



IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS UTILIZANDO DADOS OPERACIONAIS

Luiz Henrique Frohlich Possatti

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013

IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS
UTILIZANDO DADOS OPERACIONAIS

Luiz Henrique Frohlich Possatti

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph. D.

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph. D.

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2013

Possatti, Luiz Henrique Frohlich

Identificação de Parâmetros de Máquinas Síncronas
Utilizando Dados Operacionais / Luiz Henrique Frohlich
Possatti – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XXIII, 167 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 137 - 143

1. Máquinas Síncronas. 2. Identificação de Parâmetros
3. Máxima Verossimilhança Recursiva. 4. Algoritmos
Genéticos. I. Taranto, Glauco Nery. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Elétrica. III. Título.

Trabalho dedicado a toda a minha família, por tudo o que ela sempre me proporcionou e por todo apoio que ela sempre deu em todos os momentos da minha vida.

“If I have seen further, that is because I stood on the shoulders of giants.”

Sir Isaac Newton

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Glauco Nery Taranto, por me propor este tema de trabalho, pelo empenho e apoio na orientação, pela confiança e afeição.

Aos Professores Antonio Carlos Ferreira e Amit Bhaya, pelos ensinamentos e incentivos transmitidos em inúmeras reuniões.

A todos os bons professores que tive contato durante este curso de pós-graduação. Eles foram muito importantes para o meu desenvolvimento acadêmico.

Especiais agradecimentos ao Engenheiro e Doutor José Mauro Teixeira Marinho, da Petrobras, pelas valiosas informações e ajudas concedidas com o programa Simulight e com os Algoritmos Genéticos.

Aos Engenheiros Guilherme Domingues de Cerqueira e Nilo José Pereira de Macedo, de Furnas, pelo apoio, incentivo, idéias propostas e disponibilização de informações imprescindíveis à realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Mario Antonio Rodrigues, da Eletrobras, pelo apoio e compreensão durante todo o período de estudos.

Ao professor Antônio Carlos Zambroni de Souza, grande amigo e professor no curso de graduação que sempre me incentivou a dar continuidade aos estudos.

Aos meus familiares, que mesmo longe sempre estiveram comigo dando total suporte para superação deste grande desafio na minha vida.

E, por fim, a Deus, por ter me dado saúde e perseverança, sem os quais eu não teria alcançado meus objetivos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS UTILIZANDO DADOS OPERACIONAIS

Luiz Henrique Frohlich Possatti

Fevereiro/2013

Orientador: Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma metodologia de identificação de parâmetros de máquinas síncronas através da utilização de dados de medições. Pressupõe-se que a estrutura do modelo matemático da máquina é conhecida e que os dados de medições são coletados com a máquina em operação conectada ao sistema elétrico. O processo de identificação é realizado através das medições de tensão e corrente de armadura, corrente de campo e velocidade angular durante perturbações no sistema de excitação da máquina. Os efeitos dos ruídos presente nos dados de medição, os quais são inevitáveis em aquisição de dados em tempo real, também são investigados.

A metodologia proposta, baseada nos métodos de Máxima Verossimilhança Recursiva e Algoritmos Genéticos, foi testada com resultados de simulação dinâmica e dados de medições coletados em campo, com a máquina em operação normal e conectada ao Sistema Interligado Nacional, para a identificação dos parâmetros de um hidrogerador de 184 MVA da UHE Luiz Carlos Barreto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

IDENTIFICATION OF SYNCHRONOUS MACHINE PARAMETERS USING OPERATING DATA

Luiz Henrique Frohlich Possatti

February/2013

Advisor: Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

This dissertation presents a methodology to estimate synchronous machine parameters using operating data. It is assumed that the machine models structure is known and the measurement data are collected during normal operation of the machine connected to the electrical system. The data used in the identification process consist of measurements of estator voltages and current, field current and machine speed collected during different levels of excitation disturbances. The effects of measurement noise corruption, which is inevitable in real time data acquisition, are also investigated.

The methodology proposed, based on the Recursive Maximum Likelihood Method and Genetic Algorithms, has been validated using simulated and real data to estimate the model parameters of a 184 MVA salient pole machine at UHE Luiz Carlos Barreto electric generating plant.

Índice

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÕES	2
1.2. OBJETIVO	3
1.3. CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	3
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.5. PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 2	7
MODELO ADOTADO PARA A MÁQUINA SÍNCRONA	7
2.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA.....	7
2.2. PARÂMETROS A SEREM IDENTIFICADOS	20
CAPÍTULO 3	23
MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COMENTADA	23
3.1. AS ETAPAS DO PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	23
3.2. IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS	26
3.3. MÉTODOS DE ENSAIOS <i>OFFLINE</i> PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	27
3.3.1 Ensaio no domínio do tempo.....	29
3.3.1.1 Ensaio em regime permanente	29
3.3.1.2 Ensaio transitório	31
3.3.2 Ensaio no domínio da frequência.....	35
3.3.2.1 Ensaio estático (SSFRT).....	36

3.3.2.2 Ensaio dinâmicos (OCFRT e OLFRT)	40
3.4. MÉTODOS <i>ONLINE</i> PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	41
3.4.1 Identificação a partir de uma estrutura de modelo conhecida	42
3.4.2 Modelagem tipo caixa preta.....	45
CAPÍTULO 4	46
METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO PROPOSTA	46
4.1. MÉTODO DA VEROSSIMILHANÇA MÁXIMA RECURSIVA (VMR).....	46
4.1.1 Estimação dos parâmetros da armadura pelo método VMR	49
4.2. ALGORITMOS GENÉTICOS (AG).....	50
4.2.1 Identificação dos parâmetros do circuito do rotor utilizando AG	51
4.2.2 Definição da função adequabilidade.....	55
4.2.3 Características do AG utilizado	56
4.3 METODOLOGIA PROPOSTA COM GERADOR SUBEXCITADO (NÃO SATURADO)	57
4.4. METODOLOGIA PROPOSTA COM GERADOR SATURADO	58
CAPÍTULO 5	60
RESULTADOS	60
5.1. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZANDO DADOS DE SIMULAÇÃO ELETROMECAÂNICA	60
5.1.1. Identificação dos parâmetros da armadura do gerador do sistema Máquina x Barra Infinita.....	61
5.1.2. Identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto.....	72
5.1.2.1 Identificação através de simulações eletromecânicas realizadas no Anatem.....	73
5.1.2.2 Validação Anatem x Simulight.....	80
5.1.2.3 Identificação através de simulações eletromecânicas realizadas no Simulight	84

5.1.3. Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC	99
5.1.4. Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto	109
5.2. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZANDO DADOS DE MEDIÇÃO.....	117
5.2.1 Desempenho do AG perante ruídos acrescidos aos dados de medições..	120
5.2.2. Identificação dos parâmetros de rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto	124
5.2.3. Identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto	128
CAPÍTULO 6.....	133
CONCLUSÃO.....	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
ANEXO A.....	144
ALGORITMOS GENÉTICOS	144
A.1. INTRODUÇÃO	144
A.2. TERMINOLOGIA EMPREGADA	147
A.3. REPRESENTAÇÃO CROMOSSÔMICA	148
A.4. INICIALIZAÇÃO.....	149
A.5. AVALIAÇÃO E ADEQUABILIDADE.....	150
A.6. OPERADORES GENÉTICOS E DE EVOLUÇÃO	151
A.6.1. Operador de evolução	151
A.6.1.1 Método da roleta	152
A.6.1.2 Método do torneio.....	153
A.6.1.3 Outros métodos de seleção	154
A.6.2. Operadores genéticos	155
A.6.2.1. Operador genético de cruzamento (crossover)	155

