curvas.

## 6 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A definição da qualidade de energia dada pela IEEE Std 1100 (IEEE, 1992) é: “Qualidade de energia é o conceito de fornecer energia elétrica e de aterrar um equipamento sensível de forma que seja apropriado à operação desse equipamento”. A IEC (*The International Electronic Commission*), entretanto, utiliza a compatibilidade eletromagnética para definir a qualidade de energia (IEC 61000-1-1): “A compatibilidade eletromagnética é a habilidade do equipamento ou sistema de funcionar satisfatoriamente num ambiente eletromagnético sem introduzir distúrbios eletromagnéticos intoleráveis”. Em várias publicações, a qualidade de energia é vista como o estudo ou a descrição dos distúrbios da tensão ou da corrente, e os efeitos que estes causam no sistema de energia elétrica, figura (6.1).

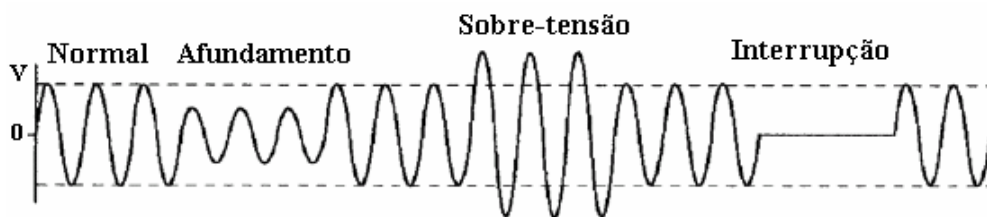


**Figura 6. 1 Esquema - Qualidade de energia elétrica**

O objetivo do sistema de energia elétrica é fornecer energia elétrica para os terminais dos equipamentos elétricos, e manter a tensão nos terminais dentro de certos limites, que não alterem o funcionamento dos equipamentos. A qualidade de energia considera um conjunto de problemas que podem ocorrer no sistema, como variações de tensão, interrupções, harmônicas, etc.

As variações de tensão são divididas em variações de longa duração, com uma duração superior a 1 minuto, e de pequena duração com uma duração menor ou igual que 1 minuto. Assim:

- **Sobre-tensões de longa duração:** incremento da tensão eficaz (*rms – root mean square*), superior a 110% durante um tempo superior a 1 minuto. Algumas das causas destas variações de tensão são: chaveamento de cargas (desconexão de cargas), incorreta configuração de *taps* em transformadores, variação na compensação reativa de um sistema (conexão de um banco de capacitores), etc.
- **Sub tensões de longa duração:** decremento do valor eficaz da tensão a valores inferiores a 90%, com durações superiores a 1 minuto. Este tipo de variação pode ser devido ao chaveamento de cargas (conexão de cargas), desconexão de banco de capacitores, sobrecargas de circuitos, etc.
- **Interrupção sustentada:** acontece quando a fonte de tensão permanece em zero num período de tempo superior a 1 minuto. Este tipo de interrupção é freqüentemente permanente e requer a intervenção humana para o restabelecimento do sistema. As causas incluem falha no sistema de energia elétrica, intervenção errada do operário, etc.
- **Afundamentos de tensão (*voltage sag*):** decremento entre 10% a 90% da tensão eficaz com durações entre 0,5 ciclo a 1 minuto. Os afundamentos são usualmente associados com falhas no sistema, também podem ser causados por energização de cargas pesadas, elevada corrente de partida em motores.
- **Sobre-tensão (*voltage swell*):** incremento entre 110% a 180% (1,1 a 1,8 pu em valores unitários) da tensão eficaz com durações de 0,5 ciclo a 1 minuto. Como os afundamentos de tensão, as sobre-tensões são associadas com falhas no sistema de energia elétrica, mas não são freqüentes no sistema. As sobre-tensões, também podem ser causadas, pela desconexão de cargas pesadas, energização de um banco de capacitores, etc.
- **Pequena interrupção:** a fonte de tensão ou a corrente de carga decresce a uma magnitude inferior a 10% da tensão nominal em um tempo inferior a 1 minuto. A causa desta variação é devido às falhas no sistema de energia elétrica, falhas no equipamento, mau funcionamento do sistema de controle, etc.



**Figura 6. 2 Distúrbios comuns da qualidade de energia [S.I.]**

A falta da qualidade de energia não só afeta os componentes eletrônicos sensíveis de alguns equipamentos. Na realidade, distúrbios como harmônicas e afundamentos de tensão podem afetar o desempenho de um motor ou produzir sobre aquecimento e saturação em transformadores como, também, perda de dados em computadores.

Para controlar os problemas de qualidade de energia, normas têm sido estabelecidas em termos internacionais, identificando os vários aspectos da qualidade de energia com a finalidade de definir os limites aceitáveis de muitas das medidas conhecidas. Antes de solucionar algum problema da qualidade de energia, é mais eficaz primeiramente analisá-lo e avaliá-lo.

## 6.1 AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

As definições dos afundamentos de tensão (*voltage sags*) e sobre-tensões (*voltage swell*) têm evoluído nos últimos cinquenta anos. O termo **sag** é usado pela comunidade de qualidade de energia, para descrever um tipo específico de variação de tensão que afeta o sistema elétrico. A definição para este fenômeno dada pela IEC é **dip**.

Os afundamentos de tensão são reduções de curta duração na magnitude da tensão eficaz. De acordo com a IEEE Std. 1159: “A magnitude do afundamento de tensão é de 10 % a 90 % da tensão eficaz com uma duração de 0,5 ciclo a 1 minuto”.

Os afundamentos de tensão são geralmente caracterizados por uma magnitude e duração e representados em gráfico bidimensional que relaciona estas duas grandezas. Sob esta representação simplificada não se consideram as diferentes magnitudes das tensões individuais de cada fase (assimetria ou desequilíbrio na alimentação), e as variações do



ângulo de fase, que podem ocorrer devido à propagação do afundamento a outros níveis de tensão.

Como será observado nas seções seguintes, o afundamento de tensão pode ser simétrico ou assimétrico, o que dependerá das causas de sua origem. O afundamento de tensão é simétrico se as magnitudes do afundamento de tensão em cada fase são equivalentes e a relação entre as fases é de  $120^\circ$  elétricos, de outra forma o afundamento de tensão é assimétrico. Curto-circuitos trifásicos ou uma elevada corrente de partida nos motores pode produzir afundamentos simétricos. Enquanto que, afundamentos devido às falhas monofásicas, fase-fase, fase-fase-terra, transmitida a níveis inferiores de tensão, pode causar afundamentos assimétricos. As tensões assimétricas apresentam efeitos prejudiciais numa máquina assíncrona, como sobre aquecimento, assimetria nas correntes de linha, pulsações do conjugado, ineficiência na máquina, etc.

Muitos esforços estão sendo realizados para compreender, quantificar e minimizar o perigo de impacto dos afundamentos de tensão no sistema, conhecimento das características do afundamento de tensão, informação estatística que descreva as probabilidades de ocorrência desta variação de tensão, e informação que descreva a sensibilidade de cargas importantes para analisar os afundamentos de tensão sobre o sistema de energia elétrica. Este trabalho está focalizado sobre o comportamento da máquina assíncrona sujeita a estas variações de tensão, como do estudo e das características do afundamento de tensão no sistema de energia elétrica.

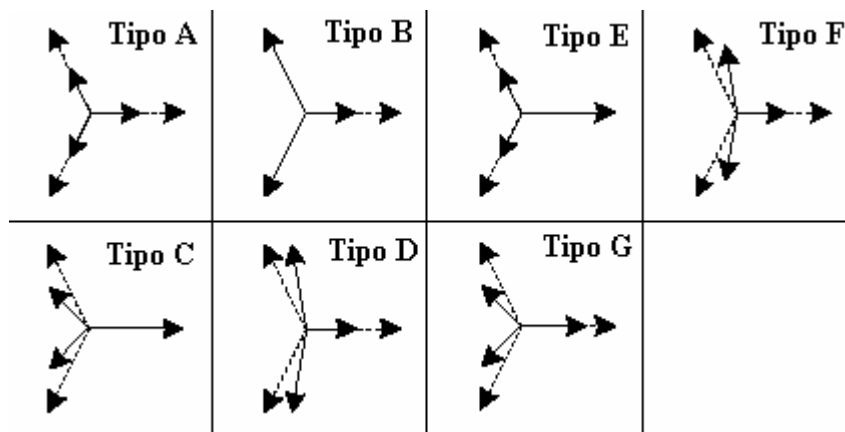
### **6.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Os afundamentos de tensão são usualmente associados com falhas no sistema de energia elétrica, elevada corrente de partida nos motores e energização de grandes transformadores. Conhecendo a causa do afundamento de tensão é que se classifica esta variação de tensão.

No sistema elétrico têm-se diferentes tipos de falhas trifásicas, fase-fase, fase-fase-terra ou fase-terra, que conduzem a diferentes tipos de afundamentos. As falhas trifásicas são as mais severas, mas também as menos freqüentes, enquanto que, as falhas monofásicas são comuns no sistema.

A relação entre o tipo de falha, conexão dos transformadores e a conexão da carga, influencia na classificação dos afundamentos de tensão, consideram-se na classificação cargas trifásicas. Os afundamentos são classificados em sete tipos (BOLLEN, 1997), o afundamento tipo A é simétrico e os demais são assimétricos. Os tipos mais comuns de afundamentos de tensão para cargas trifásicas são os tipos C e D, devido às falhas monofásicas.

A figura (6.3) apresenta os diagramas fasoriais dos tipos de afundamentos de tensão. Os afundamentos de tensão tipo E, F e G (devido a uma falha fase-fase-terra) não são freqüentes no sistema, o afundamento de tensão do tipo B, contém um componente de seqüência zero que raramente é transferido nos terminais de cargas trifásicas.



**Figura 6. 3 Diagramas fasoriais dos tipos de afundamentos de tensão**

A base matemática da classificação dos afundamentos de tensão foi apresentada em (BOLLEN, 1998a). A classificação do afundamento em sete tipos é detalhada a seguir:

- tipo A, devido às falhas trifásicas ou a uma elevada corrente de partida em motores assíncronos. Tem-se uma queda na magnitude de tensão igual em todas as fases;
- tipo B, devido a uma falha monofásica. Queda de tensão em uma fase, as outras fases não variam;
- tipo C, devido às falhas monofásicas ou fase-fase. Duas fases são afetadas em magnitude e argumento em quanto à terceira fase não varia;
- tipo D, devido às falhas monofásicas ou fase-fase. Duas fases são afetadas em magnitude e argumento, a terceira fase só varia em magnitude.

Para uma falha fase – fase – terra (menos freqüente), os tipos de afundamentos são:

- tipo E, duas fases são afetadas em magnitude, mas não em argumento a terceira fase não varia;
- tipo F, afundamento de tensão tipo E depois de um transformador  $\Delta y$ ;
- tipo G, afundamento de tensão tipo E depois de dois transformadores  $\Delta y$ .

Os afundamentos de tensão classificados fasorialmente em sete tipos, denotados por A, B, C, D, E, F e G, são apresentados matematicamente na tabela (6.1), onde  $V_{sag}$  é a magnitude do afundamento.

**Tabela 6. 1 Classificação dos Afundamentos de Tensão**

<b>Tipo</b>	<b>Equações</b>	<b>Tipo</b>	<b>Equações</b>
<b>A</b>	$V_a = V_{sag}$	<b>E</b>	$V_a = V$
	$V_b = -\frac{1}{2}V_{sag} - j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$		$V_b = -\frac{1}{2}V_{sag} - j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$
	$V_c = -\frac{1}{2}V_{sag} + j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$		$V_c = -\frac{1}{2}V_{sag} + j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$
<b>B</b>	$V_a = V_{sag}$	<b>F</b>	$V_a = V_{sag}$
	$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$		$V_b = -\frac{1}{2}V_{sag} - j\frac{(2V + V_{sag})}{\sqrt{12}}$
	$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$		$V_c = -\frac{1}{2}V_{sag} + j\frac{(2V + V_{sag})}{\sqrt{12}}$
<b>C</b>	$V_a = V$	<b>G</b>	$V_a = \frac{(2V + V_{sag})}{3}$
	$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$		$V_b = -\frac{(2V + V_{sag})}{6} - j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$
	$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$		$V_c = -\frac{(2V + V_{sag})}{6} + j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag}$
<b>D</b>	$V_a = V_{sag}$		
	$V_b = -\frac{1}{2}V_{sag} - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$		
	$V_c = -\frac{1}{2}V_{sag} + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$		

Fonte: (BOLLEN, 1998a)

A classificação dos afundamentos de tensão dada na tabela (6.1) foi usada nos testes experimentais e nas simulações da máquina assíncrona.

## 6.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Diferentes tipos de falhas conduzem a diferentes tipos de afundamentos. Usualmente, o afundamento é caracterizado por uma duração e magnitude, mas têm-se outras características importantes que influenciam o comportamento de cargas trifásicas (máquina assíncrona). As principais características são:

- magnitude do afundamento de tensão;
- duração do afundamento;
- deslocamento do ângulo de fase da tensão;
- assimetria das tensões de fase; e
- instante de restabelecimento da tensão.

### 6.1.2.1 Magnitude do afundamento de tensão

A magnitude da tensão é comumente obtida pelo método do valor eficaz da tensão:

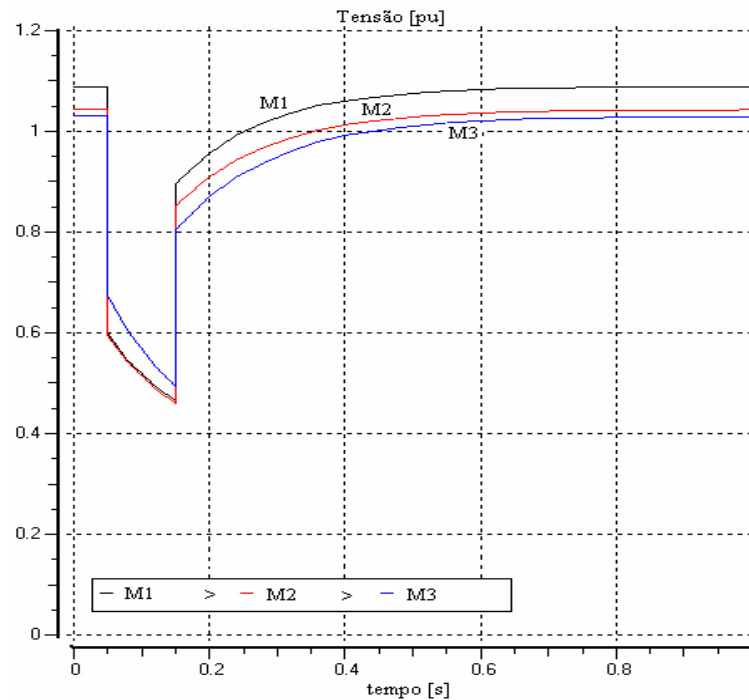
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (6.1)$$

Sendo  $N$  o número de amostras por ciclo e  $v_i$  a tensão no domínio do tempo. A componente fundamental da tensão como função do tempo, pode ser calculada por:

$$V_{fun}(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t v(\tau) e^{jw_0\tau} d\tau \quad (6.2)$$

Na equação (6.2),  $w_0 = \frac{2\pi}{T}$  corresponde à frequência angular e  $T$  é o período da harmônica fundamental de tensão. Teoricamente, a magnitude do afundamento de tensão em um dado ponto do sistema, pode ser calculado conhecendo-se as impedâncias deste sistema de energia elétrica.

Considerando cargas dinâmicas como motores de indução no sistema, a magnitude do afundamento torna-se não retangular. Isto é, levará alguns ciclos para alcançar seu nível inferior e a tensão será restabelecida gradualmente depois de que a falha seja cancelada. Na figura (6.4) é apresentada a magnitude característica da tensão em valores unitários para três motores de indução diferentes, durante um afundamento simétrico.



**Figura 6. 4 Magnitude característica no domínio do tempo**

As simulações de afundamentos de tensão considerando cargas dinâmicas foram realizadas no “software” IPSA (Análise de Sistemas de Potência). Em (YALÇINKAYA, 1998) são apresentadas as características dos afundamentos de tensão num sistema de distribuição, considerando principalmente motores de indução como carga.

#### 6.1.2.2 Duração do afundamento

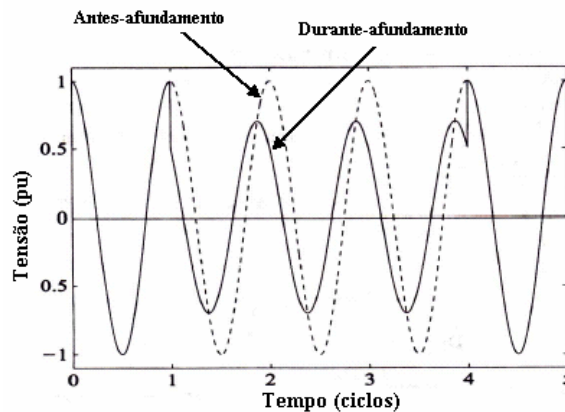
A duração do afundamento é determinada pelo tempo do restabelecimento da tensão a um valor superior a 90% da magnitude da tensão eficaz, depois do cancelamento da falha no dispositivo de proteção. A IEEE Std. 1159 classifica os afundamentos de tensão segundo as durações entre 0,5 ciclo a 1 minuto em três categorias (instantâneas, momentâneas e temporárias), descritas na tabela (6.2).

**Tabela 6. 2** Categorias e características dos fenômenos eletromagnéticos do sistema de energia elétrica

<b>Categorias</b>	<b>Duração</b>	<b>Magnitude</b>
– Instantâneos Afundamento de tensão Incremento de tensão	0,5 – 30 ciclos 0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu 1,1 – 1,8 pu
– Momentâneos Afundamento de tensão Incremento de tensão Interrupção de tensão	0,5 – 3 s 0,5 – 3 s 0,5 – 3 s	0,1 – 0,9 pu 1,1 – 1,8 pu < 0,1 pu
– Temporários Afundamento de tensão Incremento de tensão Interrupção de tensão	3 – 60 s 3 – 60 s 3 – 60 s	0,1 – 0,9 pu 1,1 – 1,8 pu < 0,1 pu

### 6.1.2.3 Deslocamento do ângulo de fase da tensão

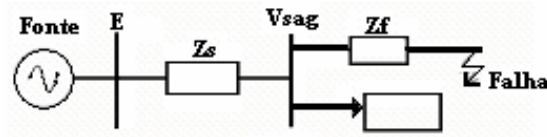
Uma falha causa uma queda na magnitude da tensão, e um deslocamento angular entre a tensão característica durante o afundamento e a tensão antes do afundamento. A figura (6.5) mostra um afundamento de 70 % da tensão nominal e um deslocamento angular de 45°.



**Figura 6. 5** Afundamento de tensão, magnitude 70 %  $V_N$  com 45° de defasagem angular

O deslocamento do ângulo de fase pode ser devido à diferença na relação  $X/R$  (Reatância / Resistência) entre a fonte e a carga, figura (6.6). Nesta figura a simbologia usada significa: a tensão da fonte  $E$ , o afundamento de tensão  $V_{sag}$ , a impedância entre a fonte vista desde um ponto comum no sistema  $Z_S$ , e a impedância entre o ponto comum e o lugar onde

aconteceu a falha  $Z_F$ . Os afundamentos de tensão assimétricos, também, apresentam um deslocamento no ângulo de fase nos terminais da carga.



**Figura 6. 6 Diagrama unifilar de um sistema de energia elétrica**

O deslocamento devido à diferença na relação  $X/R$  entre a fonte e a carga, será chamado de “deslocamento inicial do ângulo de fase” (ZHANG, 2000).

$$\Delta\phi = \arg(\vec{V}_{sag}) = \tan^{-1}\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{X_S - X_F}{R_S - R_F}\right) \quad (6.3)$$

Sendo:

$Z_F = R_F + jX_F$ , é a impedância entre o ponto comum do sistema e a falha.

$Z_S = R_S + jX_S$ , impedância da fonte vista desde o ponto comum.

A classificação dos afundamentos de tensão descrita na tabela (6.1), apresenta na tabela (6.3) uma pequena adaptação, considerando uma variação inicial do ângulo de fase ( $\Phi$ ), isto implica que  $(V_{sag})$  terá que ser substituído por  $V_{sag} \cos\phi - jV_{sag} \sin\phi$ . O sinal negativo desta expressão significa que em muitos casos o deslocamento angular decresce, devido a que a resistência da carga é freqüentemente superior a resistência da fonte.

**Tabela 6.3 Afundamentos de tensão considerando uma variação inicial do ângulo de fase  $\phi$** 

Tipo	Equações	Tipo	Equações
A	$V_a = V_{sag} (\cos \phi - j \sin \phi)$ $V_b = V_{sag} \left( \cos \left( \frac{2}{3} \pi - \phi \right) - j \sin \left( \frac{2}{3} \pi - \phi \right) \right)$ $V_c = V_{sag} \left( \cos \left( \frac{2}{3} \pi - \phi \right) + j \sin \left( \frac{2}{3} \pi - \phi \right) \right)$	C	$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag} (\cos \phi - j \sin \phi)$ $V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V_{sag} (\cos \phi - j \sin \phi)$
B	$V_a = V_{sag} (\cos \phi - j \sin \phi)$ $V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ $V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$	D	$V_a = V_{sag} (\cos \phi - j \sin \phi)$ $V_b = -\frac{1}{2}V_{sag} (\cos \phi - j \sin \phi) - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ $V_c = -\frac{1}{2}V_{sag} (\cos \phi - j \sin \phi) + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$

Os sistemas de distribuição de energia elétrica geralmente admitem um maior deslocamento no ângulo de fase comparado com os obtidos em sistemas de transmissão. Com isso, o comportamento dos equipamentos poderá ser diferente para afundamentos devido às falhas em sistemas de distribuição que os devido às falhas em sistemas de transmissão.