A.6.2.2. Operador genético de mutação	158
A.7. TRANSIÇÃO ENTRE POPULAÇÕES	159
A.8 CONDIÇÕES DE TÉRMINO	159
A.9. VARIAÇÕES DE AG.....	160
A.9.1. Escalonamento linear da função adequabilidade	160
A.9.2 Estratégia elitista.....	162
ANEXO B.....	163
MALHAS DE CONTROLE DO SISTEMA UHE LUIZ CARLOS BARRETO ..	163
ANEXO C.....	166
MODELO DE CURVA DE SATURAÇÃO DOS GERADORES DA UHE LUIZ CARLOS BARRETO.....	166

Lista de Figuras

Figura 1: Circuitos equivalentes de eixo direto (d) e em quadratura (q).....	9
Figura 2: Diagrama operacional da máquina síncrona	12
Figura 3: Constante de tempo de circuito aberto (eixo d)	13
Figura 4: Constantes de tempo de curto-circuito (eixo d)	14
Figura 5: Constantes de tempo de tempo de circuito aberto e curto-circuito (eixo q) ...	15
Figura 6: Indutâncias transitória e subtransitória de eixo direto vistas pelo estator.....	19
Figura 7: Indutância subtransitória de eixo em quadratura vista do estator	20
Figura 8: Fluxograma do processo de identificação de sistemas.....	25
Figura 9: Subclassificações dos métodos de ensaio off-line para determinação de parâmetros de máquinas síncronas	28
Figura 10: Procedimento padrão de estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos pelo método OEM (“Output Estimation Error”)	44
Figura 11: Malhas de controle de tensão e velocidade.....	49
Figura 12: Interação do AG com aplicações	52
Figura 13: Diagrama esquemático do processo de identificação, em que:.....	54
Figura 14: Metodologia proposta com gerador subexcitado	58
Figura 15: Metodologia proposta com gerador saturado.....	59
Figura 16: Sistema máquina x barra infinita construído no Matlab/Simulink	62
Figura 17: Resposta de i_d , i_q , v_d e v_q ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita.	63
Figura 18: Resposta de i_{fd} e ω_m ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita	64
Figura 19: Resposta de i_d , i_q , v_d e v_q ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita com ruído de 50 dB de SNR.	65

Figura 20: Resposta de i_{fd} e ω_m ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita com ruído de 50 dB de SNR.	65
Figura 21: Identificação de R_a do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.....	67
Figura 22: Identificação de L_{ad} do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.....	67
Figura 23: Identificação de L_q do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.....	68
Figura 24: Identificação de L_d do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.....	68
Figura 25: Identificação de R_a do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB considerando os dados do período transitório.....	70
Figura 26: Identificação de L_{ad} do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB considerando os dados do período transitório.....	70
Figura 27: Identificação de L_q do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB considerando os dados do período transitório.....	71
Figura 28: Identificação de L_d do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB e considerando os dados do período transitório.....	71
Figura 29: Diagrama unifilar do sistema UHE Luiz Carlos Barreto.	72
Figura 30: Resposta de v_d (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.	74

Figura 31: Resposta de v_q (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.	75
Figura 32: Resposta de i_d (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.	75
Figura 33: Resposta de i_q (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.	76
Figura 34: Resposta de i_{fd} (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.	76
Figura 35: Resposta da frequência (Hz) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.	77
Figura 36: Identificação de R_a do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem.	78
Figura 37: Identificação de L_{ad} do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem.	79
Figura 38: Identificação de L_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem.	79
Figura 39: Identificação de L_d do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem.	80
Figura 40: Corrente de armadura do Gerador #01 – Simulight x Anatem.	81
Figura 41: Tensão de armadura do Gerador #01 – Simulight x Anatem.	82
Figura 42: Tensão de campo do Gerador #01 – Simulight x Anatem.	82
Figura 43: Corrente de campo do Gerador #01 - Simulight x Anatem.	83
Figura 44: Frequência do Gerador #01 – Simulight x Anatem.	83
Figura 45: Módulo e fase das tensões e correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight	85
Figura 46: Corrente de campo e frequência do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight.	86

Figura 47: Tensões e correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto calculadas no referencial do rotor durante simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight.....	88
Figura 48: Identificação de R_a do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight..	90
Figura 49: Identificação de L_{ad} do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight	90
Figura 50: Identificação de L_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight..	91
Figura 51: Identificação de L_d do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight..	91
Figura 52: Módulo das tensões de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.....	93
Figura 53: Ângulo de fase das tensões de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.....	93
Figura 54: Módulo das correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante Simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.....	94
Figura 55: Ângulo de fase das correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight	94
Figura 56: Corrente de campo e frequência elétrica do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.....	95
Figura 57: Sinais calculados de v_d , v_q , i_d e i_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.....	95
Figura 58: Identificação de R_a do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.	97
Figura 59: Identificação de L_{ad} do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.	97

Figura 60: Identificação de L_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.	98
Figura 61: Identificação de L_d do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.	98
Figura 62: Diagrama unifilar do sistema WSCC.....	99
Figura 63: X'_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.....	103
Figura 64: X''_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.....	103
Figura 65: T'_{do} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.....	104
Figura 66: T''_{do} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.....	104
Figura 67: T''_{qo} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.....	105
Figura 68: Resíduo associado ao melhor indivíduo de cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.	105
Figura 69: Comparação das respostas de I_+ do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC ...	107
Figura 70: Comparação das respostas de V_+ do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC ...	107
Figura 71: Comparação das respostas de I_{fd} do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC ...	108
Figura 72: Comparação das respostas de ω do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC ...	108
Figura 73: X'_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação	111

Figura 74: X''_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação	112
Figura 75: T'_{do} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação	112
Figura 76: T''_{do} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação	113
Figura 77: T'''_{qo} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação	113
Figura 78: Resíduo associado ao melhor indivíduo de cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação	114
Figura 79: Comparação das respostas de I_+ ao curto circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto.	115
Figura 80: Comparação das respostas de V_+ ao curto circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto.	115
Figura 81: Comparação das respostas de I_{fd} ao curto circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto.	116
Figura 82: Comparação das respostas de ω ao curto circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto	116
Figura 83: Diagrama unifilar do sistema reduzido da UHE Luiz Carlos Barreto	117
Figura 84: Sinal de medição da tensão de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto.....	118
Figura 85: Sinal de medição da corrente de campo do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto	118
Figura 86: Sinal de medição da corrente de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto.....	119
Figura 87: Comparação entre o sinal de referência da corrente de armadura com ruído (azul) e o sinal obtido com o modelo identificado (vermelho).....	122
Figura 88: Comparação entre o sinal de referência da corrente de campo com ruído (azul) e o sinal obtido com o modelo identificado (vermelho).....	123

Figura 89: Comparação entre o sinal de referência da tensão de armadura com ruído (azul) e o sinal obtido com o modelo identificado (vermelho).....	123
Figura 90: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de armadura - Identificação parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição..	127
Figura 91: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de campo - Identificação parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.....	127
Figura 92: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da tensão de armadura - Identificação parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.....	128
Figura 93: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de armadura - Identificação parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.....	130
Figura 94: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de campo - Identificação parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.....	131
Figura 95: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da tensão de armadura - Identificação parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.....	131
Figura 96: Possível refinamento da metodologia proposta	136
Figura 97: Dois exemplos de cromossomos	148
Figura 98: Método da roleta	153
Figura 99: Cruzamento de 1 ponto	156
Figura 100: Cruzamento de dois pontos	157
Figura 101: Cruzamento uniforme	157
Figura 102: Mutação.....	158

Figura 103: Processo de transição entre populações	159
Figura 104: Estrutura do escalonamento linear	161
Figura 105: Modelo de regulador de tensão representado no Simulight.....	164
Figura 106: Modelo de regulador de velocidade representado no Simulight.....	164
Figura 107: Modelo de estabilizador de sistema de potência representado no Simulight	165
Figura 108: Modelo de saturação Tipo 02 do Anatem	166
Figura 109: Diagrama de blocos de eixo direto do modelo de máquina síncrona.....	167

Lista de Tabelas

Tabela 1: Equações de tensão e enlace de fluxo do modelo de máquina síncrona	8
Tabela 2: Parâmetros derivados de uma máquina síncrona.....	21
Tabela 3: Parâmetros obtidos através de ensaios em regime permanente.....	31
Tabela 4: Parâmetros obtidos através de ensaios em regime transitório	35
Tabela 5: Regras utilizadas para validação dos indivíduos	57
Tabela 6: Dados do gerador síncrono de polos salientes do sistema máquina x barra infinita.....	62
Tabela 7: Fluxo de potência e inicialização do gerador do sistema máquina x barra infinita.....	62
Tabela 8: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do gerador do sistema máquina x barra infinita a partir de simulação dinâmica desconsiderando os dados de regime transitório.....	66
Tabela 9: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do gerador do sistema máquina x barra infinita a partir de simulação dinâmica considerando os dados de regime transitório.....	69
Tabela 10: Dados do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto.	73
Tabela 11: Condição operativa do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto antes e após o período transitório na simulação pelo Anatem.....	74
Tabela 12: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação dinâmica realizada no Anatem	77
Tabela 13: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação de sequência positiva realizada no Simulight	84

Tabela 14: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight	89
Tabela 15: Condição operativa do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto antes e após o período transitório durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight	92
Tabela 16: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight	96
Tabela 17: Dados dos geradores do sistema WSCC.....	100
Tabela 18: Ponto de operação do sistema WSCC na condição pré-distúrbio.	100
Tabela 19: Parâmetros de controle do AG utilizados na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.....	101
Tabela 20: Evento aplicado na simulação eletromecânica para identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.	101
Tabela 21: Espaço de busca do AG utilizado na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.....	102
Tabela 22: Parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC identificados pelo AG	106
Tabela 23: Ponto de operação do sistema UHE Luiz Carlos Barreto na condição pré-distúrbio durante identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 através de dados de simulação.	109
Tabela 24: Parâmetros de controle do AG utilizados na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados de simulação. ...	110
Tabela 25: Espaço de busca do AG utilizado na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados de simulação.....	110
Tabela 26: Resultado da identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados de simulação	114
Tabela 27: Ponto de operação do sistema reduzido da UHE Luiz Carlos Barreto na condição pré-distúrbio	117

Tabela 28: Parâmetros de controle do AG utilizados durante identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de simulação corrompidos com ruídos	121
Tabela 29: Resultado da identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de simulação corrompidos com ruídos.....	122
Tabela 30: Parâmetros do controle do AG durante a identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição	125
Tabela 31: Resultado da identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição e comparação com os parâmetros fornecidos por Furnas	125
Tabela 32: Parâmetros de controle do AG utilizados na identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição.....	129
Tabela 33: Espaço de busca do AG utilizado na identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição.....	129
Tabela 34: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição.....	130
Tabela 35: Parâmetros da curva de saturação fornecidos por Furnas.....	166

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de modelos corretos dos componentes do sistema elétrico é de fundamental importância para realização de estudos de simulação exigidos nas etapas de planejamento da expansão, planejamento da operação e controle em tempo real dos sistemas elétricos de potência.

Estudos de simulação do desempenho do sistema brasileiro, quando confrontados com resultados monitorados durante distúrbios ou no ajuste de dispositivos de controle e proteção, eventualmente apresentam algumas discrepâncias, evidenciando possíveis erros de modelagem nos componentes do mesmo. Estes erros decorrem da estrutura do modelo matemático utilizado, da imprecisão dos parâmetros fornecidos pelos fabricantes como também pela alteração nos parâmetros devido ao processo de envelhecimento dos equipamentos, aquecimento, alterações nos equipamentos não registradas devidamente, etc.

Um dos componentes do sistema elétrico de modelagem mais complexa são as máquinas síncronas e seus sistemas de controle e proteção associados. As dificuldades de modelagem decorrem da complexidade do sistema físico, envolvendo componentes mecânicos e eletromagnéticos, sistemas de excitação e reguladores, não-linearidades decorrente da saturação magnética, etc. A correta modelagem das máquinas síncronas, por outro lado, é de fundamental importância particularmente em estudos de dinâmica para avaliação da estabilidade angular e de tensão dos sistemas elétricos de potência.

Um modelo completo de máquina síncrona consiste na combinação entre uma estrutura de modelo e um conjunto de parâmetros. Desta maneira, por exemplo, a mesma estrutura de modelo em combinação com conjuntos de parâmetros obtidos por diferentes metodologias de testes e em diferentes condições operativas da máquina podem resultar em modelos com desempenhos consideravelmente diferentes. Isso se deve ao fato de que as máquinas síncronas são inerentemente complexas e as estruturas

de modelos convencionais são relativamente simples (parâmetros concentrados, baixa ordem, lineares e com ajustes feitos para aproximar os efeitos das não-linearidades).

A forma básica ou configuração de um modelo constitui a sua estrutura, a qual é composta de parâmetros cujos valores inicialmente não são conhecidos. A estrutura do modelo é caracterizada pela sua forma (por exemplo: circuitos equivalentes de parâmetros concentrados, funções de transferência, representação por equações diferenciais, etc.) e pela sua ordem (número de circuitos representando o rotor). Os valores dos parâmetros são derivados das características do comportamento da máquina. Essas características podem assumir diferentes formas, como, por exemplo, dados de medições provenientes de testes realizados no equipamento ou dados analíticos obtidos de estudos de simulação dos fenômenos eletromagnéticos que acontecem dentro da máquina (análise realizada com a técnica de elementos finitos).

1.1. MOTIVAÇÕES

São inúmeros os testes que podem ser realizados para fornecer dados de medições a serem utilizados na identificação dos parâmetros da máquina. Os mais tradicionais encontram-se padronizados na referência [1] e são realizados com a máquina desconectada do sistema elétrico, sendo comumente conhecidos como testes *offline*. Embora estes testes sejam bastante utilizados na prática, eles apresentam como principal desvantagem a necessidade de desconexão da máquina ao sistema elétrico, o que pode ser impraticável em algumas situações. Além disso, os valores dos parâmetros da máquina tendem a desviar significativamente daqueles identificados através de testes *offline*, sendo essa diferença de valores normalmente causada pela saturação magnética, envelhecimento da máquina, temperatura interna, esforços rotacionais e defeitos incipientes.

Para superar as deficiências dos métodos tradicionais, os métodos de identificação baseados em dados operacionais, ou seja, dados de medição obtidos durante a operação normal da máquina conectada ao sistema elétrico, tem ganhado atenção nos últimos anos, sendo assunto de diversos trabalhos publicados. Esses métodos, comumente conhecidos como métodos *online*, são bastante atrativos uma vez

que a identificação dos parâmetros é realizada através do processamento dos dados de medição obtidos durante a operação normal da máquina.