#### 6.1.2.4 Assimetria das tensões de fase

Muitas falhas no sistema de energia elétrica são monofásicas ou bifásicas. Estes tipos de falhas causam afundamentos assimétricos com diferentes magnitudes e deslocamentos do ângulo de fase. A teoria de componentes simétricas auxilia a análise do comportamento de falhas não simétricas. Para todas as falhas a equação geral é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Sendo  $V_F$  a tensão pré-falha e os subscritos 0, 1 e 2 a seqüência zero, positiva e negativa, respectivamente. As tensões de fase são dadas por:



$$\begin{aligned}
 V_a &= V_0 + V_1 + V_2 \\
 V_b &= V_0 + a^2V_1 + aV_2 \\
 V_c &= V_0 + aV_1 + a^2V_2
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

Sendo  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  as tensões de fase e “ $a$ ” um número complexo com magnitude unitária e um ângulo de fase de  $120^\circ$  ( $a = 1 \angle 120^\circ$ ). A classificação dos afundamentos de tensão utilizando a teoria de componentes simétricas será mais útil frente a afundamentos desbalanceados e considerando cargas dinâmicas, já que permitirá uma rápida avaliação da característica do afundamento e da influência da carga (YALÇINKAYA, 1998).

#### 6.1.2.5 Instante de restabelecimento da tensão

O restabelecimento de tensão, após um afundamento devido a uma falha, terá lugar quando o circuito de proteção restabeleça a fase. Os circuitos de proteção restabelecem a tensão, quando a corrente de falha tenha seu cruzamento por zero. Considerando ( $\cos\psi$ ), o fator de potência da falha, o ponto sobre a onda de tensão de restabelecimento depois do afundamento devido a uma falha será ( $\psi$  ou  $\psi+180^\circ$ ) com referência ao cruzamento por zero da corrente. A tensão depois do restabelecimento pode ser escrita, como:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega_0 t + \psi) \tag{6.6}$$

O ângulo da corrente de falha será diferente para diferentes tipos de falha, mas, geralmente, é de  $45^\circ$  a  $60^\circ$  para falhas em sistemas de distribuição e de  $75^\circ$  a  $85^\circ$  para falhas em sistemas de transmissão (BOLLEN, 2003). O restabelecimento da tensão nem sempre terá lugar num mesmo instante nas três fases.

Para um afundamento de tensão do tipo B, devido a uma falha simples e considerando o neutro solidamente aterrado,  $\cos\psi_1$  é o fator de potência da corrente de falha, as tensões após o restabelecimento nas três fases, serão:

$$\begin{aligned}
 v_a &= \cos(\omega_0 t + \psi_1) \\
 v_b &= \cos(\omega_0 t + \psi_1 - 120^\circ) \\
 v_c &= \cos(\omega_0 t + \psi_1 + 120^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

Da equação (6.7) conclui-se que as tensões serão restabelecidas nas três fases no mesmo instante. Quando, o ponto sobre a onda de tensão, na fase onde ocorreu a falha equivale ao ângulo entre a tensão da fonte e a corrente de falha ( $\psi_1$ ).

O afundamento tipo C é devido a uma falha simples ou uma falha fase-fase. Considerando uma falha fase-fase (fases  $b$  e  $c$ ), a corrente de falha será acionada pela diferença de tensão entre as fases  $b$  e  $c$ , e considerando um cruzamento em zero no ângulo ( $\psi_2$ ). O ângulo  $\psi_2$  nas fases  $b$  e  $c$  da tensão correspondem a um ângulo ( $\psi_2 + 90^\circ$ ) na fase  $a$ . A tensão após o restabelecimento pode ser escrita como:

$$\begin{aligned}
 v_a &= \cos(\omega_0 t + \psi_2 + 90^\circ) \\
 v_b &= \cos(\omega_0 t + \psi_2 - 30^\circ) \\
 v_c &= \cos(\omega_0 t + \psi_2 - 150^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

As fases  $b$  e  $c$  têm uma defasagem de  $120^\circ$  e  $240^\circ$  elétricos, respectivamente. A tensão de restabelecimento terá lugar em ambas as fases num mesmo instante. Para um afundamento de tensão tipo C, devido a uma falha simples, a tensão de restabelecimento nas três fases será escrita como:

$$\begin{aligned}
 v_a &= \cos(\omega_0 t + \psi_1 + 90^\circ) \\
 v_b &= \cos(\omega_0 t + \psi_1 - 30^\circ) \\
 v_c &= \cos(\omega_0 t + \psi_1 - 150^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$

Para um afundamento de tensão tipo D, devido a uma falha simples ou devido a uma falha fase-fase, a tensão de restabelecimento será a mesma que a do afundamento de tensão tipo B.

$$\begin{aligned}
 v_a &= \cos(\omega_0 t + \psi_k) \\
 v_b &= \cos(\omega_0 t + \psi_k - 120^\circ) \\
 v_c &= \cos(\omega_0 t + \psi_k + 120^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$

Sendo  $k = 1$  para uma falha simples e  $k = 2$  para uma falha fase-fase. O restabelecimento da tensão depois de um afundamento será importante para avaliação da imunidade dos equipamentos sujeitos a afundamentos de tensão, e deverá ser analisado e estudado em futuros trabalhos, assim como, a relação entre o ângulo da corrente de falha e o deslocamento do ângulo de fase durante o afundamento.

## **6.2 INFLUÊNCIA DE CARGAS DINÂMICAS SOBRE OS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

O método utilizado na classificação dos afundamentos de tensão em sete tipos admite a hipótese que as impedâncias de seqüência positiva e negativa da fonte são equivalentes. Sob esta hipótese, o fator de assimetria PN ( $\vec{F}$ ) devido a falhas fase-fase e falhas simples, que produzem afundamentos assimétricos, foi considerado igual à unidade. Da tabela (6.1), de classificação dos afundamentos de tensão, observa-se que o fator ( $\vec{F}$ ) não é considerado. O fator de assimetria é um fator adicional que quantifica a assimetria trifásica, onde as impedâncias do sistema de seqüência positiva e negativa não serão equivalentes.

As cargas dinâmicas influenciam as características do afundamento de tensão de duas formas. A primeira é que o afundamento não será retangular, sendo que o afundamento levará algum tempo para alcançar seu nível inferior e se restabelecerá gradualmente depois que a falha no sistema foi cancelada, figura (6.4). Para o caso específico de motores assíncronos, tem-se uma perda de velocidade no início do afundamento e um incremento da velocidade quando a tensão é restabelecida, o que causará uma elevada corrente da fonte e um pós-afundamento, prolongando a duração do afundamento por alguns ciclos mais. Assim, a hipótese de afundamentos retangulares não será verdadeira considerando motores de indução como carga. A segunda consequência terá lugar em afundamentos assimétricos, onde o fator de assimetria será freqüentemente não unitário.

### **6.2.1 Fator de assimetria PN (Positivo-Negativo)**

O fator de assimetria não será equivalente à unidade em afundamentos de tensão assimétricos, devido à influência de cargas dinâmicas. As equações (6.11) e (6.12)

representam as expressões do fator de assimetria ( $\vec{F}$ ) para falhas simples e falhas fase-fase. Estas expressões utilizam a análise de componentes simétricas.

$$\vec{F} = 1 + \frac{Z_{S2} - Z_{S1}}{(Z_{S0} + Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F0} + Z_{F1} + Z_{F2})} \quad (6.11)$$

$$\vec{F} = 1 + \frac{Z_{S2} - Z_{S1}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \quad (6.12)$$

O duplo índice presente nas equações (6.11) e (6.12) representa as impedâncias da fonte e da falha a um ponto comum, na seqüência positiva (1), negativa (2) ou zero (0). A classificação dos afundamentos de tensão, apresentada na tabela (6.1) deverá ser estendida, considerando o fator de assimetria ( $\vec{F}$ ) devido à influência de cargas dinâmicas. As expressões das tensões trifásicas são resumidas nas seguintes equações.

Afundamento tipo C:

$$\begin{aligned} V_a &= \vec{F} \\ V_b &= -\frac{1}{2}\vec{F} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\vec{V}_{sag} \\ V_c &= -\frac{1}{2}\vec{F} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\vec{V}_{sag} \end{aligned} \quad (6.13)$$

Afundamento tipo D:

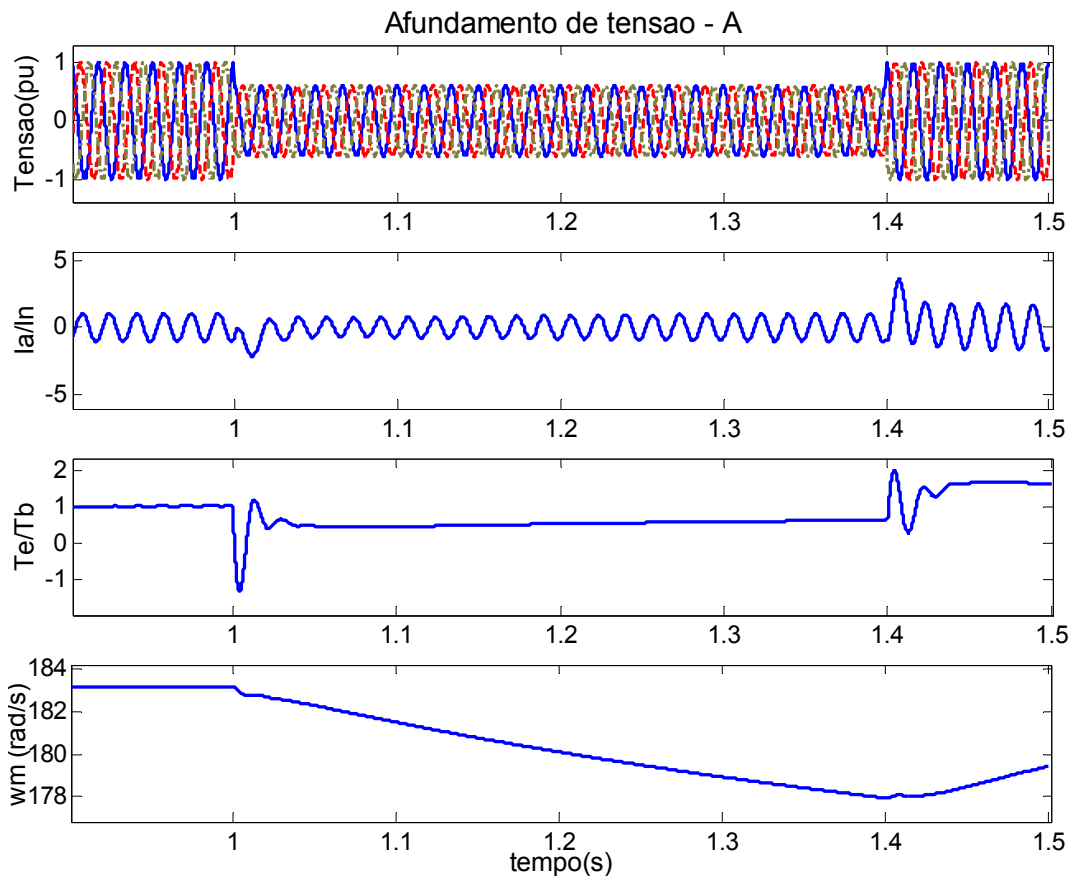
$$\begin{aligned} V_a &= \vec{V}_{sag} \\ V_b &= -\frac{1}{2}\vec{V}_{sag} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\vec{F} \\ V_c &= -\frac{1}{2}\vec{V}_{sag} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\vec{F} \end{aligned} \quad (6.14)$$

Sendo,  $\vec{F}$  o fator de assimetria (positivo-negativo) e  $\vec{V}_{sag}$  a tensão característica do afundamento de tensão em valores unitários. O fator de assimetria ( $\vec{F}$ ) é aproximadamente igual à unidade, em (BOLLEN, 2000) é analisado o fator de assimetria de afundamentos medidos num sistema de distribuição.

### 6.3 EFEITOS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NA MÁQUINA ASSÍNCRONA

Os efeitos transitórios devido a afundamentos de tensão na máquina assíncrona dependem de vários elementos, como: a magnitude e duração do afundamento, os parâmetros elétricos da máquina, a carga e a inércia mecânica do motor, o tipo de falha que produziu o afundamento, a variação do ângulo de fase da tensão, o instante inicial sobre a onda de tensão no início do afundamento, a tensão de restabelecimento, etc.

A figura (6.7) mostra o comportamento de um motor assíncrono de 20 HP, sujeita a um afundamento de tensão simétrico. Considera-se nesta simulação a magnitude do afundamento igual a 60% da tensão eficaz com uma duração de 400 ms.



**Figura 6. 7** Comportamento da máquina assíncrona frente a um afundamento de tensão assimétrico de 400 ms de duração e uma magnitude de 60%  $V_N$  (Simulado - Matlab)

Em geral os efeitos dos afundamentos de tensão observados na máquina assíncrona são: a perda de velocidade durante o afundamento e picos de conjugado e de corrente no instante inicial e final da queda de tensão.

## 7 MÉTODO SIMPLIFICADO

As equações que descrevem o comportamento da máquina assíncrona são não lineares, a linearização pode ser alcançada considerando a velocidade mecânica constante num pequeno intervalo de tempo, e calcular os transitórios elétricos num ponto de operação para o qual a velocidade é constante. A máquina assíncrona é tratada como um sistema linear, e calculada a solução geral da equação diferencial.

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \quad (7.1)$$

Na equação diferencial linear,  $A$  e  $B$  são consideradas constantes. A linearização é utilizada para calcular os transitórios elétricos durante uma transição dinâmica das variáveis de estado, que dependerá da entrada e dos autovalores. Supondo que o sistema seja estável, o comportamento das variáveis elétricas da máquina será expresso pela solução geral da equação diferencial linear elétrica.

A equação diferencial linear descreve o comportamento dinâmico de pequenos deslocamentos num ponto de operação. A estabilidade de pequenos deslocamentos será assumida se todos os elementos da matriz de transição  $e^{At}$ , equação (7.2), aproximam-se assintoticamente a zero. A matriz de transição é obtida quando a variável de entrada da equação diferencial é feita igual a zero.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax(t) \\ x &= e^{At} x(t_0) \end{aligned} \quad (7.2)$$

O comportamento assintótico de todos os elementos da matriz de transição  $e^{At}$  ocorre, quando todas as raízes da equação característica de  $A$  têm uma parte real negativa. A equação característica de  $A$  é definida por:

$$\begin{aligned} \det(\lambda I - A) &= 0 \\ (\lambda - a_1)(\lambda - a_2) - a_{12}a_{21} &= 0 \\ \lambda^2 - \lambda(a_1 + a_2) + a_1a_2 - a_{12}a_{21} &= 0 \end{aligned} \quad (7.3)$$

Sendo  $I$  a matriz identidade e  $\lambda$  os autovalores (raízes da equação característica). O comportamento do sistema dinâmico durante um estado geral de transição depende do comportamento dos autovalores. A solução geral da equação diferencial linear é expressa pela solução homogênea e a solução particular em regime permanente. A solução geral, é dada por:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_h(t) + x_p(t) \\ x(t) &= e^{A(t-t_0)} x(t_0) + e^{At} \int_{t_0}^t e^{-A\tau} Bu(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (7.4)$$

Na solução homogênea ou de regime livre a variável de entrada é igual a zero. A solução geral da equação diferencial linear homogênea é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{dx_h(t)}{dt} &= Ax_h(t) \\ x_h(t) &= e^{A(t-t_0)} x_h(t_0) \end{aligned} \quad (7.5)$$

A solução em regime permanente tem a mesma forma que a excitação. A derivada da variável de estado em regime permanente é zero, a solução geral de regime permanente da equação de estado é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{dx_p(t)}{dt} &= Ax_p(t) + Bu(t) \\ 0 &= Ax_p(t) + Bu(t) \\ x_p(t) &= -A^{-1}Bu(t) \end{aligned} \quad (7.6)$$

Considerando uma excitação senoidal, a solução em regime permanente na notação complexa, se converte em:

$$\begin{aligned} \frac{dx_p(t)}{dt} &= Ax_p(t) + Bu(t) \\ jwI\bar{x}_p &= A\bar{x}_p + B\bar{u} \\ \bar{x}_p &= (jwI - A)^{-1} B\bar{u} \end{aligned} \quad (7.7)$$

## 7.1 TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS PRODUZIDOS POR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

O método simplificado separa o sistema elétrico do mecânico, sendo que a constante de tempo mecânica é superior à constante de tempo elétrica. Considerando assim, a velocidade mecânica constante, no instante inicial do afundamento e no restabelecimento, calculam-se os transitórios elétricos originados pela variação abrupta da tensão. Sob esta base, o método simplificado apresenta uma melhor resposta para máquinas de elevada potência, elevada inércia, e de baixo escorregamento, já que a constante de tempo mecânica será várias ordens superiores que a constante de tempo elétrica. Esta consideração permite analisar o comportamento da máquina sujeita a uma ampla gama de afundamentos de tensão, devido que o método simplificado levará um tempo menor no processamento do cálculo dos transitórios elétricos. A equação diferencial da máquina assíncrona foi desenvolvida no Capítulo 4, considerando a corrente como variável de estado, tem-se:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (7.8)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s & M \\ -M & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_s + j\omega_s L_s & j\omega_s M \\ j(\omega_s - \omega_r)M & r_r + j(\omega_s - \omega_r)L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M \\ -M & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \vec{v}_s \\ \vec{v}_r \end{bmatrix}$$

Considerando a velocidade mecânica constante, a solução da equação diferencial linear no instante inicial e final do afundamento, para uma entrada arbitrária  $u(t)$  (tensão), é dada pela solução da equação.

$$x(t) = x_p(t) + x_h(t) \quad (7.9)$$

A solução de regime permanente depende da variável de entrada, que neste caso é a tensão, a solução geral será dada por:

$$Ai_p(t) + Bu(t) = 0$$

$$\vec{i}_p(t) = -A^{-1}B \begin{bmatrix} \vec{v}_s(t) \\ \vec{v}_r(t) \end{bmatrix} \quad (7.10)$$



A solução homogênea ou de regime livre, é proporcional ao cálculo da exponencial matricial  $e^{At}$ , sendo constantes os elementos da matriz  $A$ , a solução da equação diferencial linear homogênea é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{di_h}{dt} &= Ai_h(t_0) \\ \vec{i}_h(t) &= e^{A(t-t_0)} \vec{i}_h(t_0) \\ \vec{i}_h(t) &= e^{A(t-t_0)} \begin{bmatrix} \vec{i}_s(t_0) - \vec{i}_{sp}(t_0) \\ \vec{i}_r(t_0) - \vec{i}_{rp}(t_0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7.11)$$

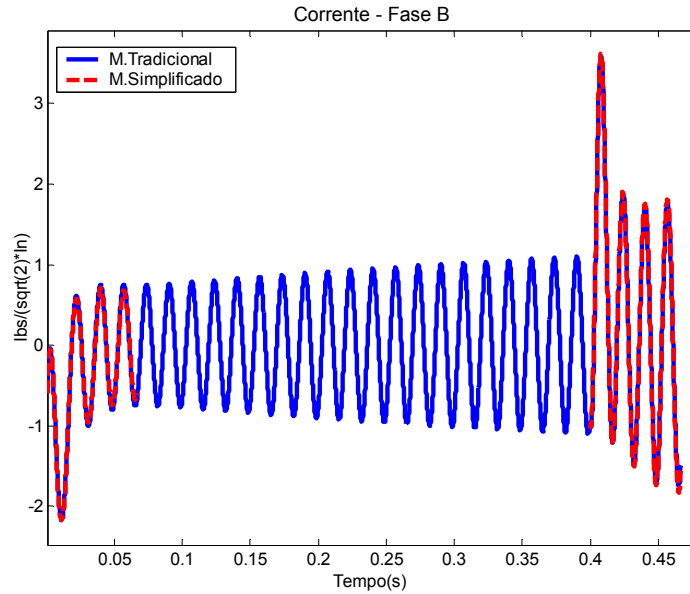
Para obter a solução homogênea é necessário conhecer as condições iniciais da variável de estado, o valor para cada nova iteração é o valor final da anterior ( $i_{s0}$ ,  $i_{r0}$ ). A vantagem do método simplificado no cálculo dos transitórios elétricos, é que com o cálculo da exponencial matricial ( $e^{At}$ ) tem-se a evolução de todas as variáveis elétricas da máquina durante o tempo que a velocidade mecânica não varia. A matriz  $A$  depende da velocidade mecânica, e se esta varia deve-se voltar a calcular a exponencial matricial e a equação diferencial linear, a solução geral da equação diferencial linear é expressa por:

$$\begin{bmatrix} \vec{i}_s(t) \\ \vec{i}_r(t) \end{bmatrix} = \vec{i}_h(t) + \vec{i}_p(t) = e^{A(t-t_0)} \begin{bmatrix} \vec{i}_s(t_0) - \vec{i}_{sp}(t_0) \\ \vec{i}_r(t_0) - \vec{i}_{rp}(t_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{i}_{sp}(t) \\ \vec{i}_{rp}(t) \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

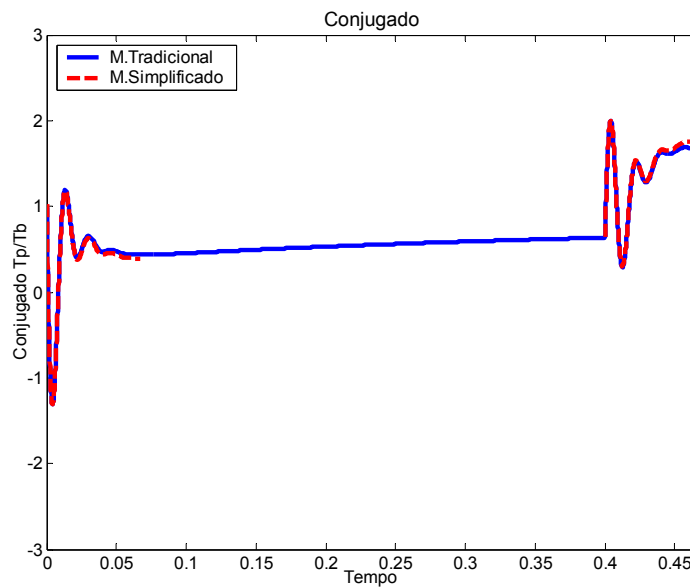
Os transitórios do conjugado eletromagnético são calculados através da seguinte equação:

$$Te = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m \text{Im}(\vec{i}_s \vec{i}_r') \quad (7.13)$$

Os transitórios elétricos no instante da queda da tensão e do restabelecimento são ilustrados nas figuras (7.1) e (7.2), foi simulado um afundamento de tensão simétrico de 60% da magnitude da tensão eficaz com uma duração de 400ms num motor de 20HP de potência e considerando um conjugado de carga proporcional ao quadrado da velocidade mecânica do motor. O método simplificado utiliza-se nos primeiros ciclos, depois da queda de tensão e do restabelecimento, sendo que neste tempo têm-se os picos de corrente e de conjugado.