1.2. OBJETIVO

Resumidamente, o processo de identificação de parâmetros de máquinas síncronas pode ser dividido em duas etapas, sendo elas: a definição da estrutura do modelo e a identificação dos valores dos parâmetros associados.

O objetivo deste trabalho concentra-se na elaboração de uma metodologia para identificação dos parâmetros de uma estrutura de modelo de máquina predeterminada através da utilização de dados operacionais. A finalidade do modelo identificado é utilização dele em estudos de estabilidade eletromecânica.

1.3. CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Nesta dissertação é proposta uma metodologia de identificação de parâmetros de máquinas síncronas através da utilização de dados de medições realizadas com a máquina em operação conectada ao sistema elétrico, o que equivale a dizer que as malhas de controle de tensão e velocidade estão fechadas. Os distúrbios utilizados para excitar as dinâmicas da máquina são, principalmente, mudanças de pequena amplitude no valor da tensão de referência da malha de controle de tensão, os quais são fáceis de serem realizados na prática e não comprometem a operação estável do sistema e a integridade dos equipamentos.

A metodologia desenvolvida baseia-se na utilização do método da Verossimilhança Máxima Recursiva (VMR) e de Algoritmos Genéticos (AG) e pode ser utilizada na forma de dois esquemas de identificação distintos, dependendo da condição operativa da máquina quando da realização dos testes de aquisição de dados. Para o caso em que a máquina encontra-se na região linear da curva de saturação, é utilizado um esquema híbrido em que o método VMR é aplicado para identificação dos parâmetros dos circuitos da armadura e o AG é utilizado na identificação dos

parâmetros dos circuitos do rotor. Por outro lado, quando a máquina está operando na região não linear da curva de saturação, o AG é utilizado para identificação dos parâmetros da armadura e do rotor.

Inicialmente o esquema híbrido de identificação foi testado com a utilização de dados provenientes de simulações eletromecânicas realizadas em três sistemas distintos, sendo eles: um sistema Máquina x Barra Infinita, elaborado no ambiente Matlab/Simulink, o sistema WSCC [2] e um sistema equivalente da UHE Luiz Carlos Barreto (usina de propriedade de Furnas). Posteriormente, foi realizado o estudo de um caso prático em que foram utilizados dados de medições, fornecidos por Furnas, coletados em campo em um dos geradores da UHE Luiz Carlos Barreto. Neste caso, o AG foi utilizado para identificação de todos os parâmetros do gerador.

Cabe ressaltar que embora todos os estudos realizados tenham sido destinados à identificação de parâmetros de máquinas de pólos salientes, a metodologia proposta pode ser perfeitamente aplicável à identificação de parâmetros de turbogeradores, sendo necessárias, para isso, apenas a escolha apropriada da estrutura do modelo de máquina e a modificação do vetor de parâmetros a serem identificados pela metodologia proposta.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida nos seguintes capítulos:

CAPÍTULO 2 – MODELO ADOTADO PARA A MÁQUINA SÍNCRONA. Neste capítulo é apresentada a estrutura de modelo de máquina síncrona utilizada, suas características e como são derivados os parâmetros utilizados no processo de identificação.

CAPÍTULO 3 – IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. Neste capítulo são descritas as etapas de um processo de identificação de sistemas. É feita uma introdução ao problema da identificação de parâmetros de máquinas síncronas e são apresentados os principais

métodos *offline* e *online* de identificação. Ainda, são discutidos os principais artigos sobre identificação *online* de parâmetros de máquinas síncronas, estudados durante a realização deste trabalho.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO PROPOSTA. Neste capítulo é descrito como o método da Verossimilhança Máxima Recursiva (VMR) e os Algoritmos Genéticos (AG) foram utilizados no problema da identificação de parâmetros de máquinas síncronas e são apresentados os esquemas de identificação propostos.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS. Neste capítulo são descritos os resultados da aplicação do método VMR para identificação dos parâmetros da armadura e da aplicação do AG para identificação dos parâmetros do rotor através de dados provenientes de simulações eletromecânicas. É apresentado o resultado do estudo prático em que a metodologia proposta foi utilizada para identificação dos parâmetros de um dos geradores do sistema UHE Luiz Carlos Barreto através de dados de medição coletados em campo.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS. Neste capítulo são descritas as conclusões relativas à aplicação do método VMR e do AG ao problema de identificação de parâmetros de máquinas síncronas através da utilização de dados de simulação e de dados de medição. Como sugestão para trabalhos futuros, é apresentada uma possibilidade de refinamento da metodologia de identificação e são propostas novas possibilidades de estudos práticos.

1.5. PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

As seguintes publicações foram frutos deste trabalho:

1. G. N. Taranto, A. Bhaya, A. C. Ferreira, L. H. F. Possatti, J. M. T. Marinho, F. Pazos, G. D. Cerqueira, N. J. P. Macedo – “Identificação de Parâmetros de Geradores Síncronos Utilizando Dados Operacionais”, *Anais do XII SEPOPE*, Rio de Janeiro, RJ, Maio 2012.

2. G. N. Taranto, A. Bhaya, A. C. Ferreira, L. H. F. Possatti, J. M. T. Marinho, F. Pazos, G. D. Cerqueira– “Identificação de Parâmetros de Geradores Utilizando Dados Operacionais”, *Artigo técnico referente ao projeto P&D ANEEL “Identificação de Parâmetros de Geradores Utilizando Dados Operacionais”*, Março 2012.

CAPÍTULO 2

MODELO ADOTADO PARA A MÁQUINA SÍNCRONA

Neste capítulo será introduzido o modelo de máquina síncrona adotado neste trabalho. Os parâmetros derivados, os quais são utilizados no processo de identificação, serão definidos em função dos parâmetros primitivos do modelo. Finalmente, serão apresentados os parâmetros necessários a serem identificados de forma a especificar completamente as características elétricas de uma máquina síncrona de pólos salientes.

2.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA

O modelo de máquina síncrona utilizado foi o Modelo 2.1 do IEEE para estudos de estabilidade de sistemas de potência [3]. Trata-se de um modelo de segunda ordem adequado para representação de geradores síncronos de pólos salientes e rotor laminado construídos com barras amortecedoras localizadas nas faces dos pólos. Estas barras amortecedoras normalmente são conectadas de forma a criar um circuito de amortecimento no formato de uma gaiola de esquilo que é efetivo tanto no eixo direto quanto no eixo em quadratura. Desta forma, o rotor será representado por três enrolamentos, sendo eles: enrolamento de campo (F), enrolamento amortecedor de eixo direto (D) e o enrolamento amortecedor de eixo em quadratura (Q). O estator é representado pelo enrolamento de eixo direto (d) e pelo enrolamento de eixo em quadratura (q).

De forma a facilitar as discussões ao longo do desenvolvimento desta dissertação, neste capítulo será brevemente apresentado o desenvolvimento do modelo utilizado de máquina síncrona identificando as relações entre os parâmetros operacionais e os parâmetros primitivos. O desenvolvimento será feito a partir do modelo nas variáveis de Park [4,5], representado em valores por unidade (pu), normalizado na base x_{ad} recíproca [6,7] e desprezando o acoplamento adicional entre os circuitos do rotor. Algumas referências clássicas para aspectos teóricos de modelagem e análise de máquinas e suas interconexões são [8] e [2]. Os detalhes das transformações d-q, representação em pu, circuitos equivalentes e análise em regime permanente e transitório são descritos nestas referências. A referência [9] apresenta a transformação de Park e detalha a derivação das equações da máquina síncrona referidas ao rotor. Anderson et al. [10] fornecem uma análise extensa de máquinas síncronas e das equações no eixo direto e no eixo em quadratura.