**Figura 7.1 Método numérico tradicional e simplificado – Corrente**



**Figura 7.2 Método numérico tradicional e simplificado - Conjugado**

Os transitórios elétricos obtidos foram picos de corrente e de conjugado no instante inicial e final do afundamento. Nas tabelas (7.1) e (7.2) comparam-se os valores obtidos pelo método numérico tradicional e pelo método simplificado, para o cálculo dos picos de corrente e de conjugado no motor de indução de 20 HP, submetido a quedas de tensão simétricas e assimétricas, tipo A, B e D. Consideram-se, nestas simulações, afundamentos de 30% e 60% da magnitude da tensão.

**Tabela 7. 1 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - Picos de corrente devido a afundamentos de tensão**

	Picos de corrente ( $I_p/(\sqrt{2}I_N)$ )					
	Afundamento de tensão 30% $V_N$			Afundamento De tensão 60% $V_N$		
	A	B	D	A	B	D
M. Tradicional	5,98	2,65	5,09	4,06	1,97	3,24
M. Simplificado	5,97	2,46	5,07	4,06	1,82	3,01
% erro	0,16	7,16	0,39	0,01	7,61	7,09

**Tabela 7. 2 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - Picos de conjugado**

	Picos de conjugado ( $T_p/T_N$ )					
	Afundamento de tensão 30% $V_N$			Afundamento de tensão 60% $V_N$		
	A	B	D	A	B	D
M. Tradicional	3,12	2,10	4,07	2,03	1,71	2,45
M. Simplificado	3,12	2,10	4,08	2,03	1,71	2,44
% erro	0,09	0,06	0,24	0,14	0,13	0,40

Observa-se, destas tabelas, que o método simplificado apresenta um maior erro percentual no cálculo dos picos de corrente, devido a um afundamento assimétrico do tipo B. O método simplificado depende da diferença das constantes de tempo mecânica e elétrica, já que separa o cálculo dos transitórios elétricos do cálculo da velocidade mecânica, sob a base que a constante de tempo mecânica é superior à constante de tempo elétrica. A constante de tempo elétrica da máquina assíncrona, calculada através do método simplificado, será o inverso da parte real dos autovalores.

$$\tau_e = \frac{1}{\text{Re}(\lambda_{1,2})} \quad (7.14)$$

## 7.2 TRANSITÓRIOS MECÂNICOS PRODUZIDOS POR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Para o cálculo da velocidade mecânica durante o afundamento não se considera os transitórios elétricos, isto significa que a máquina encontra-se em cada instante em regime permanente elétrico. O valor da velocidade mecânica no início do afundamento e no restabelecimento de tensão auxilia na obtenção dos transitórios elétricos. A solução do sistema mecânico é dada pela solução da equação diferencial:

$$\frac{d}{dt} w_m = \frac{1}{J} (T_e - T_L - Bw_m) \quad (7.15)$$

Aplicando o teorema de Thevenin o conjugado eletromagnético é:

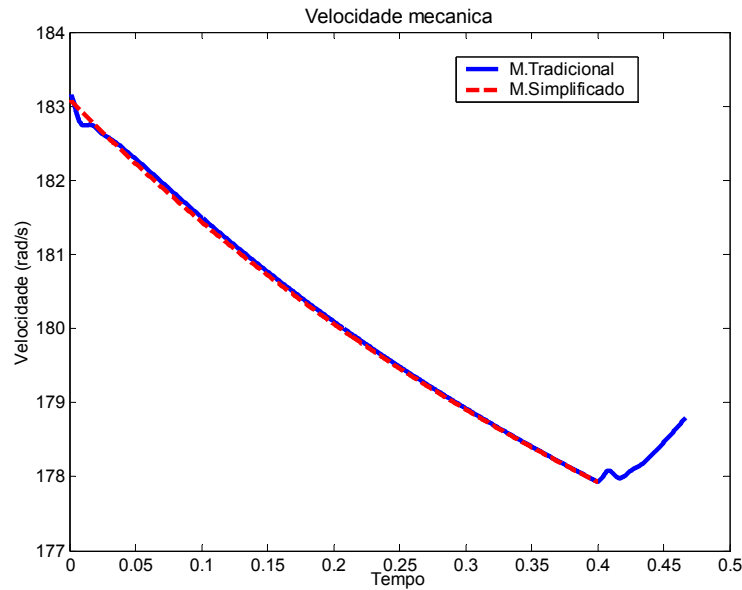
$$T_e = \frac{3P}{2w_s} \frac{R_r}{s} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + R_r/s)^2 + (X_{th} + X_r)^2} \quad (7.16)$$

Onde:

$$V_{th} = \frac{V_s}{(R_s + jX_s) + jX_m} jX_m \quad (7.17)$$

$$Z_{th} = \frac{(R_s + jX_s) jX_m}{(R_s) + j(X_s + X_m)}$$

A velocidade mecânica durante um afundamento de tensão simétrico é ilustrada na figura (7.3), para um motor de 20 HP de potência e considerando um conjugado de carga proporcional ao quadrado da velocidade mecânica do motor, os dados do motor de 20HP são dados no Anexo D.



**Figura 7.3 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - Velocidade mecânica**

Na tabela (7.3) compara-se os valores obtidos pelo método numérico tradicional e o método simplificado no cálculo da perda de velocidade mecânica, o motor de indução de 20HP foi submetido a quedas de tensão simétricas e assimétricas.

**Tabela 7.3 Comparação entre o método numérico tradicional e o método simplificado - Queda da velocidade**

	Perda da velocidade $w_m$ (rad/seg)					
	Afundamento de tensão $30\%V_N$			Afundamento de tensão $60\%V_N$		
	A	B	D	A	B	D
M. Tradicional	171,28	179,65	177,12	176,93	181,36	180,24
M. Simplificado	171,79	179,93	177,89	176,97	181,45	180,47
%erro	-0,29	-0,15	-0,43	-0,022	-0,04	-0,127

O processamento do método simplificado da máquina assíncrona, para o cálculo dos transitórios elétricos e mecânicos, será mais rápido que o método numérico tradicional empregado (Runge-Kutta de quarta ordem), já que calcula separadamente os transitórios elétricos dos transitórios mecânicos. Uma comparação foi realizada, simulando um afundamento de tensão simétrico de 40% da magnitude aplicada nos terminais da máquina e considerando dez durações diferentes. O método numérico tradicional (Runge-Kutta de quarta

ordem) requereu 39 segundos, enquanto, o tempo total de cálculo usando o método simplificado foi aproximadamente 20 vezes menor.

### 7.3 LINEARIZAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA ATRAVÉS DA EXPANSÃO DE TAYLOR

As constantes de tempo se utilizam para sistemas lineares, à máquina assíncrona é um sistema não linear, então não faz sentido utilizar as constantes de tempo. Linearizando estas equações entorno de um ponto de funcionamento, pode-se calcular as constantes de tempo no mesmo.

Para alcançar a linearização, pode-se utilizar a expansão de Taylor num ponto de operação, resultando em equações diferenciais lineares que descrevem o comportamento de pequenos deslocamentos neste ponto de operação. O procedimento para a obtenção do sistema linear da máquina assíncrona através da expansão de Taylor é apresentado em (KRAUS, 1995). As equações de tensão considerando a corrente como variável de estado, podem ser escritas por, (KRAUS, 1995):

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{qs} \\ \Delta v_{ds} \\ \Delta v_{qr} \\ \Delta v_{dr} \\ \Delta T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{w_b} X_{ss} & \frac{w_e}{w_b} X_{ss} & \frac{p}{w_b} X_M & \frac{w_e}{w_b} X_M & 0 \\ -\frac{w_e}{w_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{w_b} X_{ss} & -\frac{w_e}{w_b} X_M & \frac{p}{w_b} X_M & 0 \\ \frac{p}{w_b} X_M & s_0 \frac{w_e}{w_b} X_M & r'_r + \frac{p}{w_b} X'_{rr} & s_0 \frac{w_e}{w_b} X'_{rr} & -X_M i'_{ds0} - X_{rr} i'_{dr0} \\ s_0 \frac{w_e}{w_b} X_M & \frac{p}{w_b} X_M & s_0 \frac{w_e}{w_b} X'_M & r'_r + \frac{p}{w_b} X'_{rr} & X_M i'_{qs0} + X_{rr} i'_{qr0} \\ X_M i'_{dr0} & -X_M i'_{qr0} & -X_M i'_{ds0} & X_M i'_{qs0} & -2Hp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta i_{dr} \\ \frac{\Delta w_r}{w_b} \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

Nesta equação é conveniente separar os termos de derivada e escrever o sistema linear da forma  $Epx = Fx + u$ . A análise do sistema linear será convenientemente expressa pela equação de estado.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (7.19)$$

As matrizes  $A$  e  $B$  podem-se calculadas por: ( $A = E^{-1}F$ ) e ( $B = E^{-1}$ ).

$$E = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & X_M & 0 \\ X_M & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2Hw_b \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

$$F = \begin{bmatrix} r_s & \frac{w_e}{w_b} X_{ss} & 0 & \frac{w_e}{w_b} X_M & 0 \\ -\frac{w_e}{w_b} X_{ss} & r_s & -\frac{w_e}{w_b} X_M & 0 & 0 \\ 0 & s_0 \frac{w_e}{w_b} X_M & r'_r & s_0 \frac{w_e}{w_b} X'_{rr} & -X_M i_{ds0} - X'_{rr} i'_{dr0} \\ -s_0 \frac{w_e}{w_b} X_M & 0 & -s_0 \frac{w_e}{w_b} X'_{rr} & r'_r & X_M i_{qs0} - X'_{rr} i'_{qr0} \\ X_M i'_{dr0} & -X_M i'_{qr0} & -X_M i_{ds0} & X_M i_{qs0} & 0 \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

As constantes de tempo foram determinadas ao resolver a equação característica da matriz  $A$ . O qual terá cinco equações, quatro delas complexas e a quinta real.

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (7.22)$$

Esta é a forma de calcular as constantes de tempo elétricas e mecânicas da máquina. As duas constantes que aparecem dos valores próprios, podem-se associar com as constantes elétricas do estator e do rotor, a quinta constante que aparece no valor próprio real pode-se associar com a constante do sistema mecânico da máquina. As constantes de tempo da máquina, para o motor de 20 HP, considerando uma tensão nominal e um escorregamento ( $s = 0,0286$ ), é de 10,4 ms e 14,9 ms a constante de inércia da máquina é de 3,3 segundos.

Como apresentado anteriormente, o método simplificado depende das constantes de tempo mecânica e elétrica da máquina, assim como da constante de inércia, já que separa o cálculo dos transitórios elétricos do cálculo da velocidade mecânica e lineariza a equação diferencial elétrica considerando a velocidade mecânica constante no início do afundamento e no restabelecimento da tensão. Sob esta base, o método simplificado apresenta uma melhor

resposta para máquinas assíncronas de elevada potência e elevada inércia, devido a que, a constante de tempo mecânica será de várias ordens superiores que a constante de tempo elétrica.

A tabela (7.4) apresenta os erros percentuais entre o método numérico tradicional e o método simplificado das grandezas de máquinas assíncronas de diferentes potências, devido a um afundamento de tensão de 40% com uma duração de 400 ms, os dados de cada um dos motores são apresentados no Anexo D.

**Tabela 7. 4 Comparação entre o método simplificado e numérico para máquina de diferentes potências (40%  $V_N$  - duração 400ms)**

Potência Nominal	Constante Inércia (s)	Queda de Tensão		Restab. Da Tensão			Erro (%)
		Corrente Pico	Conjugado Pico	Corrente pico	Conjugado Pico	Velocid.	
3 HP	1,41	0,53 %	0,35 %	0,32 %	2,08 %	0,94 %	2,08
20 HP	3,33	0,25 %	0,11 %	0,02%	2,31 %	0,16 %	2,31
360 kW	3,28	0,13 %	0,15 %	0,73 %	2,40 %	0,98 %	2,40
610 kW	4,04	0,42 %	0,10 %	0,06 %	1,09 %	0,043 %	1,09

Comparam-se, nesta tabela, máquinas de diferentes potências e diferentes constantes de inércia, e observa-se que o menor erro percentual ocorre para um motor assíncrono de 610 kW, onde a constante de inércia será superior que a das outras máquinas simuladas. Concluindo que para máquinas de elevada potência sujeita a afundamentos de tensão, a velocidade mecânica não apresenta uma grande variação, e o método simplificado será mais exato, que para máquina de baixa potência, e principalmente de baixo escorregamento.



## 8 SIMULAÇÕES REALIZADAS

As simulações da máquina assíncrona sujeitas a afundamentos de tensão utilizando o “*software*” Matlab, consideram as diversas características dos afundamentos de tensão, com a finalidade, de analisar a influência de cada uma das características na máquina assíncrona.

### 8.1 Influência do instante inicial do afundamento

O instante inicial do afundamento sobre a onda de tensão influencia o comportamento da máquina assíncrona. A tensão de fase é dada por:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha) \quad (8.1)$$

O instante inicial na onda de tensão em um tempo inicial  $t_i$  é:

$$v(t_i) = \sqrt{2}V \cos(\omega t_i + \alpha_i) \quad (8.2)$$

Considerando um tempo inicial  $t_i = 0$ , o ângulo da tensão de fase é dado por  $\alpha_i$ . As tabelas (8.1) e (8.2) apresentam os picos de corrente e de conjugado na máquina assíncrona, devido a afundamentos de tensão simétricos e assimétricos. Considera-se, nestes transitórios, a influência de diferentes instantes iniciais na onda de tensão. As simulações foram realizadas para um motor de 20 HP, a magnitude do afundamento é 30% com uma duração de 300 ms.

**Tabela 8.1 Picos de corrente para diferentes instante iniciais na onda de tensão**

Ponto Inicial	Picos de corrente $ I_p/(\sqrt{2}I_N) $						
	A	B	C	D	E	F	G
0°	5,83	2,46	<b>5,30</b>	3,23	<b>4,96</b>	3,28	<b>4,96</b>
45°	<b>5,92</b>	2,87	4,58	4,44	4,09	4,30	4,09
90°	5,82	<b>3,32</b>	3,49	<b>5,07</b>	3,41	<b>4,90</b>	3,41
135°	5,58	2,82	4,71	4,34	4,51	4,34	4,51
180°	5,83	2,46	<b>5,30</b>	3,23	<b>4,96</b>	3,28	<b>4,96</b>
225°	<b>5,92</b>	2,87	4,58	4,44	4,09	4,30	4,09
270°	5,82	<b>3,32</b>	3,49	<b>5,07</b>	3,41	<b>4,90</b>	3,41
Variação Máxima	5,74%	25,90%	34,15%	36,29 %	31,25%	33,06%	31,25%

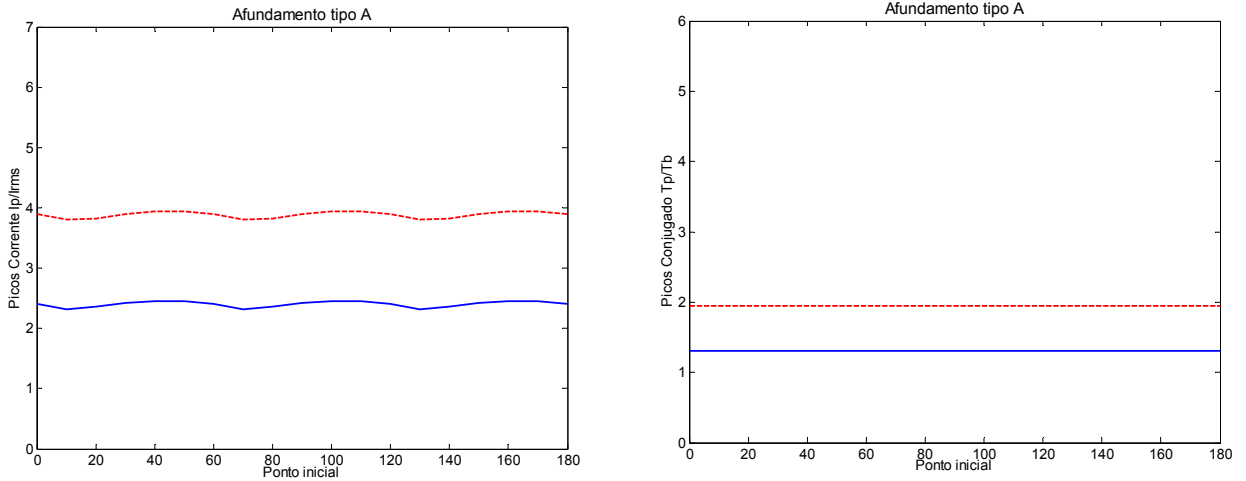
**Tabela 8. 2 Picos de conjugado para diferentes instantes iniciais na onda de tensão**

Ponto Inicial	Picos de conjugado $ Te/T_N $						
	A	B	C	D	E	F	G
0°	3,12	2,10	<b>4,08</b>	2,42	<b>3,63</b>	1,85	<b>3,63</b>
45°	3,12	2,43	3,20	3,31	3,14	2,59	3,14
90°	3,12	<b>2,61</b>	2,42	<b>4,08</b>	1,85	<b>3,63</b>	1,85
135°	3,12	2,37	3,31	3,20	2,59	3,14	2,59
180°	3,12	2,10	<b>4,08</b>	2,42	<b>3,63</b>	1,85	<b>3,63</b>
225°	3,12	2,43	3,20	3,31	3,14	2,59	3,14
270°	3,12	<b>2,61</b>	2,42	<b>4,08</b>	1,85	<b>3,63</b>	1,85
Variação Máxima	0,00 %	19,54%	40,68%	40,68 %	49,03%	49,03%	49,03%

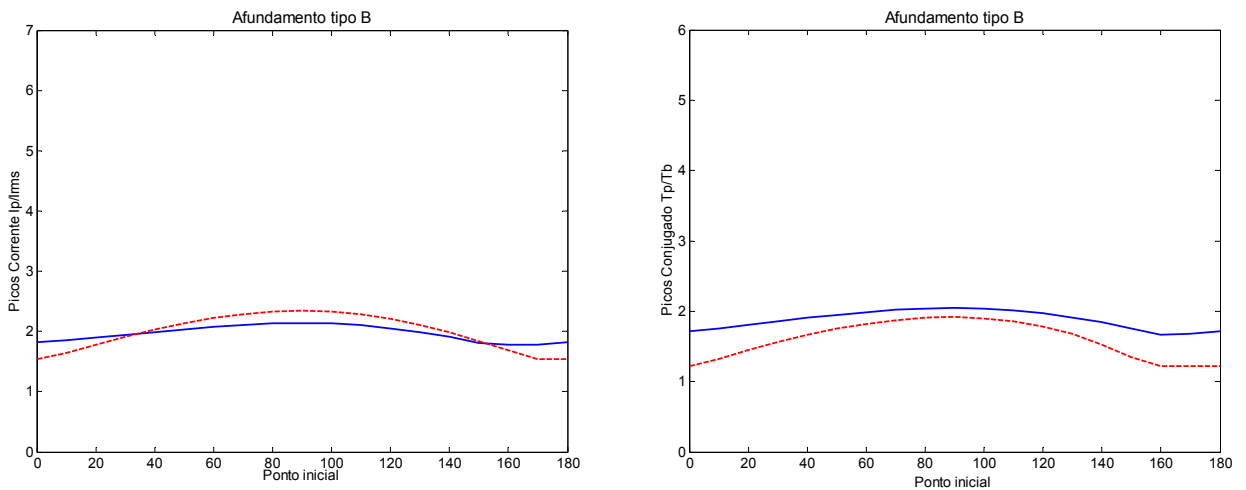
Estas tabelas mostram as situações mais desfavoráveis ressaltadas em negrito para cada tipo de afundamento. Pode-se observar que ao deslocar 180° elétricos o instante inicial sobre a onda de tensão, volta-se a ter os mesmos valores absolutos mudando apenas o sinal. A variação máxima para cada tipo de afundamento foi calculada com respeito ao maior valor de cada coluna, a variação máxima dos picos de corrente e dada na equação (8.3). As maiores variações, considerando diferentes instantes iniciais, tiveram lugar nos afundamentos de tensão tipo C, D, E e F.