A partir das premissas apresentadas, as equações de tensão e enlace de fluxo dos circuitos do estator e rotor são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1: Equações de tensão e enlace de fluxo do modelo de máquina síncrona

Estator	Rotor
$v_d = -R_a \cdot i_d - \omega \cdot \lambda_q + \frac{d}{dt} \lambda_d$	$v_{fd} = R_{fd} \cdot i_{fd} + \frac{\partial \lambda_{fd}}{\partial t}$
$v_q = -R_a \cdot i_q + \omega \cdot \lambda_d + \frac{d}{dt} \lambda_q$	$0 = v_{1d} = R_{1d} \cdot i_{1d} + \frac{\partial \lambda_{1d}}{\partial t}$
-	$0 = v_{1q} = R_{1q} \cdot i_{1q} + \frac{\partial \lambda_{1q}}{\partial t}$
$\lambda_d = -(L_{ad} + L_l) \cdot i_d + L_{ad} \cdot i_{1d} + L_{ad} \cdot i_{fd}$	$\lambda_{fd} = -L_{ad} \cdot i_d + L_{ad} \cdot i_{1d} + (L_{fd} + L_{ad}) \cdot i_{fd}$
$\lambda_q = -(L_{aq} + L_l) \cdot i_q + L_{aq} \cdot i_{1q}$	$\lambda_{1d} = -L_{ad} \cdot i_d + (L_{ad} + L_{1d}) \cdot i_{1d} + L_{ad} \cdot i_{fd}$
-	$\lambda_{1q} = -L_{aq} \cdot i_q + (L_{aq} + L_{1q}) \cdot i_{1q}$

Este sistema de equações pode ser representado pelos circuitos equivalentes da Figura 1:

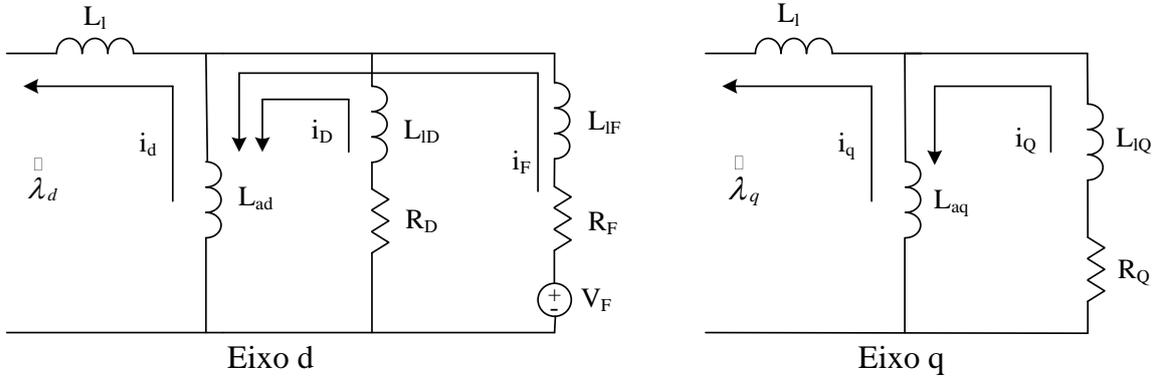


Figura 1: Circuitos equivalentes de eixo direto (d) e em quadratura (q)

As indutâncias e resistências dos circuitos equivalentes apresentados na Figura 1, denominados parâmetros primitivos da máquina síncrona, são descritos abaixo:

R_a : Resistência do enrolamento da armadura (pu).

L_{ad} : Indutância mútua de eixo direto entre a armadura e o rotor (pu).

L_{aq} : Indutância mútua de eixo em quadratura entre a armadura e o rotor (pu).

L_l : Indutância de dispersão (pu).

R_F : Resistência do enrolamento de campo (pu).

L_{lF} : Indutância de dispersão do enrolamento de campo (pu).

R_D : Resistência do enrolamento amortecedor do eixo direto (pu).

L_{lD} : Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo direto (pu).

R_Q : Resistência do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura (pu).

L_{lQ} : Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura (pu).

O procedimento, agora, consiste em aplicar o cálculo operacional, isto é, a Transformada de Laplace ao modelo de Park apresentado na Tabela 1. Adotando $A(s) = \zeta(a)$, e sabendo que o tempo está em pu – isto implica que as constantes de tempo aqui derivadas devem se divididas por ω_{base} para serem expressas em segundos – tem-se:

$$V_F = s\lambda_F(s) + r_F I_F \quad (1)$$

$$0 = s\lambda_D(s) + r_D I_D \quad (2)$$

$$0 = s\lambda_Q(s) + r_Q I_Q \quad (3)$$

$$\lambda_d(s) = -L_d I_d + L_{ad} I_F + L_{ad} I_D \quad (4)$$

$$\lambda_q(s) = -L_q I_q + L_{aq} I_Q \quad (5)$$

$$\lambda_F(s) = -L_{ad} I_d + L_F I_F + L_{ad} I_D \quad (6)$$

$$\lambda_D(s) = -L_{ad} I_d + L_{ad} I_F + L_D I_D \quad (7)$$

$$\lambda_Q(s) = -L_{aq} I_q + L_Q I_Q \quad (8)$$

sendo:

$$L_d = L_{ad} + L_l$$

$$L_q = L_{aq} + L_l$$

$$L_F = L_{ad} + L_{lF}$$

$$L_D = L_{ad} + L_{lD}$$

$$L_Q = L_{aq} + L_{lQ}$$

Combinando-se expressões, pode-se escrever:

- Eixo q:

$$\lambda_q = -G_3(s)I_q \quad (9)$$

sendo

$$G_3(s) = L_q - \frac{sL_{aq}^2}{r_Q + sL_Q}$$

- Eixo d:

$$\lambda_d(s) = G_1(s)V_F - G_2(s)I_d \quad (10)$$

sendo

$$G_1(s) = \frac{L_{ad}(r_D + sL_D) - sL_{ad}^2}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_F + sL_F)}$$

$$G_2(s) = \left(L_d - \frac{sL_{ad}^2(r_D + sL_D) - 2s^2L_{ad}^3 + sL_{ad}^2(r_F + sL_F)}{-s^2L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_F + sL_F)} \right)$$

Pode-se perceber que $G_1(s)$, $G_2(s)$ e $G_3(s)$ se apresentam como funções de transferência entre as excitações e os enlaces de fluxo, e as relações (9) e (10) podem ser representadas conforme o diagrama da Figura 2:

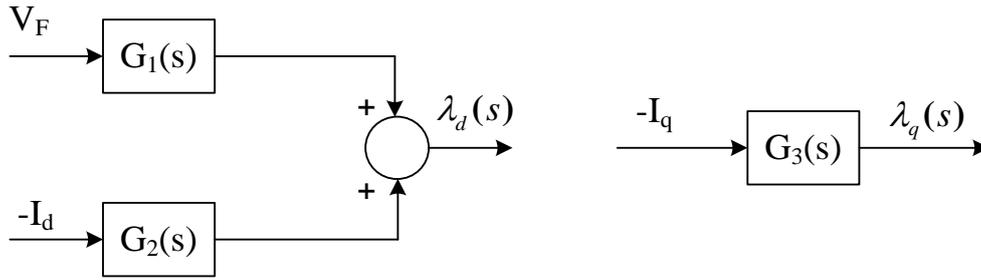


Figura 2: Diagrama operacional da máquina síncrona

$G_2(s)$ e $G_3(s)$ relacionam enlace de fluxo e corrente, sendo chamadas indutâncias operacionais e são anotadas na literatura por: $G_2(s) \rightarrow L_d(s)$ e $G_3(s) \rightarrow L_q(s)$.

O desenvolvimento dos parâmetros operacionais da máquina síncrona, com enrolamentos F, D e Q no rotor está terminado. Estes parâmetros estão em função dos parâmetros básicos da máquina. O que será feito a seguir é uma manipulação destes parâmetros operacionais de modo a se obter expressões para os parâmetros derivados, os quais são utilizados nos modelos de máquina síncrona para estudos de estabilidade eletromecânica. Iniciaremos o desenvolvimento com $G_1(s)$, o qual, através de manipulações algébricas, pode ser reescrito como:

$$G_1(s) = G_0 \frac{1 + sT_{kD}}{1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_3} \quad (11)$$

sendo

$$G_0 = \frac{L_{ad}}{r_F} \quad T_D = \frac{L_D}{r_D} \quad T_{kD} = \frac{L_{lD}}{r_D}$$

$$T_F = \frac{L_F}{r_F} \quad T_3 = \frac{1}{r_D} \left(L_{lD} + \frac{L_{ad} L_{lF}}{L_F} \right)$$

O significado das diversas constantes de tempo acima pode ser mais bem visualizado através do circuito equivalente da máquina síncrona, conforme apresentado na Figura 3. Pode-se ver que, em essência, elas são constantes de tempo a vazio, ou seja, o estator é um circuito aberto. Deve-se lembrar de que as constantes de tempo estão em radianos e devem, portanto, ser divididas pela velocidade base em radianos/segundo (ω_{base}).

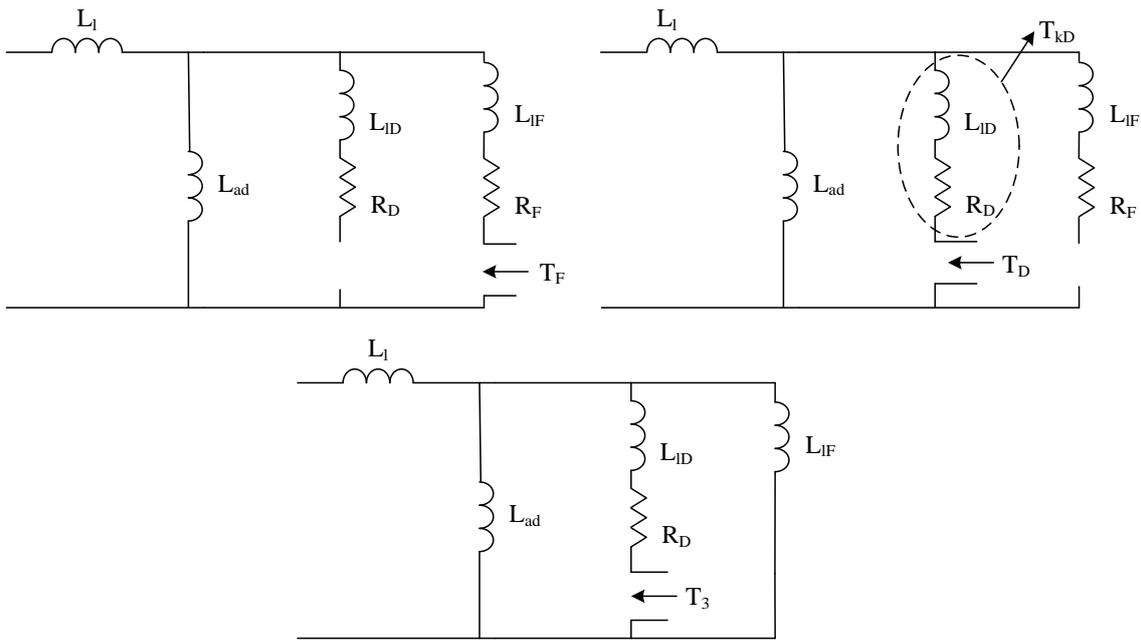


Figura 3: Constante de tempo de circuito aberto (eixo d)

Trabalhando-se com $L_d(s)$ chega-se a:

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + s(T_4 + T_5) + s^2 T_4 T_6}{1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_3} \quad (12)$$

sendo

$$T_4 = \frac{1}{r_F} \left(\frac{L_{ad}L_l}{L_{ad} + L_l} + L_{lF} \right) \qquad T_5 = \frac{1}{r_D} \left(\frac{L_{ad}L_l}{L_{ad} + L_l} + L_{lD} \right)$$

$$T_6 = \frac{1}{r_D} \left(L_{lD} + \frac{L_{ad}L_{ld}L_{lF}}{L_{lF}L_{ad} + L_{lF}L_l + L_{ad}L_l} \right)$$

O significado das diversas constantes de tempo acima pode ser mais bem visualizado através do circuito equivalente da máquina síncrona, conforme apresentado na Figura 4. Pode-se ver que, neste caso, são constantes de tempo da máquina com a armadura em curto-circuito. Novamente, essas constantes de tempo devem ser divididas pela velocidade base em radianos/segundo (ω_{base}).

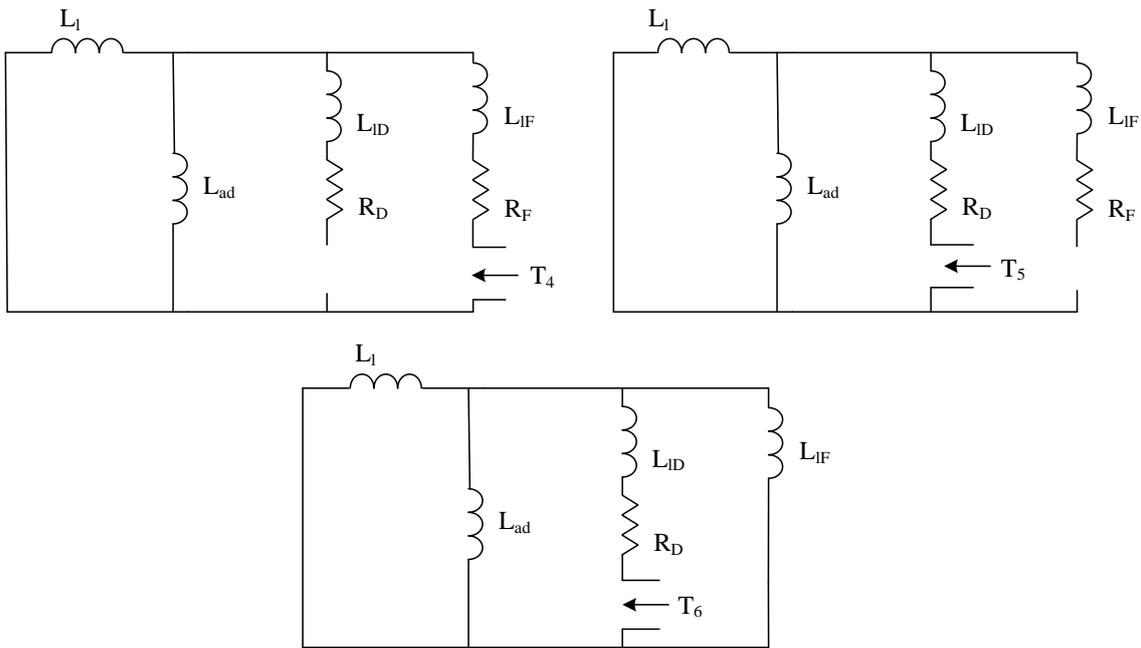


Figura 4: Constantes de tempo de curto-circuito (eixo d)

O mesmo procedimento pode ser desenvolvido para o eixo q, obtendo-se:

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + sT_7}{1 + sT_Q} \quad (13)$$

sendo

$$T_Q = \frac{L_Q}{r_Q} \qquad T_7 = \frac{1}{r_Q} \left(L_{lQ} + \frac{L_l L_{aq}}{L_q} \right)$$

As constantes de tempo T_Q e T_7 estão relacionadas, respectivamente, ao circuito equivalente do eixo em quadratura com a armadura em circuito aberto e em curto-circuito. Os circuitos dos quais estas constantes de tempo são derivadas estão ilustrados na Figura 5.