$$Var.maxima = \frac{I_{p,max} - I_{p,min}}{I_{p,max}} \quad (8.3)$$

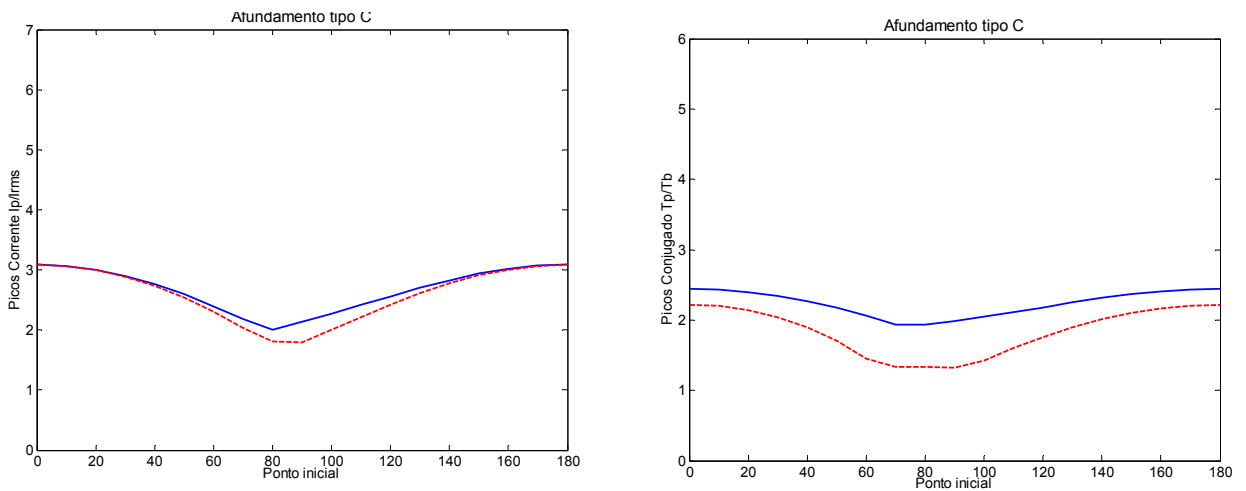
Destas tabelas, conclui-se, que em afundamentos de tensão simétricos o instante inicial na onda de tensão apresenta uma pequena influência nos picos de corrente e não apresenta nenhuma influência nos picos de conjugado. Enquanto que, este instante inicial apresenta uma grande influência para afundamentos de tensão assimétricos nos picos de corrente e de conjugado. A queda de velocidade não foi considerada, nestas tabelas, devido as simulações não apresentarem qualquer variação. As figuras (8.1) a (8.6) mostram os picos de corrente e de conjugado no instante inicial da queda da tensão e no restabelecimento. Foram considerados nestas simulações diferentes pontos iniciais sobre a onda de tensão. O motor de 20HP foi submetido a uma queda de tensão de 40% durante 300 ms.



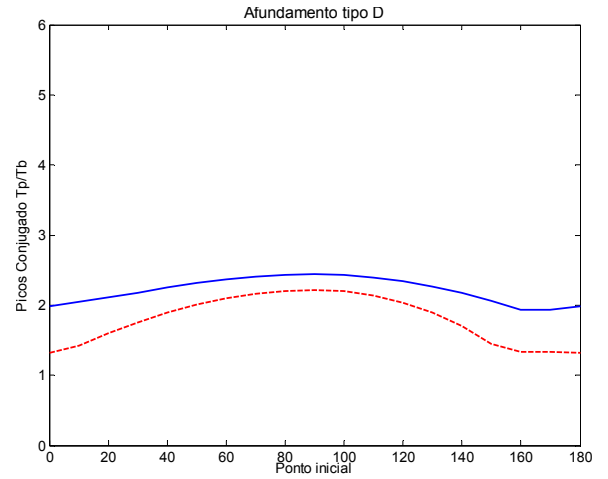
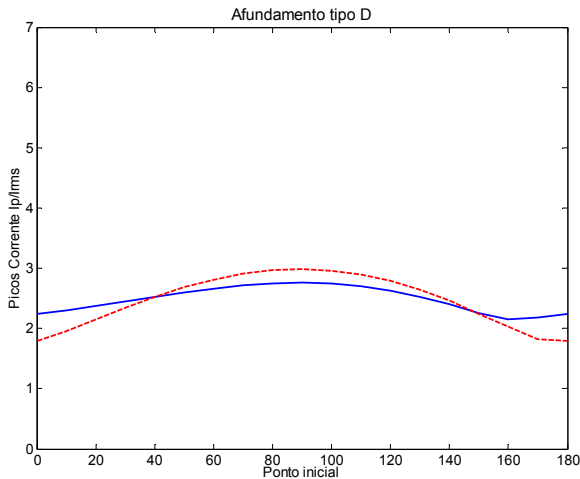
**Figura 8. 1 Picos de corrente e de conjugado em diferentes pontos iniciais – Afundamento tipo A; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada)**



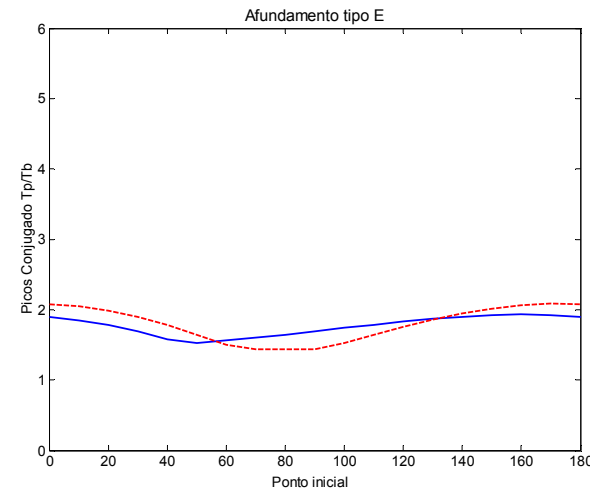
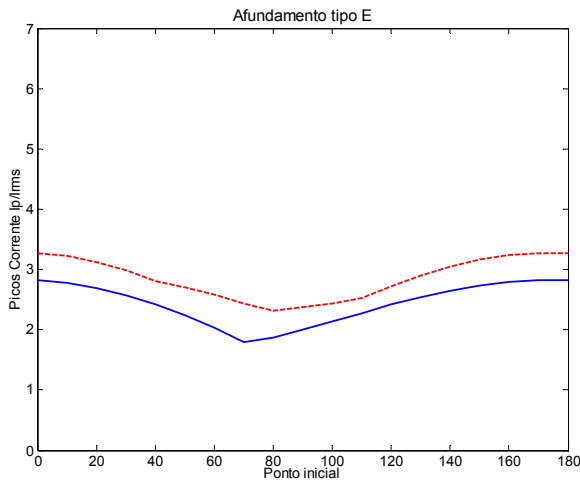
**Figura 8. 2 Picos de corrente e de conjugado - Afundamento de tensão tipo B; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada)**



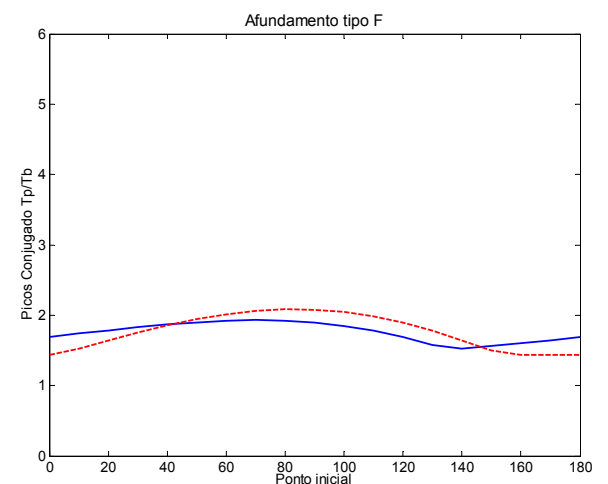
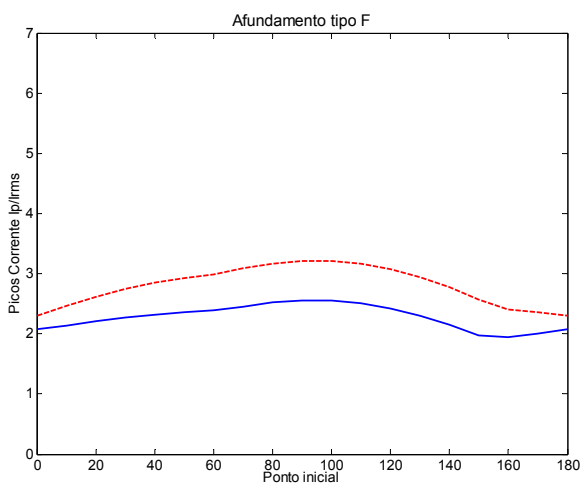
**Figura 8. 3 Picos de corrente e de conjugado - Afundamento de tensão tipo C; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada)**



**Figura 8. 4 Picos de corrente e de conjugado - Afundamento de tensão tipo D; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada)**



**Figura 8. 5 Picos de corrente e de conjugado - Afundamento de tensão tipo E; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada)**



**Figura 8. 6 Picos de corrente e de conjugado - Afundamento de tensão tipo F; queda de tensão (linha cheia), restabelecimento da tensão (linha tracejada)**

Nestas simulações, observa-se, a influência do instante inicial sobre a onda de tensão nos picos de corrente e de conjugado. Os maiores picos de corrente são obtidos, geralmente, no restabelecimento da tensão.

## 8.2 Influência do deslocamento inicial no ângulo de fase de tensão

O deslocamento do ângulo de fase dependerá da diferença angular entre a impedância da carga e a impedância da fonte, que é geralmente negativo, devido a que a impedância da carga é em muitos casos mais resistiva que a impedância da fonte. As simulações realizadas consideram deslocamentos que oscilam entre  $-5^\circ$  a  $-30^\circ$ . As tabelas (8.3), (8.4) e (8.5) apresentam o comportamento da corrente, do conjugado e da velocidade, para um motor de indução de 20 HP de potência de baixo escorregamento. Consideram-se, nestas simulações, diferentes ângulos de deslocamento de fase durante o afundamento.

**Tabela 8. 3 Picos de corrente devido a afundamentos de tensão considerando diferentes ângulos de deslocamento (afundamento 30%  $V_n - 300$  ms)**

	Picos de corrente $ I_p/(\sqrt{2}I_N) $				
	A	B	C	D	E
$0^\circ$	5,83	2,54	5,30	3,23	5,22
$-5^\circ$	5,86	2,54	5,27	3,24	5,22
$-10^\circ$	5,90	2,54	5,26	3,26	5,27
$-20^\circ$	6,02	2,55	5,31	3,32	5,44
$-30^\circ$	6,18	2,59	5,45	3,55	5,56
Varição máxima	5,66 %	1,93 %	3,48 %	9,01 %	6,11 %

**Tabela 8. 4 Picos de conjugado devido a afundamentos de tensão considerando diferentes ângulos de deslocamento (afundamento 30%  $V_n$  – 300 ms)**

	Picos de conjugado $ Tp/T_N $				
	A	B	C	D	E
0°	3,12	2,10	4,08	2,42	3,62
-5°	3,24	2,09	4,17	2,41	3,72
-10°	3,38	2,10	4,29	2,40	3,87
-20°	3,70	2,10	4,58	2,40	4,22
-30°	4,08	2,11	4,93	2,73	4,61
Varição máxima	23,52%	0,94 %	17,24 %	12,08 %	21,47 %

**Tabela 8. 5 Perda da velocidade devido a afundamentos de tensão considerando diferentes ângulos de deslocamento (afundamento 30%  $V_n$  – 300 ms)**

	Perda de velocidade $ w_m/w_b $				
	A	B	C	D	E
0°	0,8999	0,9519	0,9362	0,9370	0,9242
-5°	0,8997	0,9519	0,9361	0,9369	0,9241
-10°	0,8994	0,9517	0,9358	0,9366	0,9238
-20°	0,8989	0,9512	0,9348	0,9356	0,9227
-30°	0,8983	0,9504	0,9332	0,9341	0,9211
Varição máxima	0,177%	0,157 %	0,320 %	0,309 %	0,335 %

Das simulações observou-se que:

- o deslocamento do ângulo de fase em afundamentos de tensão simétricos resultou em maiores picos de conjugado e de corrente;
- para afundamentos de tensão simétricos e assimétricos o deslocamento do ângulo de fase resultou numa pequena queda da velocidade;
- os transitórios devido a afundamentos de tensão simétricos dependem da magnitude, duração do afundamento e do deslocamento do ângulo de fase;
- os transitórios devido a afundamentos assimétricos dependem de outras características, como o instante inicial e final sobre a onda de tensão.

Nas seguintes tabelas apresenta-se o comportamento do motor de indução considerando um deslocamento angular entre  $-5^\circ$  a  $-30^\circ$ , e considerando o instante inicial na onda de tensão onde se obtiveram os maiores picos de corrente e de conjugado.

**Tabela 8. 6 Picos de corrente considerando um ângulo de deslocamento e um ponto inicial sobre a onda de tensão (afundamento 30%  $V_n - 300$  ms)**

	Picos de corrente $ I_p/(\sqrt{2}I_N) $				
	A	B	C	D	E
$0^\circ$	5,92	3,51	5,30	5,09	5,22
$-5^\circ$	5,97	3,53	5,27	5,09	5,22
$-10^\circ$	6,03	3,56	5,26	5,10	5,27
$-20^\circ$	6,20	3,64	5,31	5,20	5,44
$-30^\circ$	6,41	3,71	5,45	5,40	5,56
Varição máxima	7,64 %	5,39 %	3,48 %	5,74 %	6,11 %

**Tabela 8. 7 Picos de conjugado considerando um ângulo de deslocamento e um ponto inicial (afundamento 30%  $V_n - 300$  ms)**

	Picos de conjugado $ Tp/T_N $				
	A	B	C	D	E
$0^\circ$	3,12	2,61	4,08	4,08	3,62
$-5^\circ$	3,24	2,57	4,17	4,17	3,72
$-10^\circ$	3,38	2,54	4,29	4,29	3,87
$-20^\circ$	3,70	2,63	4,58	4,58	4,22
$-30^\circ$	4,08	2,88	4,93	4,93	4,61
Varição máxima	23,52 %	11,80 %	17,24 %	17,24 %	21,47 %

Das tabelas (8.3), (8.4), (8.6) e (8.7) conclui-se, que as maiores variações dos picos de corrente e de conjugado, devido a afundamentos, considerando o deslocamento do ângulo de fase e o instante inicial mais crítico, teve lugar num afundamento assimétrico do tipo B.

### 8.3 Influência do fator de assimetria

O fator de assimetria  $\vec{F}$  é um fator adicional que quantifica a assimetria trifásica, onde as impedâncias do sistema de seqüência positiva e negativa não são equivalentes. Nas seguintes tabelas, apresenta-se, o comportamento do motor de indução considerando um fator de assimetria de 0,95 em afundamentos assimétricos B, C e D. As simulações foram realizadas para um motor de 20 HP, a magnitude do afundamento é 30% e 60% com uma duração de 400 ms, considera-se o conjugado de carga proporcional ao quadrado da velocidade do motor.

**Tabela 8. 8 Picos de corrente devido a afundamentos de tensão considerando o fator de assimetria**

	Picos de corrente ( $I_p/(\sqrt{2}I_N)$ )					
	Afundamento de tensão 30% $V_N$			Afundamento De tensão 60% $V_N$		
	B	C	D	B	C	D
$\vec{F} = 1$	3,54	5,26	5,07	2,47	3,29	3,18
$\vec{F} = 0,95$	3,72	5,19	5,04	2,65	3,38	3,27
% erro	-5,08	1,33	0,59	-7,28	-2,73	-2,83

**Tabela 8. 9 Picos de conjugado devido a afundamentos de tensão considerando o fator de assimetria**

	Picos de conjugado ( $T_p/T_N$ )					
	Afundamento de tensão 30% $V_N$			Afundamento de tensão 60% $V_N$		
	B	C	D	B	C	D
$\vec{F} = 1$	2,61	4,08	4,08	2,04	2,44	2,44
$\vec{F} = 0,95$	2,47	3,99	3,99	2,07	2,34	2,34
% erro	5,36	2,20	2,20	-1,47	4,09	4,09

Destas tabelas, conclui-se, que geralmente o fator de assimetria produz menores picos de conjugado na máquina assíncrona, devido a afundamentos assimétricos, já que as tensões tornam-se menos desbalanceadas. Observam-se, também, maiores picos de corrente,



considerando o fator de assimetria de 0,95 e afundamentos não menores a 60% da magnitude da tensão.

#### 8.4 Influência da carga mecânica do motor

Em aplicações reais vários tipos de carga existem, com diferentes curvas conjugado – velocidade. Considerando um conjugado de carga constante, o restabelecimento da velocidade devido a um afundamento levará um tempo maior, devido ao conjugado de carga permanecer durante o evento independente da velocidade. Para os outros tipos de carga o conjugado diminui com a queda de velocidade causando que as cargas lineares ou quadráticas consumam menos potência durante o evento, como é observado em (CAO, 2002).

Para comparar o comportamento da máquina assíncrona devido a diferentes tipos de afundamentos e considerando diferentes cargas, foi empregada a distância Euclidiana (STUART, 1996; GUASH, 2004), definida no Anexo C. A expressão da distância Euclidiana entre duas matrizes é:

$$d(X, Y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \|X_{ij} - Y_{ij}\| \quad (8.4)$$

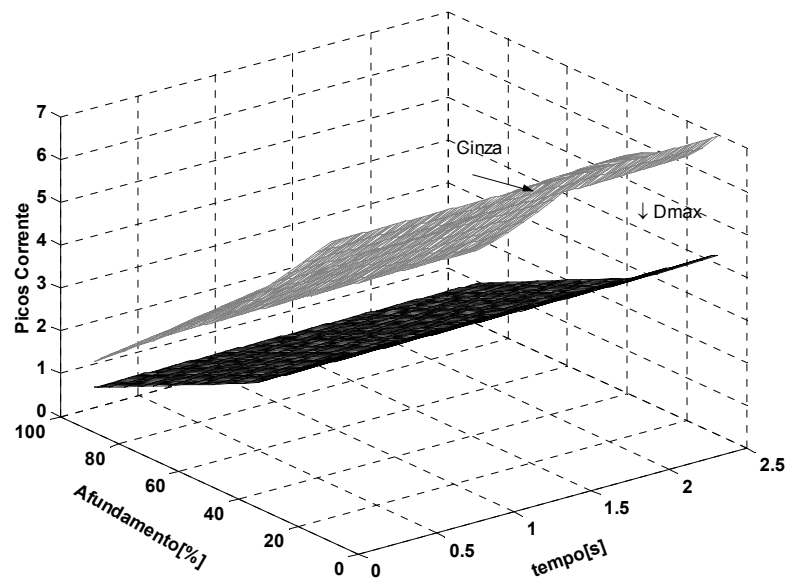
Os picos de corrente e de conjugado como a queda da velocidade devido a afundamentos de tensão, foram escritos em forma matricial, considerando o tipo de afundamento e a carga conectada ao motor. Por exemplo, para o afundamento tipo A tem-se uma superfície  $S_A(i,j) = S_A(\text{magnitude}, \text{duração})$ , com variações na magnitude do afundamento de 10% a 90% e com durações de 0,5 ciclo a 180 ciclos, resultando numa matriz  $S_A(17 \times 360)$ , considerando incrementos na magnitude de 5% e na duração de 0,5 ciclo.