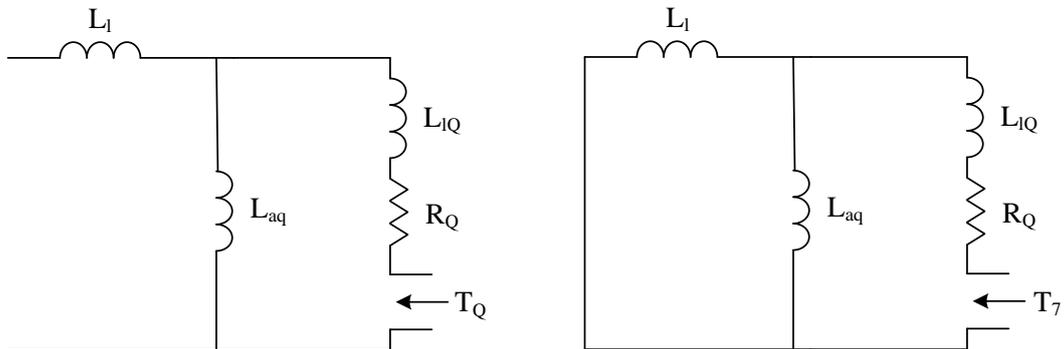


Figura 5: Constantes de tempo de tempo de circuito aberto e curto-circuito (eixo q)

As funções de transferência (11), (12) e (13) representam os parâmetros operacionais da máquina síncrona dentro das simplificações já mencionadas. Outro passo neste estudo é dado analisando-se os pólos e zeros destas funções de transferência, os quais recebem denominações particulares na literatura.

$$G_1(s) = G_0 \frac{1 + sT_{kD}}{1 + s(T'_{do} + T''_{do}) + s^2 T'_{do} T''_{do}} \quad (14)$$

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + s(T'_d + T''_d) + s^2 T'_d T''_d}{1 + s(T'_{do} + T''_{do}) + s^2 T'_{do} T''_{do}} \quad (15)$$

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + sT''_q}{1 + sT''_{qo}} \quad (16)$$

Comparando-se (14), (15) e (16) com (11), (12) e (13), tem-se que:

$$T'_{do} + T''_{do} = T_D + T_F$$

$$T'_{do} T''_{do} = T_D T_3$$

A solução deste sistema levaria a expressões complicadas para T'_{do} e T''_{do} em função de T_D , T_F e T_3 . Porém, analisando-se as expressões para T_D , T_F e T_3 e levando-se em conta que $R_D \gg R_F$, tem-se que $T_F > T_D > T_3$. Deste modo, costuma-se utilizar valores aproximados, onde:

$T'_{do} = T_F \rightarrow$ Constante de tempo transitória de eixo direto, em circuito aberto.

$T''_{do} = T_3 \rightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo direto, em circuito aberto.

Seguindo o mesmo procedimento, tem-se:

$T'_d = T_4 \rightarrow$ Constante de tempo transitória de eixo direto, em curto-circuito.

$T''_d = T_6 \rightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo direto, em curto-circuito.

Para o eixo q a comparação é direta e tem-se:

$T''_q = T_7 \rightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura, em curto-circuito.

$T''_{qo} = T_Q \rightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura, em circuito aberto.

Desta forma, pode-se escrever:

$$G_1(s) = G_0 \frac{1 + sT_{kD}}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} \quad (17)$$

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} \quad (18)$$

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + sT''_q}{1 + sT''_{qo}} \quad (19)$$

Algumas informações adicionais sobre o comportamento da máquina podem ser obtidas das funções de transferências acima. Por exemplo, analisando a constante de tempo T'_d :

$$T'_{d} = \frac{1}{R_F} \left(\frac{L_{ad}L_l}{L_{ad} + L_l} + L_{lF} \right) = \frac{T'_{do}}{L_d} \left(\underbrace{L_l + \frac{L_{ad}L_{lF}}{L_F}}_{L'_d} \right)$$

L'_d é denominada indutância transitória de eixo direto e, pela Figura 6, pode-se ver que corresponde ao valor da indutância vista através dos terminais do estator não se considerando o enrolamento amortecedor.

$$L'_d = L_l + \frac{L_{ad}L_{lF}}{L_F} \quad (20)$$

Pode-se então escrever:

$$T'_{d} = \frac{L'_d}{L_d} T'_{do}$$

Quando o enrolamento amortecedor está presente, a indutância vista dos terminais do estator é denominada indutância subtransitória de eixo direto, sendo expressa por:

$$L''_d = \left(L_l + \frac{L_{ad}L_{lD}L_{lF}}{L_{lF}L_{ad} + L_{lD}L_{ad} + L_{lD}L_{lF}} \right) \quad (21)$$

e pode-se escrever:

$$T''_d = \frac{L''_d}{L'_d} T''_{do}$$

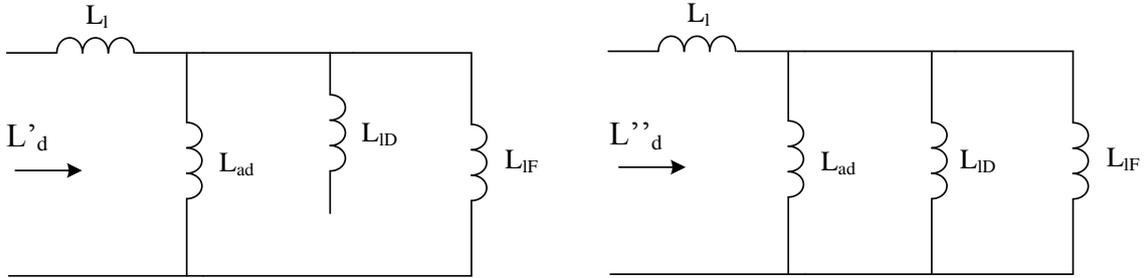


Figura 6: Indutâncias transitória e subtransitória de eixo direto vistas pelo estator

O mesmo procedimento pode ser diretamente aplicado ao eixo q. Entretanto, para máquinas síncronas de pólos salientes com rotor laminado, o enrolamento amortecedor é o único circuito do rotor representado no eixo em quadratura. Os parâmetros deste circuito representam o rápido decaimento observado no período subtransitório, sendo que, para este eixo, não é feita nenhuma distinção entre o período transitório e o regime permanente da resposta estatórica. Portanto, a indutância subtransitória de eixo em quadratura, representada por L''_q , é dada pela equação (22) e corresponde ao valor da indutância vista dos terminais do estator considerando o efeito do enrolamento amortecedor, conforme pode ser observado na Figura 7.