Considerando todos os tipos de carga, foi calculada uma **matriz máxima** que contém os valores mais críticos do conjugado, da corrente e da velocidade para cada tipo de afundamento em cada magnitude e duração. A distância Euclidiana tem sido calculada para cada matriz  $S(i,j)$  com relação à matriz máxima, e normalizada com relação à distância máxima ( $D_{MAX}$  - distância entre a matriz máxima e a matriz nula), equação (8.5):

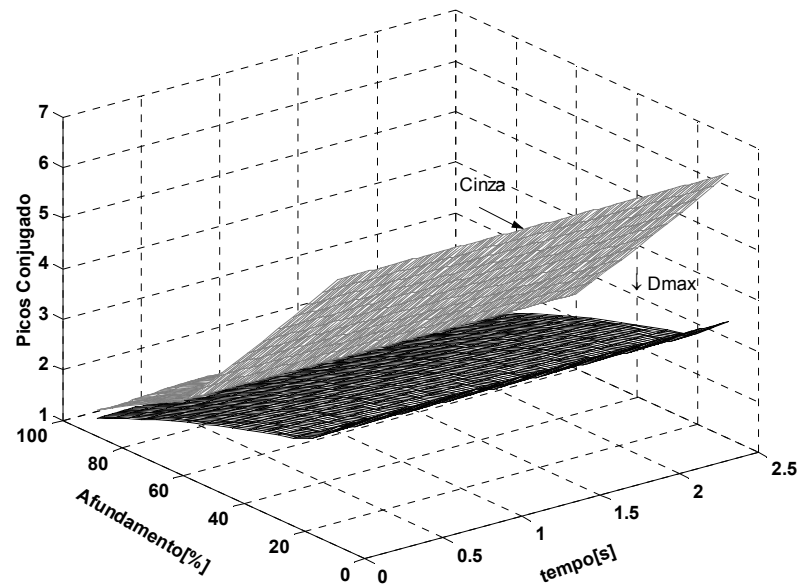


Das tabelas anteriores, observa-se, que os maiores picos de corrente ocorrem quando o motor é submetido a um conjugado de carga proporcional ao quadrado da velocidade mecânica ( $T_L \propto w_m^2$ ), e os maiores picos de conjugado ocorrem quando o conjugado de carga é considerado constante ( $T_L = T_b/2$ ), foram ressaltados em **negrito** as mínimas distâncias, o que significa os valores mais críticos da corrente e do conjugado para cada tipo de afundamento.

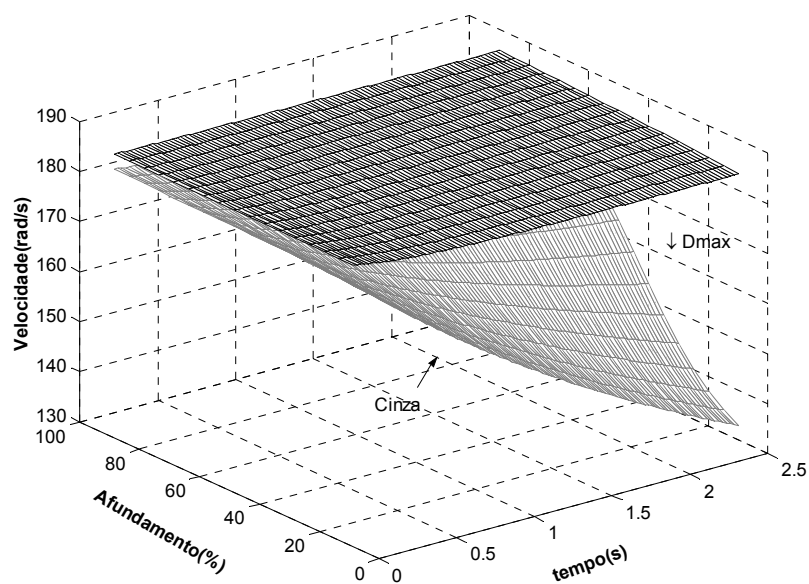
Na análise da perda de velocidade mecânica no motor de indução, obtive-se as maiores quedas de velocidade para um tipo de carga proporcional ao quadrado da velocidade mecânica. As figuras (8.7) a (8.9) representam a distância Euclidiana entre a matriz máxima, que contém os valores mais críticos da corrente, do conjugado e da velocidade, e a matriz para um afundamento de tensão do tipo B, com carga constante ou dependente da velocidade mecânica.



**Figura 8. 7 Picos de corrente, (em cinza, valores máximos considerando todos os tipos de afundamentos; em preto picos de corrente para um afundamento tipo B,  $T_L = T_b/2$ )**



**Figura 8. 8 Picos de conjugado, (em cinza, valores máximos considerando todos os tipos de afundamentos; em preto picos de conjugado para um afundamento tipo B,  $T_L = kw_m^2$ )**



**Figura 8. 9 Queda da velocidade no instante final do afundamento, (em cinza, superfície para um afundamento A,  $T_L = kw_m^2$  e em preto superfície para um afundamento tipo B,  $T_L = Tb/2$ )**

As tabelas (8.13), (8.14) e (8.15) apresentam a distância Euclidiana dos picos de corrente, picos de conjugado e da queda de velocidade para diferentes tipos de afundamentos de tensão. Consideram-se, nestas simulações, um conjugado de carga proporcional ao quadrado da velocidade mecânica.

**Tabela 8. 13 Distância Euclidiana entre os diferentes tipos de afundamento – Picos de corrente**

	Distância Euclidiana - Picos de corrente $ Ip/(\sqrt{2In}) $							
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	G (%)	MAX
A (%)		39,58	7,81	14,85	9,63	26,67	9,63	0,00
B (%)	39,58		28,77	21,54	26,67	24,63	26,67	39,58
C (%)	7,81	28,77		7,54	3,92	5,53	3,92	7,81
D (%)	14,85	21,54	7,54		5,26	3,33	5,26	14,85
E (%)	9,63	26,67	3,92	5,26		2,20	0,00	9,63
F (%)	13,08	24,63	5,53	3,33	2,20		2,20	13,08
G (%)	9,63	26,67	3,92	5,26	0,00	2,20		9,63
MAX (%)	0,00	39,58	7,81	14,85	9,63	13,08	9,63	

**Tabela 8. 14 Distância Euclidiana entre os diferentes tipos de afundamento – Picos de conjugado**

	Distância Euclidiana - Picos de conjugado $ Tp/Tn $							
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	G (%)	MAX
A (%)		15,09	16,11	17,62	11,95	11,95	11,95	17,49
B (%)	15,09		32,21	34,14	26,15	26,15	26,15	34,45
C (%)	16,11	32,21		7,14	9,67	9,67	9,67	7,21
D (%)	17,62	34,14	7,14		9,02	9,02	9,02	0,00
E (%)	11,95	26,15	9,67	9,02		0,00	0,00	9,33
F (%)	11,95	26,15	9,67	9,02	0,00		0,00	9,33
G (%)	11,95	26,15	9,67	9,02	0,00	0,00		9,33
MAX (%)	17,49	34,45	7,21	0,00	9,33	9,33	9,33	

**Tabela 8. 15 Distância Euclidiana entre os diferentes tipos de afundamento – Perda de velocidade mecânica**

	Distância Euclidiana - Velocidade $ w_m/w_b $						
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	MAX
A (%)		62,33	43,10	43,10	26,15	26,15	0,00
B (%)	62,33		14,15	14,15	36,24	36,24	62,33
C (%)	43,10	14,15		0,00	17,08	17,08	43,10
D (%)	43,10	14,15	0,00		17,08	17,08	43,10
E (%)	26,15	36,24	17,08	17,08		0,00	26,15
F (%)	26,15	36,24	17,08	17,08	0,00		26,15
MAX (%)	0,00	62,33	43,10	43,10	26,15	26,15	

Das tabelas anteriores, observa-se, que os maiores picos de corrente e as maiores quedas da velocidade obtêm-se em afundamentos de tensão simétricos. O afundamento de tensão tipo B é o menos severo, sendo que a distância entre a matriz do afundamento tipo B com relação a uma matriz máxima é superior que à distância do afundamento tipo A, o que significa que o afundamento de tensão do tipo B encontra-se afastado da matriz máxima.

Nos afundamentos de tensão tipo C e D têm-se os maiores picos de conjugado, os valores menos severos ocorrem num afundamento de tensão do tipo B. Dos afundamentos de tensão tipo E, F e G obtiveram-se valores semelhantes no conjugado, e na corrente os afundamentos tipo E e G apresentaram os mesmos valores. As figuras (8.10) a (8.13) apresentam as superfícies dos picos de corrente e de conjugado no motor assíncrono, devido a afundamentos simétricos e assimétricos.

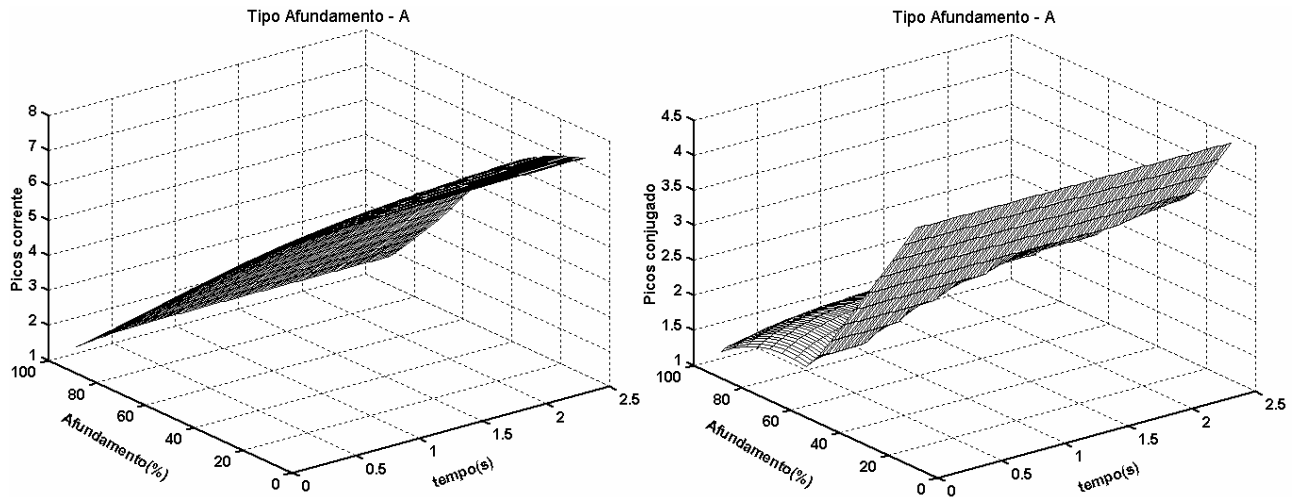


Figura 8. 10 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento de tensão tipo A ( motor 20 HP,  $T_L = k\omega_m^2$ )

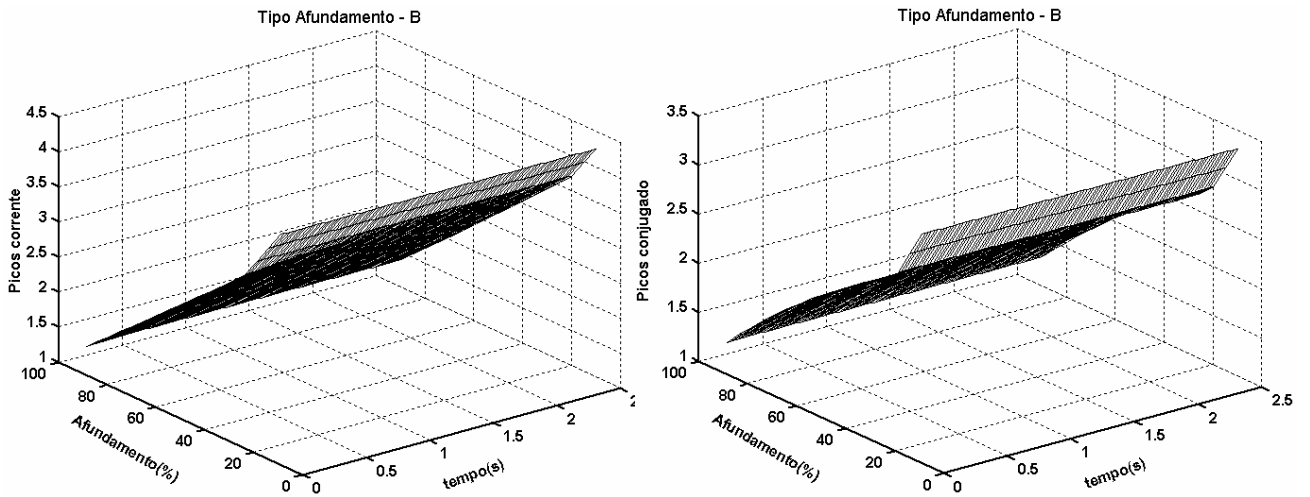


Figura 8. 11 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento de tensão tipo B (motor 20 HP,  $T_L = k\omega_m^2$ )

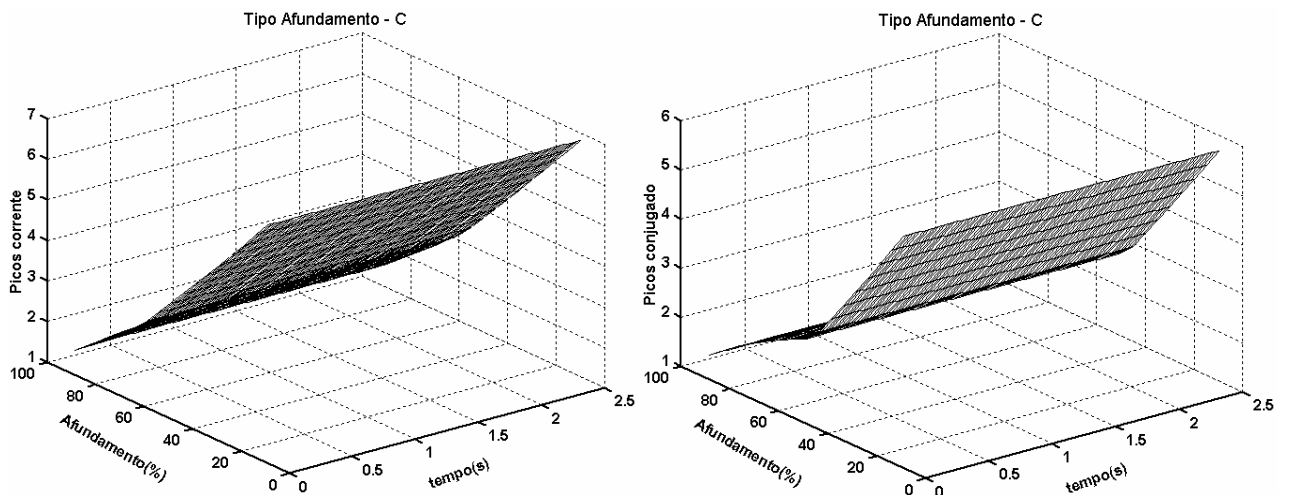
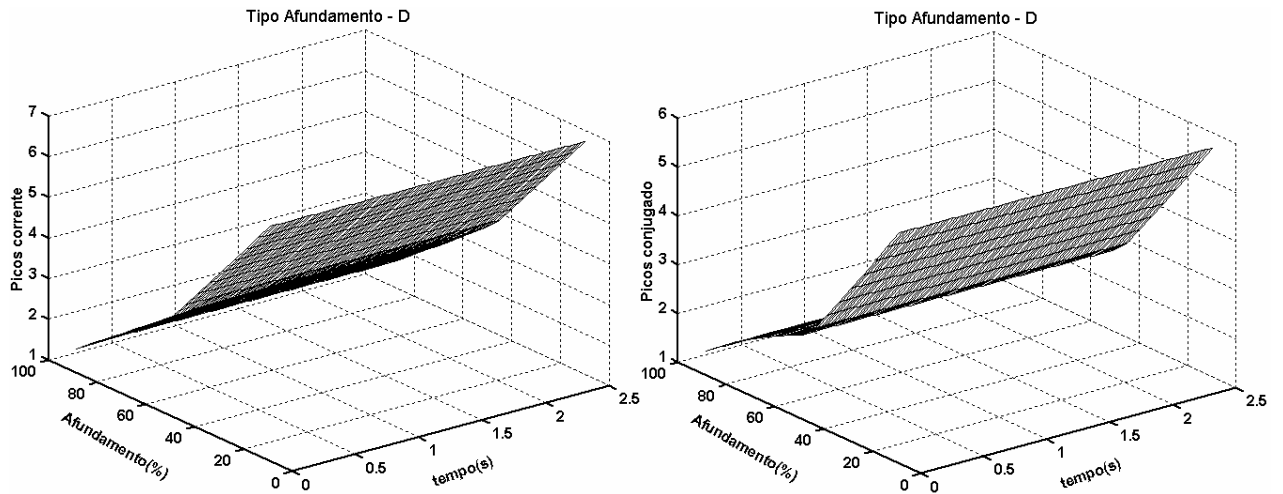


Figura 8. 12 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento de tensão tipo C



**Figura 8. 13 Picos de corrente e de conjugado para um afundamento tipo D (motor 20HP,  $T_L = kW_m^2$ )**

Observa-se, destas figuras, os maiores picos de corrente obtêm-se devido a afundamentos de tensão simétricos, e os maiores picos de conjugado obtêm-se em afundamentos de tensão assimétricos. O afundamento de tensão menos severo, é o afundamento do tipo B, com os menores picos de corrente e de conjugado.



## 9 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A implementação e os testes do motor de indução submetido a quedas de tensão foi realizado no Laboratório de Máquinas Elétricas e Acionamentos, da Universidade Federal de Rio Grande do Sul - UFRGS.

O sistema foi projetado para adquirir a tensão, corrente, conjugado e a velocidade de um motor de indução. A plataforma básica é um microcomputador PC comunicado com um osciloscópio digital (Tektronix TDS-210) através de uma porta paralela GPIB. Este osciloscópio guarda os transitórios elétricos e mecânicos do motor de indução no instante da queda e no restabelecimento da tensão

Foi implementado um programa no “software” **Labview** para a aquisição dos dados da máquina. Os gráficos serão mostrados na tela do usuário para análise visual do comportamento da máquina. A figura (9.1) apresenta o esquema de aquisição de dados do motor.

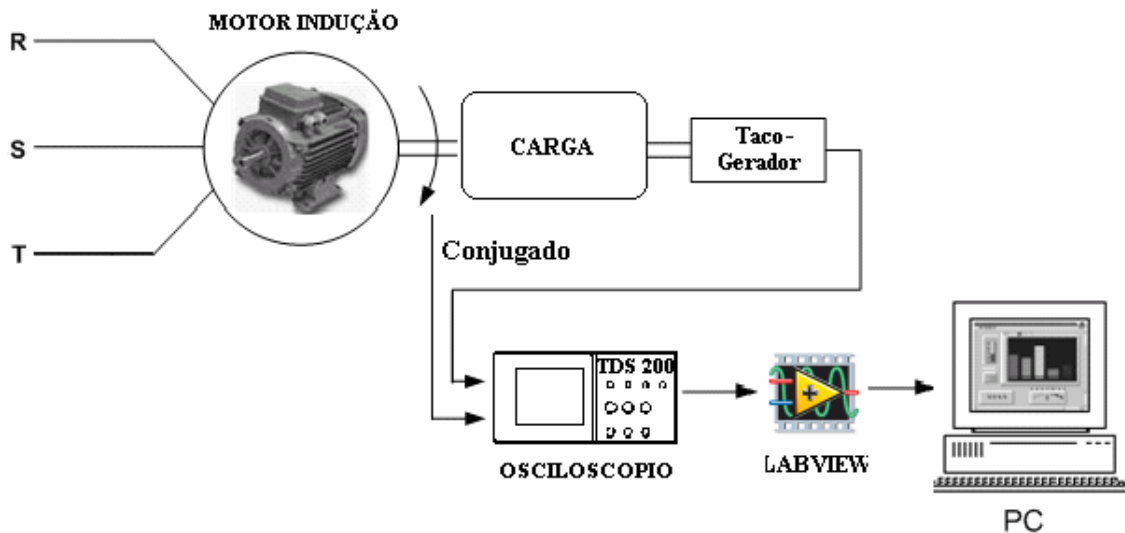
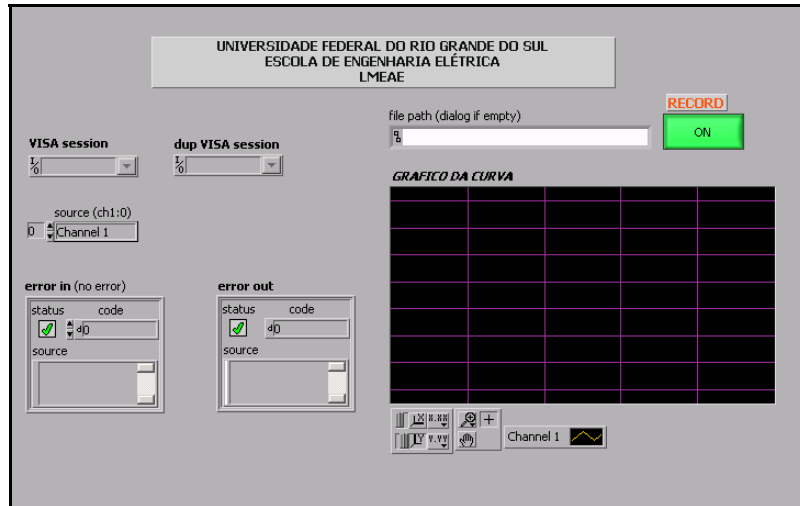


Figura 9. 1 Esquema de aquisição de dados do motor

**Labview** é um supervisor que utiliza uma linguagem de programação gráfica, projetada para aquisição de dados, supervisão e controle dos mesmos. Este “software” de programação é composto de duas janelas: a tela frontal (*front panel*), que serve de interface

com o usuário, mostrada na figura (9.2) e o diagrama de blocos (*block diagram*), onde o código será editado.



**Figura 9. 2 Tela de usuário de aquisição de dados – Labview**

### 9.1 Características do motor assíncrono

O motor de indução submetido a quedas de tensão consta de dois pares de pólos, rotor bobinado. O bobinado trifásico do estator foi conectado em delta sem conexão do neutro. Os dados nominais do motor são:

- Potência : 2,5 CV
- Tensão : 220/380 V
- Corrente : 7,5/4.3 A
- Frequência : 60 Hz
- Velocidade : 1780 RPM
- Momento de inércia : 0,014 kg.m<sup>2</sup>

Uma máquina de corrente contínua com excitação própria e conectada a um banco de resistores foi utilizada como carga do motor.

### 9.2 Calibração do conjugado

A concepção básica do sistema mecânico para a medição do conjugado consiste de uma célula de carga projetada para a medida da reação da carcaça da máquina, produzida pelo

conjugado. Os resultados da calibração do conjugado são apresentados na tabela (9.1). A calibração do conjugado é obtida de uma massa padrão vezes à distância ao eixo da massa padrão. O rotor da máquina foi mantido travado durante a calibração.

O sinal da célula de carga resulta de quatro *strain gages*, ligados com a configuração de ponte completa. O sinal de saída será enviado a um condicionador de sinais de extensômetros. Este equipamento fornecerá uma saída em volts, com indicação digital e analógica.

**Tabela 9. 1 Resultados da calibração do conjugado**

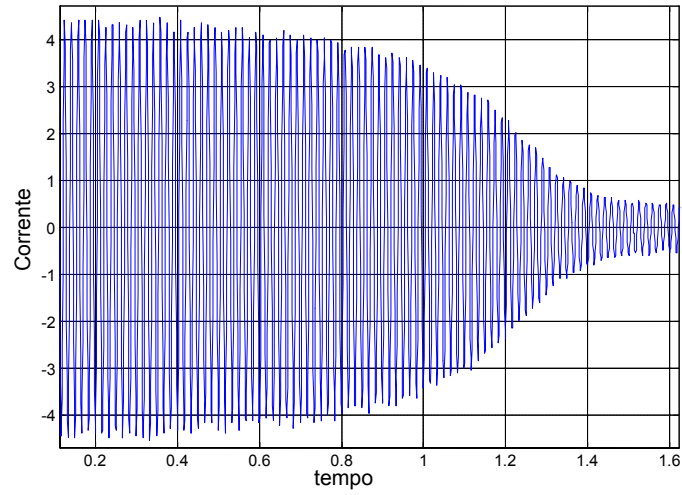
Conjugado (Kgfm)	Conjugado (N.m)	Tensão (mV)
0,00	0,00	0,00
0,45	4,41	171,5
0,90	8,82	347,5
1,80	17,64	692,0
4,50	44,1	1 731

A determinação da equação da curva de calibração é dada na seguinte equação:

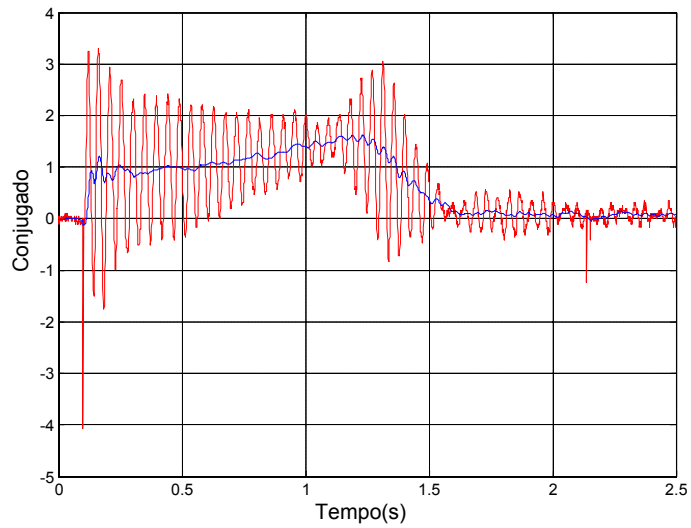
$$\begin{aligned} \text{Torque(Kgfm)} &= 2,59xV_{out}(mV) - 0,001 \\ \text{Torque(Nm)} &= 25,46xV_{out}(mV) - 0,0098 \end{aligned} \quad (9.1)$$

### 9.3 Transitórios na partida da máquina assíncrona

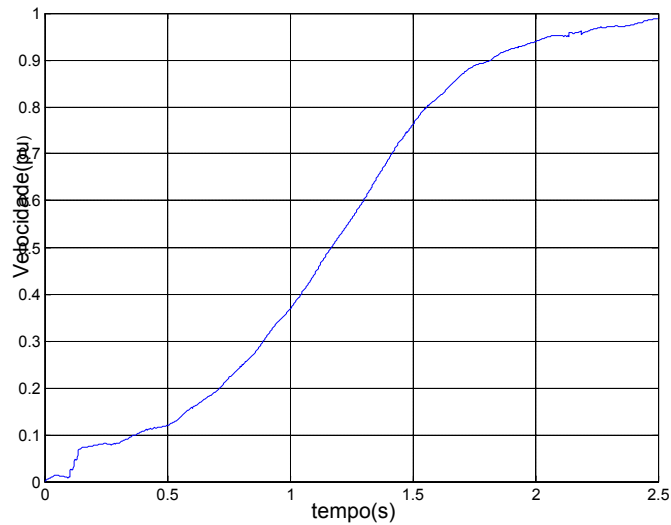
Dos ensaios experimentais, observou-se, as variáveis do motor de indução de 2,5CV durante livre aceleração (sem carga). Os transitórios na partida da máquina assíncrona a vazio são mostrados nas figuras (9.3) a (9.5).



**Figura 9.3** Característica da corrente durante livre aceleração  $|I/\sqrt{2}I_N|$  – sem carga



**Figura 9.4** Característica do conjugado durante livre aceleração  $|T_e/T_N|$  – sem carga

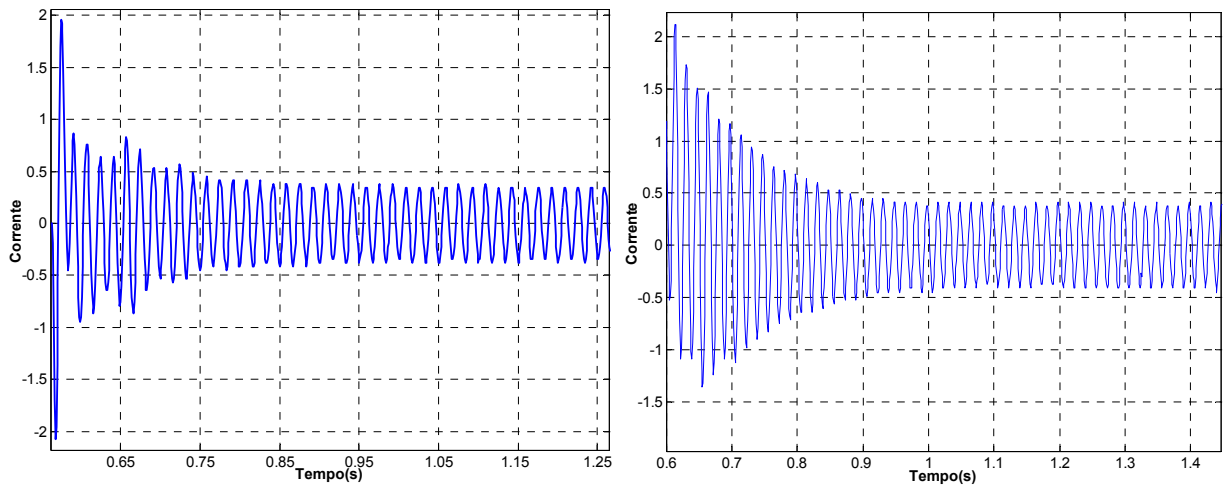


**Figura 9. 5 Característica da velocidade durante livre aceleração  $|w_m/w_b|$  – sem carga**

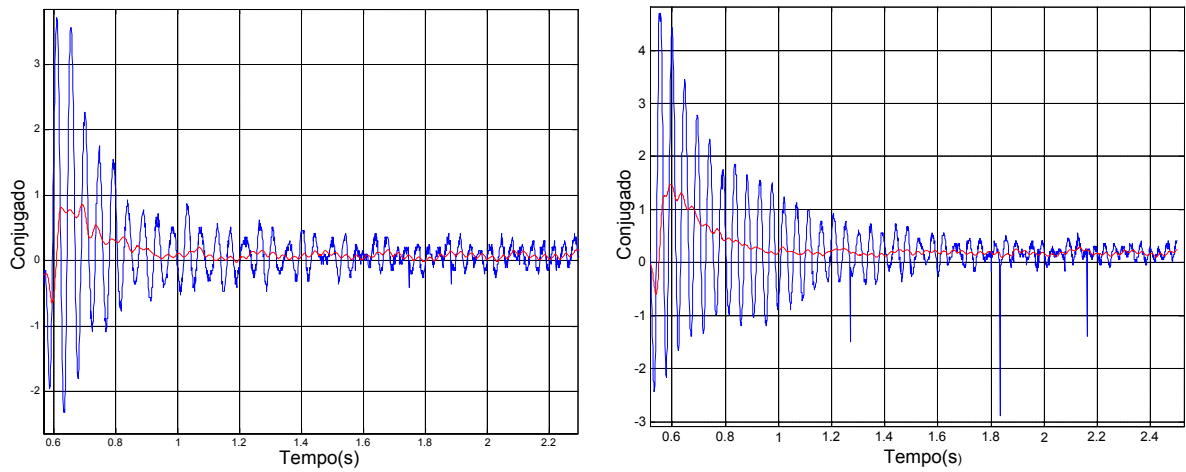
Os parâmetros da máquina são dados no Anexo D. A impedância de entrada da máquina quando esta encontra-se parada é essencialmente a resistência do estator e a reatância de dispersão em série com a resistência do rotor e a reatância de dispersão. Conseqüentemente, a corrente de partida é elevada quando a tensão é aplicada nos terminais do motor, figura (9.3). Os transitórios obtidos na partida da máquina serão comparados com os transitórios obtidos no restabelecimento da tensão depois de um afundamento de 67% da magnitude da tensão.

#### 9.4 Transitórios no afundamento de tensão

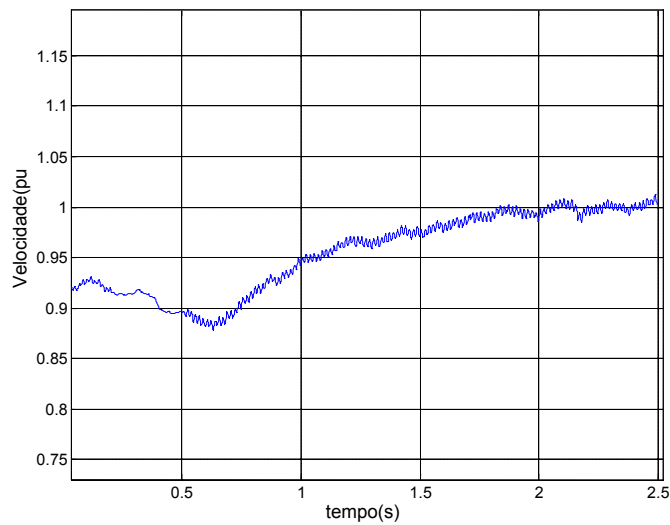
Os transitórios eletromagnéticos no motor de indução, devido a afundamentos de tensão, obtidos das simulações no Capítulo 8 foram picos de corrente e de conjugado, no instante inicial do afundamento e no restabelecimento da tensão. Assim como, a queda da velocidade durante o afundamento. Nas figuras (9.6) a (9.8) são apresentados os transitórios elétricos e mecânicos no restabelecimento da tensão para um motor de 2,5 CV. O motor foi submetido a um afundamento de tensão de 67% com auxílio de um autotransformador.



**Figura 9. 6** Característica da corrente no restabelecimento da tensão  $|I/\sqrt{2}I_N|$  a) sem carga b) com carga ( $T_L = T_b/4$ )



**Figura 9. 7** Característica do conjugado no restabelecimento da tensão  $|T_e/T_N|$  a) sem carga b) com carga

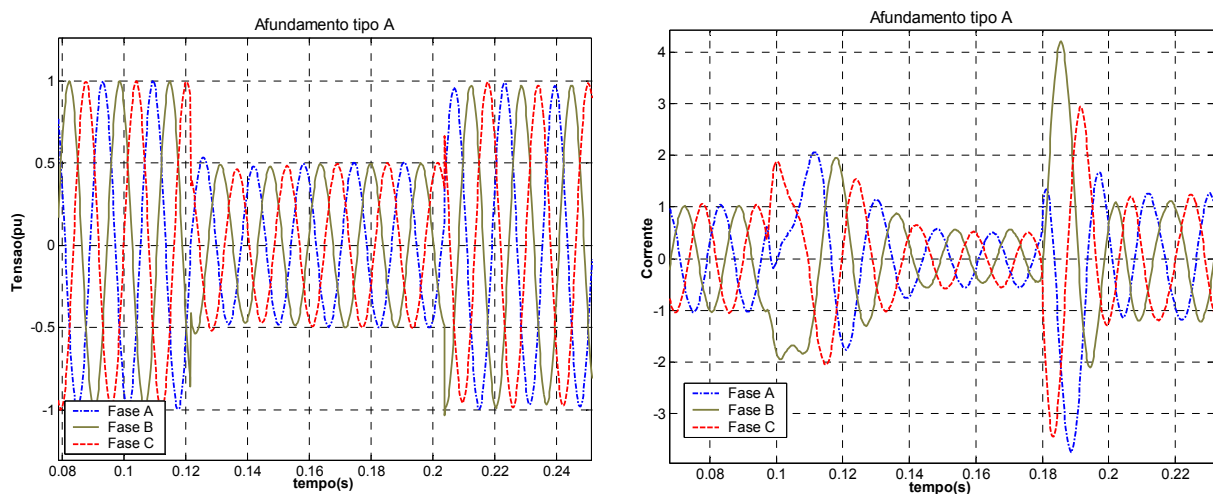


**Figura 9. 8** Característica da velocidade no restabelecimento da tensão  $|w_m/w_b|$  – com carga

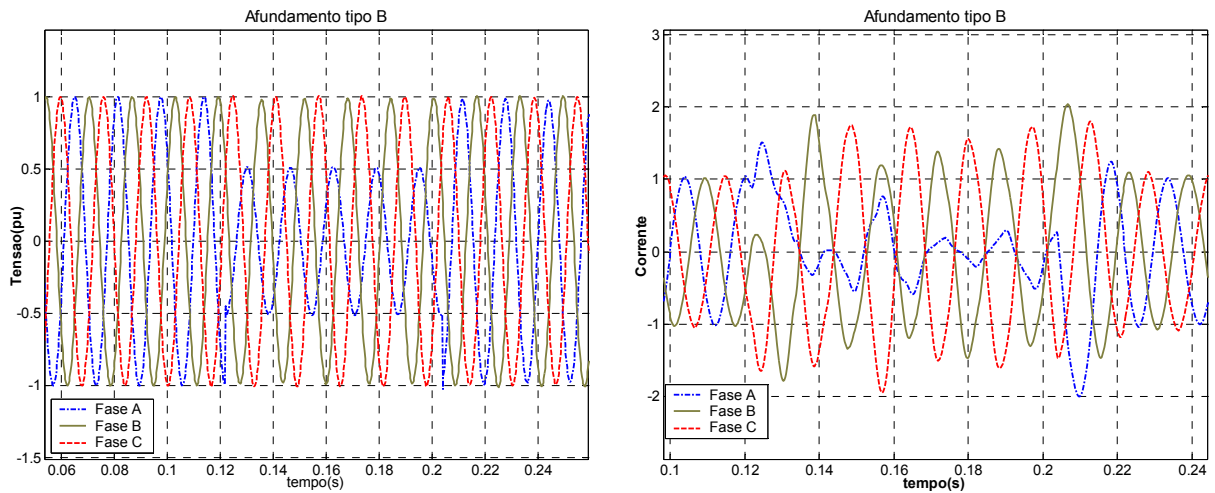
A interação entre o sistema mecânico do motor (carga e inércia mecânica) e a magnitude do afundamento determina a duração do afundamento, assim como a magnitude da tensão de restabelecimento do motor. Quando a tensão é restabelecida no sistema o motor demanda uma elevada corrente devido ao aumento da velocidade, o que produz um pós-afundamento. Observou-se das figuras (9.6) e (9.7) que os valores picos do conjugado e da corrente são quase semelhantes aos valores picos de partida do motor de indução.

Além disso, observou-se que a presença do motor de indução a vazio e com carga varia a magnitude do afundamento, de 67% a 56% da tensão nominal conectado o motor sem carga e de 67% a 52% considerando uma carga no motor. A diminuição da velocidade, devido ao afundamento de tensão, faz com que o motor adquira mais corrente da rede e conseqüentemente diminua a tensão. A desaceleração do motor terá lugar em uma escala de tempo maior que a variação das grandezas elétricas do motor.

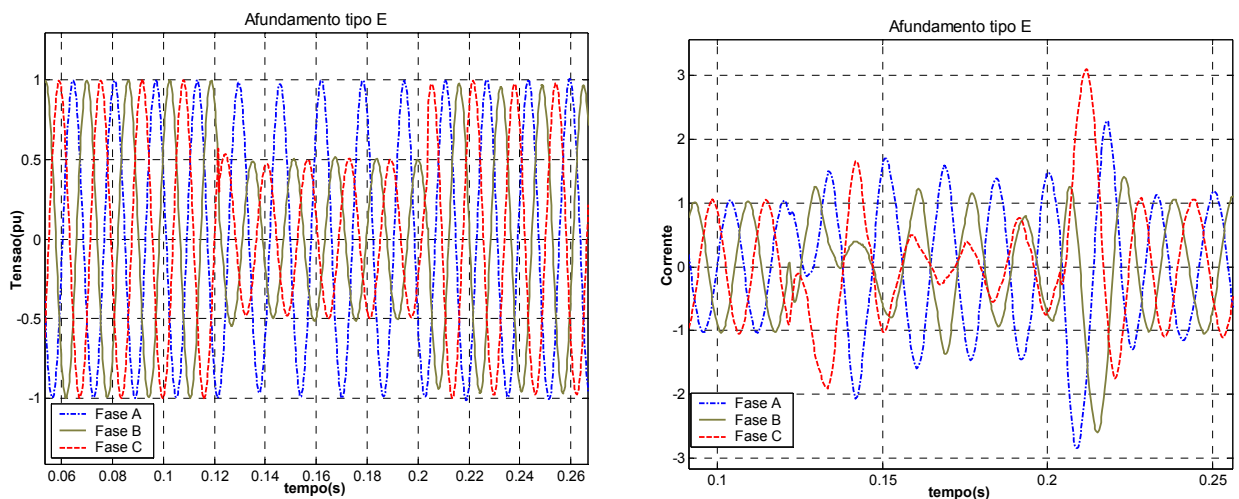
As figuras (9.9) a (9.11) apresentam o comportamento de um motor de indução de 1CV, sujeito a afundamentos de tensão simétricos e assimétricos de 50% da magnitude da tensão e de 5 ciclos de duração. Estas quedas de tensão foram impostas com ajuda de uma fonte programável de corrente alternada, as tensões foram medidas na fonte e as correntes nos terminais do motor. A distinção de afundamentos de tensão assimétricos com relação a afundamentos simétricos deverá considerar o comportamento das tensões de seqüência positiva e negativa durante o afundamento, uma classificação dos afundamentos de tensão pela teoria de componentes simétricas é apresentada no Anexo B.



**Figura 9. 9 Afundamento tipo A: (a) Tensão em valores unitários, (b) Corrente  $|I/\sqrt{2}I_N|$**



**Figura 9. 10 Afundamento tipo B: (a) Tensão em valores unitários, (b) Corrente  $|I/\sqrt{2}I_N|$ , (5 ciclos e 50% da magnitude do afundamento)**



**Figura 9. 11 Afundamento tipo E: (a) Tensão em valores unitários, (b) Corrente  $|I/\sqrt{2}I_N|$ , (5 ciclos e 50% da magnitude do afundamento)**

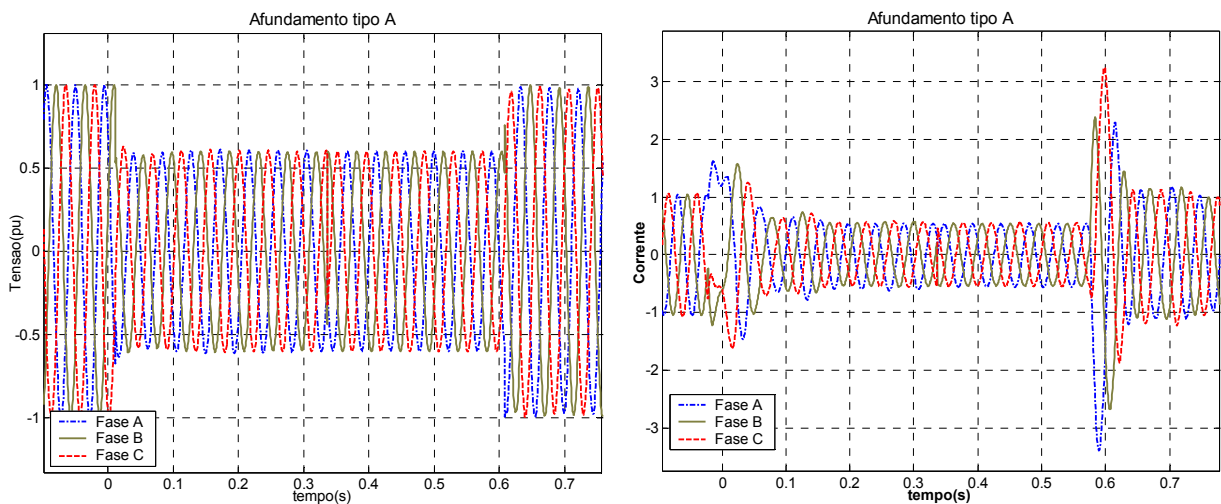
Observa-se destas figuras que o afundamento de tensão mais severo é o afundamento tipo A, com picos de corrente de 4 , e o afundamento menos severo é o tipo B, com picos de corrente de 2. A tabela (9.2) apresenta os picos de corrente obtidos através dos testes experimentais e os simulados pelo método simplificado. O motor de indução, foi submetido a afundamentos de tensão simétricos e assimétricos de 50% e 60% da magnitude da tensão com durações de 83 e 500 ms, respectivamente.



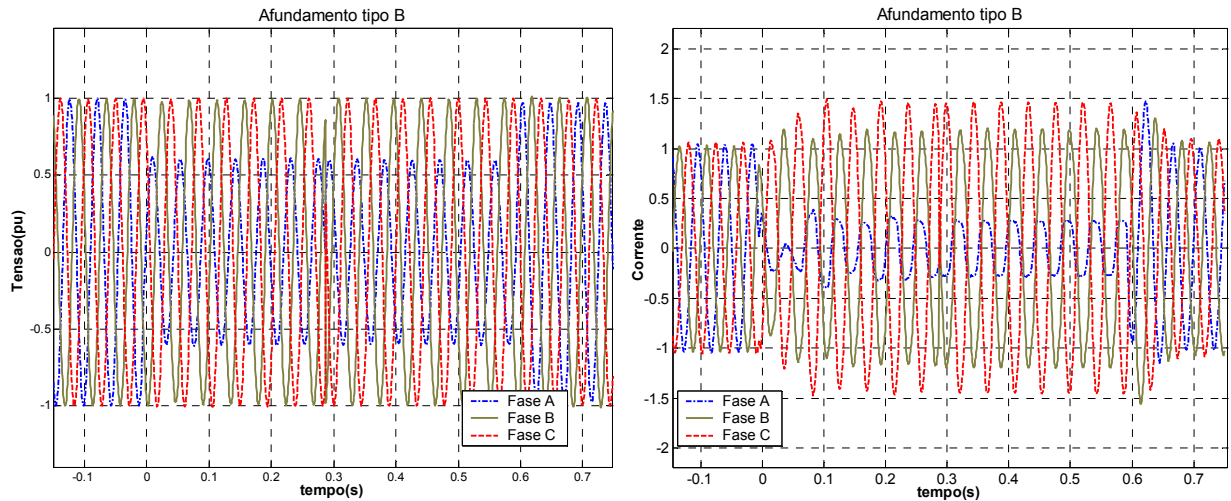
**Tabela 9. 2 Comparação entre os resultados experimentais e os simulados pelo método simplificado: Picos de corrente**

	Picos de corrente ( $I_p/(\sqrt{2}I_N)$ )					
	Afundamento de tensão $50\%V_N$			Afundamento de tensão $60\%V_N$		
	A	B	E	A	B	E
D. Experimentais	4,10	1,98	3,01	3,29	1,52	2,23
M. Simplificado	3,74	1,77	2,72	3,19	1,61	1,92
% erro	8,78	10,60	9,63	3,03	5,59	13,90

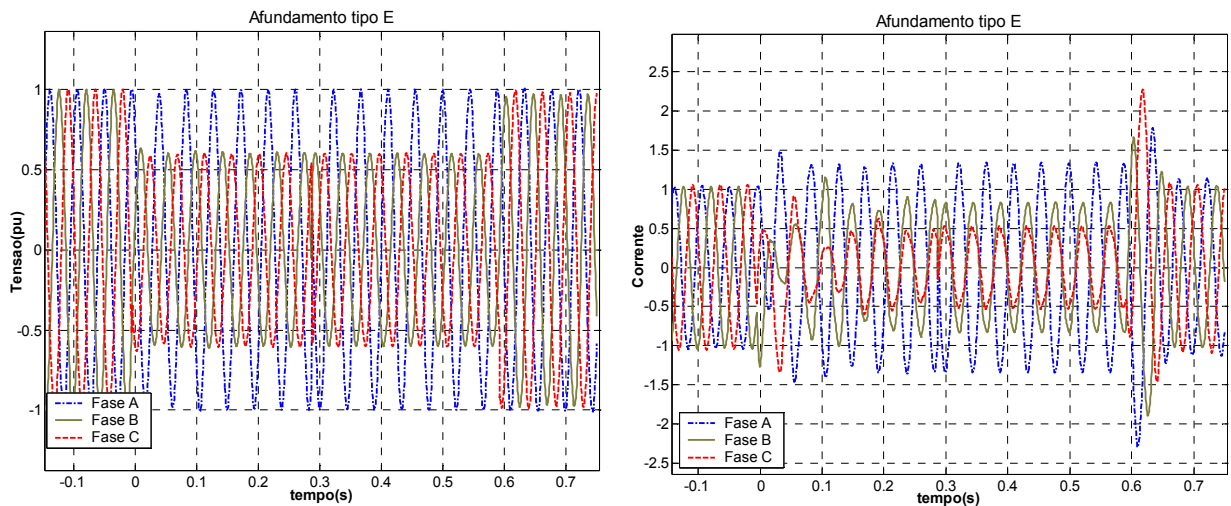
Da tabela (9.2), observa-se, um maior erro no cálculo das variáveis elétricas utilizando o método simplificado, devido a que o motor tem uma baixa constante de inércia e um alto escorregamento. Concluindo que para este tipo de máquinas o método simplificado não será adequado. As figuras (9.12) a (9.14) apresentam o comportamento da corrente em cada fase, o motor de 1CV foi submetido a afundamentos simétricos e assimétricos de 60% da magnitude da tensão e uma duração de 500 ms. Para o afundamento tipo B, a queda de tensão tem lugar na fase *a*, e para o afundamento tipo E nas fases *b* e *c*.



**Figura 9. 12 Picos de corrente para um afundamento tipo A (500 ms e 60% da magnitude do afundamento)**



**Figura 9.13** Picos de corrente para um afundamento tipo B (500 ms e 60% da magnitude do afundamento)



**Figura 9.14** Picos de corrente para um afundamento tipo E (500 ms e 60% da magnitude do afundamento)

Como apresentado no Capítulo 7, o motor de indução influencia na tensão característica de afundamentos simétricos e assimétricos. Para um afundamento de tensão do tipo B, as correntes nas fases *b* e *c* aumentam, o que significa que durante o afundamento tem-se uma diminuição da tensão nestas fases, assim as tensões de fase tornaram-se menos desbalanceadas e a magnitude da tensão de seqüência negativa diminuiu. Para o afundamento tipo E a corrente na fase *a* aumentou, o que significa que a magnitude da tensão de seqüência negativa diminuiu também.

Os efeitos que fazem com que as tensões nos terminais do motor sejam diferentes das tensões na rede, é que quando a tensão diminui o motor demanda uma elevada corrente no início do afundamento, o que faz diminuir a magnitude do afundamento nos terminais do

motor. O segundo efeito, é que a tensão de seqüência negativa devido a afundamentos assimétricos é muito inferior a tensão de seqüência positiva, pelo qual tem-se uma elevada corrente negativa no motor. Em afundamentos assimétricos, o motor terá uma baixa impedância de seqüência negativa, esta impedância permanecerá constante durante o afundamento, já que não depende do escorregamento, isto causará uma tensão sustentada não zero sobre a fase onde ocorreu o afundamento e uma pequena queda de tensão nas outras fases. A diferença da magnitude da tensão, nas fases onde não ocorreu o afundamento será devida ao deslocamento do ângulo de fase entre a tensão de seqüência positiva e negativa durante o afundamento.

## 10 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### CONCLUSÕES

Os efeitos transitórios nas grandezas da máquina assíncrona devido a afundamentos de tensão dependem da magnitude e da duração do afundamento, dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina, da carga e da inércia mecânica, do tipo de falha que produz o afundamento, do deslocamento do ângulo de fase da tensão no instante do afundamento, do instante inicial sobre a onda de tensão no início do afundamento, da tensão de restabelecimento, entre outros. Em geral, as conseqüências de um afundamento de tensão sobre uma máquina assíncrona são a perda de velocidade produzida durante o afundamento, e os picos de corrente e de conjugado no instante inicial da queda de tensão e no restabelecimento. Para máquinas assíncronas de elevada potência, elevada constante de inércia, e baixo escorregamento, os transitórios elétricos devido aos afundamentos de tensão e a perda da velocidade serão menos severos que para máquinas assíncronas de baixa potência, baixo constante de inércia, e alto escorregamento.

Os afundamentos de tensão são, geralmente, representados por uma magnitude e duração, mas observaram-se outras características importantes que influenciam o comportamento da máquina. Assim, separando os afundamentos de tensão em simétricos e assimétricos obteve-se que os transitórios devido a afundamentos simétricos dependem da magnitude e da duração do afundamento, do deslocamento do ângulo de fase e das características do sistema mecânico do motor. Os transitórios devido a afundamentos assimétricos dependem de outras características como, o instante inicial e final sobre a onda de tensão. Além disso, observou-se que a tensão de seqüência negativa devido às tensões assimétricas produz oscilações não amortecidas no conjugado e na velocidade durante o afundamento.

Das simulações e dos dados experimentais concluiu-se que, os afundamentos de tensão assimétricos produzem picos de corrente menos severos que os produzidos por afundamentos simétricos. Enquanto que, os picos de conjugado produzidos por afundamentos assimétricos tipos C e D são maiores, devido à influência da tensão de seqüência negativa durante o afundamento, Anexo B, que produz um maior conjugado eletromagnético médio.

Da classificação dos afundamentos de tensão dada pela teoria de componentes simétricas, Anexo B, observou-se também que a mínima queda de tensão de seqüência positiva ocorre para o afundamento do tipo B que apresenta os picos de corrente e de conjugado menos severos. Nos afundamentos de tensão tipo E e G, as tensões de seqüência positiva e negativa são semelhantes, a única diferença é a tensão de seqüência zero que não é considerada no motor de indução, já que sua conexão não leva o neutro. Obteve-se das simulações, os mesmos efeitos sobre a máquina, para afundamentos de tensão do tipo E e G.

Para análise da máquina assíncrona sujeita a afundamentos de tensão, foram simulados uma ampla gama de afundamentos pelo método simplificado, que se mostrou mais rápido que o método numérico tradicional empregado. O método simplificado depende das constantes de tempo, mecânica e elétrica da máquina, assim como da constante de inércia, já que lineariza a equação diferencial elétrica, considerando a velocidade mecânica constante no início do afundamento e no restabelecimento da tensão. Considerando as constantes de tempo no método simplificado, conclui-se, o método simplificado apresentará uma melhor resposta para máquinas assíncronas de elevada constante de inércia e baixo escorregamento, devido a que, a constante de tempo mecânica será de várias ordens superiores que a constante de tempo elétrica.

Das simulações observou-se também, a influência do sistema mecânico sobre as grandezas do motor de indução devido a afundamentos de tensão. Obtendo que os maiores picos de corrente ocorrem quando o conjugado de carga é proporcional ao quadrado da velocidade mecânica, e os maiores picos de conjugado, quando o conjugado de carga é considerado constante. A perda de velocidade do motor de indução resultou também maior para um tipo de carga proporcional ao quadrado da velocidade.

Dos dados experimentais obtidos no Capítulo 9 observou-se que a presença do motor de indução a vazio e com carga varia a magnitude do afundamento de tensão da rede com a tensão registrada nos terminais do motor. A queda da velocidade no início do afundamento de tensão faz com que o motor adquira mais corrente da rede e conseqüentemente diminua a tensão. Além disso, observou-se que a tensão de seqüência negativa devido a afundamentos assimétricos influencia as características do afundamento, já que uma baixa tensão de seqüência negativa admite uma elevada corrente negativa dentro do motor, e a baixa

impedância de seqüência negativa causará uma tensão sustentada não zero na fase onde ocorreu o afundamento e uma pequena queda de tensão nas outras fases.

## TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado neste trabalho, sugeriu-se:

- Estudo, análise, simulação e ensaios experimentais do comportamento de outras cargas sujeitas a afundamentos de tensão, tais como as máquinas síncronas, os transformadores, os acionamentos de velocidade variável.

A qualidade de energia é importante, especialmente a distorção da tensão senoidal, as principais conseqüências de um afundamento de tensão sobre uma máquina assíncrona foram picos de corrente e conjugado como a perda da velocidade durante o afundamento, resultados semelhantes são obtidos frente a máquinas síncronas.

Equipamentos mais sensíveis frente a afundamentos de tensão são os acionamentos de velocidade variável. Em muitos acionamentos de velocidade variável, as tensões trifásicas são alimentadas por um retificador de diodos trifásico. A tensão de corrente contínua é invertida a uma tensão alternada de magnitude e freqüência variável, (comumente emprega-se PWM - *Pulse Width Modulation*). O disparo de acionamentos de velocidade variável sujeita a afundamentos pode ser devido a diferentes fenômenos, mas a principal causa é os sistemas de controle e proteção. Em futuros trabalhos, devem ser considerados o comportamento de acionamentos trifásicos de velocidade variável, transformadores, máquinas síncronas, etc., devido a afundamentos simétricos e assimétricos.

- Influência de cargas dinâmicas nas características de afundamentos de tensão.

As cargas dinâmicas têm uma forte influência sobre as características de afundamentos. O motor de indução foi modelado neste estudo e apresentado a influência deste nas características do afundamento. No entanto, outras cargas, como retificadores, podem também modificar as características do afundamento e até corrigir o método de classificação. Os efeitos das cargas sobre os afundamentos de tensão são a tensão característica ( $\vec{V}$ ) e o fator de assimetria ( $\vec{F}$ ), apresentados neste trabalho.

- Análise da sensibilidade de cargas frente a afundamentos de tensão, criação de curvas de tolerância.

O grande interesse dos afundamentos de tensão é devido aos problemas que eles causam sobre vários tipos de equipamentos. Especialmente computadores, acionamentos de velocidade variável e equipamentos de controle de processo, devido a sua sensibilidade, será importante obter as curvas de tolerância dos equipamentos mais comuns no sistema.

Por outro lado observou-se que, o instante sobre a onda de tensão no início do afundamento, influenciou os picos de corrente e de conjugado do motor de indução, devendo-se realizar uma análise teórica da relação deste com o comportamento do sistema de proteção.

## REFERÊNCIAS

- AKBABA, M.; FAKHRO, S. New model for single unit representation of induction motor loads, including skin effect, for power system transient stability studies. **IEE Proceedings B: electric power application**. London, v. 139, n. 6, p. 521-533, nov. 1992.
- ANDERSON, P. M. **Analysis of Faulted Power Systems**. New York: IEEE Press, 1995.
- BECKER, C; BRAUN W. et. al. **IEEE Std 493: predicting voltage sags (dips)**, [S.I], 1993.
- BOLLEN, M. H. The influence of motor reacceleration on voltage sags. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 31, n. 4, p. 667-674, july/aug. 1995. ISSN: 0093-9994/95.
- BOLLEN, M. H. Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 32, n. 6, p. 1414-1514, nov./dec. 1996. ISSN: 0093-9994(96)07226-X.
- BOLLEN, M. Characterization of voltage sags experienced by three phase adjustable speed drives. **IEEE Transaction on Power Delivery**. New York, v. 12, n. 4, oct. 1997. ISSN: PE-115-PWRD-0-01-1997.
- BOLLEN, M. H.; GRAAFF, R. Behavior of AC and DC drives during voltage sags with phase angle jump and three phase unbalance. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 2, p. 1225 – 1230, jan./feb. 1998. ISSN: 0-7803-4403-0.
- BOLLEN, M.; YALÇINKAYA, G.; HAZZA, G. The use of electromagnetic transient programs for voltage sags analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 8., 1998, Athena, Greece. **Proceedings...** New York: IEEE, 1998, v. 1, p. 598 – 603. ISSN: 0-7803-5105-3/98.
- BOLLEN, M. H. **Understanding Power Quality Problems: voltage sags and interruptions**. New York: IEEE Press, 2000.
- BOLLEN, M. H. Algorithms for characterizing measured three phase unbalanced voltage dips. **IEEE Transaction on Power Delivery**. New York, v. 18, n. 3, p. 937 – 944, july 2003. ISSN: 10,1109/TPWRD.2003.813879.
- BOLLEN, M. H. Voltage recovery after unbalanced and balanced voltage dips in three phase systems. **IEEE Transaction on Power Delivery**. New York, v. 18, n. 4, p. 1376 – 1381, oct. 2003. ISSN:101109/TPWRD.2003.817725.
- CAO, R.; COLLINS, E. The effects of load types on the behavior of AC motor drives during voltage sags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 10., 2002. **Proceedings...** New York: IEEE, 2002, v.1, p. 353 – 358. ISSN: 0-7803-7671-4.



CARLSSON, F. Saturation in asynchronous machines due to voltage sags, *Electrical Engineering: Royal Institute of Technology*, Sweden, p. 1 – 9, 2003. ISSN : 90-75815-07-7. Disponível em: <<http://eme.ekc.kth.se>>. Acesso em: nov. 2002.

CÓRCOLES, F.; PEDRA, J. Algorithm for the study sags on induction machines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 14, n. 4, p. 959-968, dec. 1999. ISSN: 0885-8969.

CÓRCOLES, F. et al. Analysis of the induction machines parameter identification. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 17, n. 2, june 2002. ISSN: 0885-8969.

DAS, J. C. Effects of momentary voltage dips of operation of induction and synchronous motor. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 26, n. 4, p. 711-718, july/aug. 1990. ISSN: 0093-9994/90/0700-0711.

FAIZ, J.; EBRAHIMPOUR, H.; PILLAY, P. Influence of unbalanced voltage on the steady state performance of a three phase squirrel cage induction motor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 19, n. 4, p. 657-662, dec. 2004. ISSN: 10-1109-TEC.2004.837283.

FITZER, C. et al. Voltage sags detection technique for a dynamic voltage restorer. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 40, n. 1, p. 203-212, jan./feb. 2004. ISSN: 0093-9994.

FITZGERALD, A. E. **Electric Machinery**. New York: Mcgraw-Hill, 1990. 599 p. ISBN: 0-07-021134-5.

GILL, G. R.; LAUGHTON, M. A. Limiting induction motor transient shaft torques following source discontinuities. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 13, n. 3, p. 250-256, mar. 1998. ISSN: 0885-8969.

GÓMEZ, J.; MORCOS, M. et al. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New York, v. 17, n. 2, p. 434-440, apr. 2002. ISSN: 0885-8977(02)02737-1.

GNATIV, R.; MILANOVI, J. Voltage sags propagation in systems with embedded generation and induction motors. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, Vancouver, Canada. **Proceedings...** New York: IEEE, 2001, v.1, p. 474-479. ISSN: 0-7803-7173-9.

GUASCH, L.; CÓRCOLES, F.; PEDRA J. Effects of symmetrical and unsymmetrical voltage sags on induction machines. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New York, v. 19, n. 2, p. 774-782. apr. 2004. ISSN: 10.1109/TPWRD.2004.825258.

GUASCH, L.; CÓRCOLES, F.; SAEZ, L. Effects of symmetrical voltage sags on three phase three legged transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New York, v. 19, n. 2, p. 875-883, apr. 2004. ISSN: 10.1109/TPWRD.2004.825306.

HEINE, P.; LEHTONEN, M. Voltage sag distributions caused by power system faults. **IEEE Transactions on Power Systems**. New York, v. 18, n. 4, p. 1367-1373, nov. 2003. ISSN: 10,1109/TPWRS.2003.818606.

HOFMANN, H.; SETH, R. S. Speed sensorless vector torque control of induction machines using a two time scale approach. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 34, n. 1, jan./feb. 1998.

HOLTZ, J. On the spatial propagation of transient magnetic fields in AC machines. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 32, n.4, p. 927-937, july/aug. 1996. ISSN: S 0093-9994(96)04155-2.

HOLTZ, J. Sensorless control of induction motor drives. In: ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES GROUP, 2002, University of Wuppertal, Germany. **Proceeding...** New York: IEEE, 2002, v. 90, n.8, pp. 1359-1394.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC: **Electromagnetic Compatibility**. Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results, 61000-2-8, IEC 2000, section 8.

INSTITUTION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEER. **IEEE Std 1159**: recommend practice for monitoring electric power quality. New York, 1995. ISBN 1-55937-549-3

JACOBINA, C. B. et al. Estimating the parameters of induction machines at standstill. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 17, n. 1, p. 85-89, mar. 2002. ISSN: 0885-8969(02)01499-7.

KEY, T.; CHATTOPADHYAY, S. Predicting behavior of induction motor during electrical service faults and momentary voltage interruptions. **IEEE Industry Application Magazine**. New York, jan./feb. 1995. ISSN: 0-7803-0937-5/93.

KIRTLEY, J. L. Analytic design evaluation of induction machines. Electric machinery 6.685. **Massachusetts Institute of Technology**, 2004. Department of Electrical Engineering and Computer Science. Disponível em: < <http://ocw.mit.edu/index.html>>. Acesso em: june 2005.

KRAUS, P. C. **Analysis of Electric Machinery**. New York: Mcgraw-Hill, 1995. 599 p. ISBN: 0-7803-1101-9.

MARTINEZ, J.; JHONSON, B.; GRANDE-MORAN, C. Parameter determination for modeling system transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New York, v. 20, n. 3, july 2005. ISSN: 10,1109/TPWRD.2005.848725.

MCGRANAGHAN, M.; MUELLER, D.; SAMOTYJ, M. Voltage sags in industrial system. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 29, n. 2, mar./apr. 1993.

MENDOZA, M.; FLORES, A.; HOMRICH, R. Estimation of induction machine behaviour subject to voltage sags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE POWER ELECTRONIC, MACHINES AND DRIVES, 3., 2006, Dublin, Ireland. **Proceedings...** London: PEMD, 2006, p. 286-290. ISSN: 0537-9989.

MILANOVIC, J. Characteristics of voltage sags in radial networks with dynamic load and embedded generators. In: POWER TECHNICAL CONFERENCE, 2001, Porto, Portugal. **Proceedings...** New York: IEEE, 2001, v. 1. ISSN: 0-7803-7139-9.

MUNOZ, A. R.; LIPO, T. A. Complex vector model of the squirrel cage induction machine including instantaneous rotor bar currents. **IEEE Transactions on Industry Application**. New York, v. 35, n. 6, p.1332-1340, nov./dec. 1999. ISSN: 0093-9994(99)07496-4.

PEDRA, J.; CORCOLES, F.; SUELVES, F. Effect of balanced and unbalanced voltage sag on VSI fed adjustable speed drives. **IEEE Transactions Power Delivery**. New York, v. 20, n. 1, p. 224-233, jan. 2005. ISSN: 10,1109/TPWRD.2004.837832.

RUIZ, N.; VERA, P.; JURADO, F. Discrimination between transient voltage stability and voltage sag using damped sinusoids based transient modeling. **IEEE Transactions Power Delivery**. New York, v. 20, n. 4, p. 2644-2650, oct. 2005. ISSN: 10-1109-TPWRD. 2005.855436.

SEUNG-II, M. et al. A new definition of voltage sag duration considering the voltage tolerance curve. In: POWER TECHNOLOGY CONFERENCE, 2003, Bologna, Italy. **Proceedings...** New York: IEEE, 2003, v. 3. ISSN: 0-7803-7967-5.

STUART, A. M. **Dynamical System and Numerical Analysis**. Cambridge: Cambridge University, 1996. ISBN: 0521496721.

STANKOVIĆ, A.; SANDERS, S. R.; AYDIN, T. Dynamic phasors in modeling and analysis of unbalanced polyphase AC machines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 17, n. 1, p. 107-113, mar. 2002. ISSN: 0885-8969(02)01503-6.

TOLIYAT, H. A.; LEVI, E.; RAINA, M. A review of RFO induction motor parameter estimation techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 18, n. 2, p.271-283, june 2003. ISSN: 0885-8969/03.

VAS, P. **Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines**. Oxford: Clarendon Press, 1993. ISBN 0-19-859375-9.

WANG, Y. Analysis of effects of three phase voltage unbalance on induction motor with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. New York, v. 16, n. 3, p. 270-275, sept. 2001. ISSN: S 0885-88969(01)07342-9.

YALÇINKAYA, G.; BOLLEN, M. H.; CROSSLEY, P. A. Characterization of voltage sags in industrial distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**. New York, v. 34, n. 4, p. 682-688, july/aug. 1998. ISSN: S 0093-9994(98)04909-3.

ZHANG, L.; BOLLEN, M. A method for characterization of three phase unbalanced dip from recorded voltage wave shapes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE TELECOMMUNICATIONS ENERGY, 21., 1999, Copenhagen, Denmark. **Proceedings...** New York: INTELEC, 1999, v. 3. ISSN: 0-7803-5624-1.

ZHANG, L.; BOLLEN, M. Characteristic of voltage dips (sags) in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New York, v. 15, n.2, apr. 2000. ISSN: S 0885-8977(00)03512-3.

ANEXO A: MODELAGEM DO MOTOR ASSÍNCRONO

### Tensões e correntes no sistema trifásico ao sistema $dq0$

$v_{qs} = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs}$ $v_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{cs} - v_{bs})$ $v_{0s} = \frac{1}{3}(v_{as} + v_{bs} + v_{cs})$ $i_{as} = i_{qs} + i_{0s}$ $i_{bs} = -\frac{1}{2}i_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + i_{0s}$ $i_{cs} = -\frac{1}{2}i_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + i_{0s}$	$v_{qr} = \frac{2}{3}v'_{ar} - \frac{1}{3}v'_{br} - \frac{1}{3}v'_{cr}$ $v'_{dr} = \frac{1}{\sqrt{3}}(v'_{cr} - v'_{br})$ $v'_{0r} = \frac{1}{3}(v'_{ar} + v'_{br} + v'_{cr})$ $i'_{ar} = i'_{qr} + i'_{0r}$ $i'_{br} = -\frac{1}{2}i'_{qr} - \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr} + i'_{0r}$ $i'_{cr} = -\frac{1}{2}i'_{qr} + \frac{\sqrt{3}}{2}i'_{dr} + i'_{0r}$
---	--

### Bloco do fluxo concatenado nas coordenadas $dq0$

$\psi_{qs} = w_b \int \left\{ v_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) \right\} dt$ $\psi_{ds} = w_b \int \left\{ v_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) \right\} dt$ $\psi_{mq} = x_{mq} (i_{qs} + i'_{qr})$ $\psi_{mq} = x_M \left( \frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right)$	$\psi'_{qr} = w_b \int \left\{ v'_{qr} + \frac{w_r}{w_b} \psi'_{dr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr}) \right\} dt$ $\psi'_{dr} = w_b \int \left\{ v'_{dr} - \frac{w_r}{w_b} \psi'_{qr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{dr}) \right\} dt$ $\psi'_{md} = x_{mq} (i_{ds} + i'_{dr})$ $\psi_{md} = x_M \left( \frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right)$
--	---

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}}$$

### Bloco da corrente

$i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}}$ $i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{x_{ls}}$	$i'_{qr} = \frac{\psi'_{qr} - \psi_{mq}}{x'_{lr}}$ $i'_{dr} = \frac{\psi'_{dr} - \psi_{md}}{x'_{lr}}$
---	---

### Conjugado - velocidade

$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2w_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$ $\frac{2Jw_b}{P} \frac{d(w_r / w_b)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp}$
--

ANEXO B: CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PELA TEORIA  
DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

## 1. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Um afundamento de tensão é normalmente caracterizado por uma magnitude e duração. Na realidade um afundamento pode ser mais complexo que esta caracterização. Primeiro detrás de um afundamento há um deslocamento no ângulo de fase que não é incluído na caracterização normal. Segundo, considerando só a magnitude e a duração assume-se que o tipo de afundamento é simétrico, sendo que muitos afundamentos são assimétricos devido às falhas fase-fase ou fase-terra, mais comuns no sistema.

Para a análise de afundamentos de tensão assimétricos é utilizada a teoria de componentes simétricas; um método de componentes simétricas de dois componentes foi proposta em (ANDERSON, 1995), que simplifica os cálculos ao reduzir o número de componentes. Este método considera as impedâncias de seqüência positiva e negativa equivalentes. As tensões trifásicas complexas em um sistema desbalanceado podem ser completamente descritas através de três componentes de tensão: de seqüência positiva, negativa e zero, que são calculadas das tensões de fase complexa.

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} \quad (\text{B. 1})$$

Sendo,  $a = -0,5 + j0,866$  e  $a^2 = -0,5 - j0,866$ . Os subscritos 1, 2 e 0, referem-se às tensões de seqüências positiva, negativa e zero respectivamente. Conhecendo as tensões de seqüência em variáveis complexas, as tensões nas três fases podem ser calculadas por:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}j\sqrt{3} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2}j\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 + \vec{V}_2 \\ \vec{V}_1 - \vec{V}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{B. 2})$$

Desde que a máquina assíncrona é conectada em delta ou estrela sem conexão do neutro, a corrente de seqüência zero não existe. As tensões de linha podem ser obtidas das tensões de seqüência positiva e negativa, por:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{B. 3})$$

Estas relações são utilizadas para obter a magnitude característica e o argumento do afundamento de tensão. A análise de componentes simétricas foi baseada na suposição que as impedâncias de seqüência positiva e negativa são equivalentes. Esta suposição é real para circuitos estáticos, tais como linhas de transmissão e transformadores. Mas, não para cargas dinâmicas como motores de indução ou síncronos. Entretanto, desde que a influência de máquinas rotativas sobre a impedância da fonte não seja considerável, a impedância de seqüência positiva e negativa poderá assumir-se equivalente. A classificação dos afundamentos de tensão dada na tabela (7.1) foi convertida através da teoria de componentes simétricas em tensões de seqüência positiva, negativa e zero, tabela (B.1).

**Tabela B. 1 Classificação dos afundamentos de tensão segundo as componentes simétricas**

Tipo	S. positiva	S. negativa	S. zero
A	$V_{1,A} = hV$	$V_{2,A} = 0$	$V_{0,A} = 0$
B	$V_{1,B} = \frac{2+h}{3}V$	$V_{2,B} = -\frac{1-h}{3}V$	$V_{0,B} = -\frac{1-h}{3}V$
C	$V_{1,C} = \frac{1+h}{2}V$	$V_{2,C} = \frac{1-h}{2}V$	$V_{0,C} = 0$
D	$V_{1,D} = \frac{1+h}{2}V$	$V_{2,D} = -\frac{1-h}{2}V$	$V_{0,D} = 0$
E	$V_{1,E} = \frac{1+2h}{3}V$	$V_{2,E} = \frac{1-h}{3}V$	$V_{0,E} = \frac{1-h}{3}V$
F	$V_{1,F} = \frac{1+2h}{3}V$	$V_{2,F} = -\frac{1-h}{3}V$	$V_{0,F} = 0$
G	$V_{1,G} = \frac{1+2h}{3}V$	$V_{2,G} = \frac{1-h}{3}V$	$V_{0,G} = 0$



Observa-se desta tabela que, a máxima queda de tensão de seqüência positiva ocorre no afundamento tipo A e que a mínima queda de tensão terá lugar no afundamento tipo B. De outro lado, observa-se que os maiores valores da tensão de seqüência negativa se obtém nos afundamentos de tensão tipo C e D. Das simulações, observou-se à influência da tensão de seqüência negativa sobre o conjugado, sendo que, os maiores picos de conjugado como a magnitude do afundamento de tensão de seqüência negativa ocorreram nos afundamentos assimétricos, tipo C e D.

ANEXO C: DISTÂNCIA EUCLIDIANA

## 1. Distância Euclidiana

A matriz da distância Euclidiana em um espaço euclidiano é a distância  $d_{ij}$  entre diferentes pares de pontos de uma lista de  $N$  pontos  $\{x_l, l = 1 \dots N\}$ , a equação (C.1) fornece a distância Euclidiana entre dois vetores.

$$d_{ij} = \|x_i - x_j\| = (x_i - x_j)^T (x_i - x_j) = \|x_i\|^2 + \|x_j\|^2 - 2x_i^T x_j \quad (\text{C.1})$$

As filas e as colunas dentro de um espaço euclidiano são,  $i$  e  $j = 1 \dots N$ .

## 2. Propriedades da Distância Euclidiana

Para  $i, j = 1 \dots N$ , a distância Euclidiana entre os pontos  $x_i$  e  $x_j$  deve satisfazer os requerimentos impostos por algum espaço métrico.

1.  $\sqrt{d_{ij}} \geq 0 \Rightarrow \forall i, j$
2.  $\sqrt{d_{ii}} = 0 \Rightarrow \forall i$
3.  $\sqrt{d_{ij}} = \sqrt{d_{ji}} \Rightarrow \forall i, j$
4.  $\sqrt{d_{ij}} \leq \sqrt{d_{ik}} + \sqrt{d_{kj}} \Rightarrow \forall i, j, k$

Sendo  $\sqrt{d_{ij}}$  a distância Euclidiana in  $\mathbb{R}^n$ . Todas as entradas da matriz da distância Euclidiana devem concordar com estas propriedades. Especificamente, cada entrada não deve ser negativa, a diagonal principal deve ser zero, e a matriz da distância Euclidiana deve ser simétrica. As quatro propriedades fornecem os limites superiores e inferiores. A quarta propriedade é verdadeira quando não há restrições sobre os índices  $i, j, k$ , mas não fornecerá nenhuma informação nova.

## 3. Normalização da distância Euclidiana

Para comparar as grandezas da máquina assíncrona considerando os diferentes tipos de afundamentos de tensão, a distância Euclidiana foi normalizada para uma interpretação mais fácil dos valores numéricos. A normalização necessita de uma nova matriz de referência,

neste caso a matriz que contém os valores máximos das grandezas da máquina assíncrona frente a diferentes afundamentos de tensão, cada elemento desta matriz é o valor máximo para uma duração e magnitude dada  $X_{MAX}(i,j) = MAX_{i,j}$ .

A expressão da distância normalizada entre duas matrizes  $X_{ij}$  e  $Y_{ij}$ , e expressa em porcentagem é dada pela equação:

$$d(X_{ij}, Y_{ij}) = \frac{D(X_{ij}, Y_{ij})}{D_{MAX}} 100 = \frac{100}{D_{MAX}} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (X_{ij} - Y_{ij})^2} \quad (\text{C. 2})$$

Sendo  $D_{MAX} = d(MAX_{i,j}, 0)$  a distância entre a matriz máxima e uma matriz nula.

## ANEXO D: PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO

## 1. Parâmetros do motor de indução

Os parâmetros dos motores de indução utilizados neste trabalho são dados na tabela (D.1). Os parâmetros são expressos em ohms usando o valor da frequência elétrica do sistema. Na tabela (D.1) os valores da tensão são de fase linha e  $J$  inclui a inércia da carga.

**Tabela D. 1 Parâmetros do motor de indução**

Potência HP	Tensão volts	Velocidade rpm	$I_{rms}$ Amps	$R_s$ ohms	$X_{ls}$ ohms	$X_M$ ohms	$X'_{lr}$ ohms	$R_r$ ohms	$J$ kg.m <sup>2</sup>	$s$
1	380	1720	1,66	6,50	10,09	117,98	10,09	7,31	0,0087	0,044
2,5	220	1690	8,00	2,15	3,45	95,70	3,45	3,32	0,0220	0,061
3	220	1710	7,34	0,43	0,75	26,13	0,754	0,81	0,0890	0,049
20	220	1748	46,06	0,10	0,21	5,83	0,21	0,07	2,800	0,028
482,57	10 000	1493	241,3	0,17	3,36	85,45	2,06	0,12	960	0,0047
817,69	3 300	742	148	0,18	1,47	27,99	1,47	0,23	800	0,0107

ANEXO E: CÓDIGO FONTE – MÉTODO NUMÉRICO TRADICIONAL E  
SIMPLIFICADO

## 1.- Método numérico tradicional (Runge Kutta quarta ordem)

Os métodos numéricos mais usuais para resolver equações diferenciais são o método Euler e o método Runge-Kutta. A implementação do algoritmo Runge Kutta será composta de três argumentos: *fname* é um vetor q contém o nome do file que calcula as equações diferenciais, *tspan* é uma matriz  $1 \times N$  do tempo e  $x_0$  o vetor de estado inicial. O Matlab contém um comando para calcular as soluções numéricas de equações diferenciais *ode45* (método Runge Kutta de quarta ordem).

%fcurrent – modelo da corrente vetorial complexa com referencial síncrono

function y = fcurrent(t,y)

Entradas:

t	variável independente
v	tensão de entrada
ls,lr,rs,...	parâmetros elétricos e mecânicos do motor
$\rho = 1 - (l_m^2)/(l_s \cdot l_r)$ ;	coeficiente de dispersão
$\omega_s = 120 \cdot \pi$	velocidade síncrona
s	escorregamento
P	número de pólos
B	coeficiente de amortecimento

Saídas

wr	velocidade elétrica do rotor
y	variável de estado contidas no m-file (corrente no estator e rotor)

$$w_r = \omega_s - \text{abs}(P/2 \cdot y(3))$$

$$a = -(1/\rho) \cdot (r_s/l_s + i \cdot (\omega_e - \omega^2 \cdot (1 - \rho)));$$

$$b = l_m / (l_s \cdot \rho) \cdot (r_r/l_r + i \cdot (\omega^2 - \omega_e));$$

$$c = l_m / (l_r \cdot \rho) \cdot (r_s/l_s + i \cdot (\omega_e - \omega^2));$$

$$d = -(1/\rho) \cdot (r_r/l_r + i \cdot (\omega^2 - \omega_e \cdot (1 - \rho)));$$

$$v_1 = 1 / (l_s \cdot \rho);$$

$$v_2 = -l_m / (\rho \cdot l_s \cdot l_r);$$



```

Te = 3/2*P/2*lm*imag(y(1)*conj(y(2)));
a = -(1/s)*(rs/lr+i*(ws-wr*(1-s)));
b = lm/(lr*s)*(rpr/lpr+i*(ws-wr));
c = lm/(lpr*s)*(rs/lr+i*(ws-wr));
d = -(1/s)*(rpr/lpr+i*(wr-ws*(1-s)));
md = -B/J;

```

```

y = [
    a b 0;...
    c d 0;...
    0 0 Te
]*y + [v1*vs;v2*vs;md/J]
clear

```

## 2. Método Simplificado

A solução geral da equação diferencial de estado é dada por  $\Rightarrow i(t) = i_p(t) + i_h(t)$ . A solução

particular é  $i_p(t) = -A^{-1} * B * \begin{bmatrix} v_{sq}(t-t_0) \\ i_{rq}(t-t_0) \end{bmatrix}$ , e a solução homogênea  $i_h(t) = e^{A(t-t_0)} * \begin{bmatrix} isq(t_0) \\ irq(t_0) \end{bmatrix}$ .

### Transitório elétrico

Entradas:

a,b,c,d Constantes

ld1, ld2 Autovalores

lm;lss;... Parâmetros elétricos do motor

dip Afundamento de tensão em p.u.

sn1,sn2 Escorregamento na queda e no restabelecimento de tensão

v1, v2 Constantes

wm Velocidade angular mecânica

zin1 Impedância total, (queda de tensão)

zin2 Impedância total, (restabelecimento da tensão)

z1	Impedância do circuito do rotor (queda de tensão)
z2	Impedância do circuito do rotor (restabelecimento da tensão)

### Saídas

ifs, ifr Corrente no estator e rotor

Te Conjugado eletromagnético

```

A = -B*[ rs+i*we*Iss 0+i*we*lm; 0+i*sn1*we*lm rpr+i*sn1*we*lrr ];
R1 = (1/(ld1-ld2))*[ld1-A(2,2) A(1,2);A(2,1) ld1-A(1,1)];
R2 = (I-R1);
vfs = (vag + a1*vbg + a1^2*vcg)*exp(-i*(wb*t0))/sqrt(3);;
ifs = vfs/zin1;
ifr = z1*ifs0;
    for t = (0:dte:cte)
        vag = (dip*Vm)*cos(we*t);
        vbg = (dip*Vm)*cos(we*t - 2*pi/3);
        vcg = (dip*Vm)*cos(we*t + 2*pi/3);
        vfs = (vag + a1*vbg + a1^2*vcg)*exp(-i*(wb*t))/sqrt(3);
        ifs = vfs/zin1;
        ifr = z1*ifs;
        % Corrente no estator e rotor num tempo (t)%
        x = [((R1*exp(ld1*(t-t0))+R2*exp(ld2*(t-t0)))
            *([ifs; ifr] + (inv(A)*B*[ vfs;ifr ]))) - (inv(A)*B*[vfs;ifr])];
    end

```

### Transitório mecânico

Entradas:

zth	Impedância Thevenim do circuito equivalente
rth	Resistência Thevenim
xth	Reatância Thevenim
Zdip	Impedância interna que vê a resistência Rr/s
sM	Escorregamento no qual se tem o conjugado máximo
Tem	Conjugado eletromagnético

Tl            Conjugado de carga  
tw            Tempo

### Saídas

wm            Velocidade mecânica

```
function dwdt = mecanico(tw,wm)
```

```
a = (2*rth*rpr)/(Zdip^2);
```

```
Vf = abs((2/3)*(vag + a1*vbg + a1^2*vcg));
```

```
vfm = dip*Vf;
```

```
vth = abs((j*xm/(rs + j*(xls + xm)))*vfm);
```

```
sn = (wbm-abs(wm))/wbm;
```

```
Tem = (3*P/(2*we))*(vth^2*rpr/sn)/((rth + rpr/sn)^2 + (xth + xplr)^2);
```

```
Tl = (K0 + K1*wm + K2*wm^2)
```

```
dwdt = 1/(J)*(Tem-Tl);
```