$$T''_q = \frac{1}{R_q} \left(L_{lQ} + \frac{L_l L_{aq}}{L_q} \right) = \frac{T''_{qo}}{L_q} \left(\underbrace{L_l + \frac{L_{aq} L_{lQ}}{L_q}}_{L''_q} \right)$$

$$L''_q = L_l + \frac{L_{aq} L_{lQ}}{L_q} \quad (22)$$

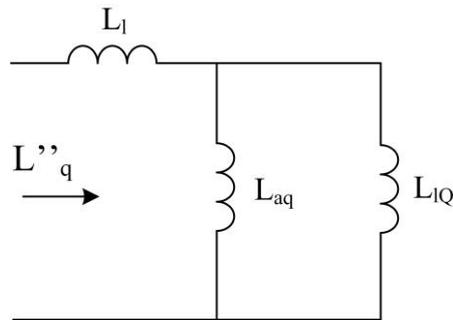


Figura 7: Indutância subtransitória de eixo em quadratura vista do estator

As expressões (20), (21) e (22) permitem correlacionar os parâmetros derivados, usualmente utilizados em programas de simulação de transitórios eletromecânicos, com os parâmetros primitivos da máquina síncrona.

2.2. PARÂMETROS A SEREM IDENTIFICADOS

As equações apresentadas na seção 2.1 possuem resistências e reatâncias dos circuitos da armadura e do rotor como parâmetros, os quais são denominados *parâmetros primitivos* ou *parâmetros básicos*. Embora estes parâmetros especifiquem completamente as características elétricas da máquina síncrona, eles não podem ser diretamente determinados através de ensaios. Portanto, é conveniente modelar matematicamente as máquinas síncronas através de *parâmetros derivados*, obtidos através da análise da resposta estatórica da máquina perante ensaios padronizados, como aqueles descritos em [1].

As características de interesse em uma modelagem de máquina síncrona para estudos de estabilidade são as indutâncias (ou reatâncias) vistas dos terminais da máquina, as quais associadas às correntes elétricas de frequência fundamental durante os regimes permanente, transitório e subtransitório da resposta estatórica perante um distúrbio. Além dessas indutâncias, as correspondentes constantes de tempo que determinam a taxa de decaimento das tensões e correntes estatóricas formam o conjunto de parâmetros derivados utilizados na especificação das características elétricas de uma máquina síncrona [6].

Os parâmetros derivados podem ser divididos em subgrupos de acordo com o período da resposta estatórica que mais fortemente influenciam, como exemplificado na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros derivados de uma máquina síncrona

Parâmetros Síncronos	R_a	Resistência da armadura (pu)
	L_d	Indutância síncrona de eixo direto (pu)
	L_q	Indutância síncrona de eixo em quadratura (pu)
	L_l	Indutância de dispersão (pu)
Parâmetros Transitórios	L'_d	Indutância transitória de eixo direto (pu)
	L'_q	Indutância transitória de eixo em quadratura (pu)
	T'_{do}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto (s)
	T'_{qo}	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto (s)
Parâmetros Subtransitórios	L''_d	Indutância subtransitória de eixo direto (pu)
	L''_q	Indutância subtransitória de eixo em quadratura (pu)
	T''_{do}	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto (s)
	T''_{qo}	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto (s)

Os parâmetros da máquina que influenciam no período de decaimento mais rápido da resposta estatórica são denominados *parâmetros subtransitórios*, enquanto aqueles que influenciam no período de decaimento mais lento são denominados *parâmetros transitórios*. Finalmente, os parâmetros que determinam a característica da resposta em regime permanente são denominados *parâmetros síncronos*.

A indutância transitória de eixo em quadratura e a constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto, representados respectivamente por L'_{q} e T'_{qo} , não são utilizadas em modelos de máquinas síncronas de pólos salientes, pois, devido às características físicas dos rotores, este tipo de máquina não possui um segundo enrolamento amortecedor representado em seu circuito equivalente de eixo em quadratura. Ademais, em estudos de estabilidade eletromecânica é comum

desconsiderar a saliência subtransitória, ou seja, assumir $L''_d = L''_q$. Esta simplificação é motivada pelo fato destes parâmetros possuírem valores muito próximos, além de facilitar a conexão do modelo matemático da máquina síncrona ao modelo matemático da rede elétrica. Por conseguinte, o conjunto de parâmetros derivados que necessitam ser estimados para a completa modelagem das características elétricas de uma máquina síncrona de pólos salientes é definido por:

$$\theta = \left[R_a \quad L_d \quad L_q \quad L_l \quad L'_d \quad L''_d \quad T'_{do} \quad T''_{do} \quad T''_{qo} \right]^T \quad (23)$$

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COMENTADA

Neste capítulo serão abordadas todas as etapas envolvidas nos processos de identificação de parâmetros de sistemas físicos. Além disso, o caso particular de identificação de parâmetros de máquinas síncronas, assunto deste trabalho, será introduzido. Serão apresentados os diversos tipos de testes destinados a fornecer dados de medições para o processo de identificação de parâmetros de máquinas síncronas, e os principais trabalhos estudados durante o desenvolvimento da metodologia proposta serão brevemente discutidos.

3.1. AS ETAPAS DO PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

A identificação de modelos e parâmetros de sistemas físicos é o processo de construção de modelos matemáticos de sistemas dinâmicos utilizando dados de medições. Consiste em uma área bastante desenvolvida na engenharia de sistemas e existem diversas metodologias disponíveis para essa finalidade, as quais são encontradas em inúmeros livros sobre o assunto, sendo a referência [11] um dos livros mais completos.

O processo de identificação de sistemas segue um determinado fluxo lógico, como ilustrado na Figura 8. Inicialmente os dados de entrada e saída são coletados

através da realização de um ensaio. A escolha dos dados a serem medidos deve ser feita de tal forma que o conjunto de medições coletadas contenha o maior número possível de informações sobre a dinâmica do sistema que se deseja modelar. Posteriormente, deve-se definir a estrutura do modelo, consistindo na etapa que é, concomitantemente, a mais importante e difícil do processo de estimação, sendo de fundamental importância que se tenha um bom conhecimento dos fenômenos a serem modelados para definição das propriedades da estrutura do modelo. Nesta etapa do processo é que se delineiam as duas categorias em que os métodos de identificação podem ser classificados. Na primeira, o modelo é construído através de conhecimentos empíricos e com base nas leis da física, sendo caracterizado por um conjunto de parâmetros com significados físicos, e que devem ser identificados através da utilização dos dados de medições. Na segunda categoria, são utilizados modelos-padrão, cujos parâmetros podem ser interpretados como ferramenta de ajuste do modelo aos dados de entrada e saída, não refletindo nenhuma consideração física do sistema: essa categoria é comumente referida como modelos do tipo caixa preta.

Supondo que uma determinada estrutura de modelo, parametrizada por um vetor de parâmetros θ , tenha sido selecionada, o próximo passo consiste na escolha de um método de identificação para esse vetor, objetivando que o modelo reproduza da melhor forma possível a dinâmica observada nos dados de medição. Cabe salientar que a identificação de sistemas lineares e não lineares, como é o caso das máquinas síncronas, consiste em uma área de pesquisa bastante estudada até os dias de hoje, existindo numerosas metodologias utilizadas na identificação de parâmetros de sistemas físicos, como por exemplo, Mínimos Quadrados, Máxima Verossimilhança, Algoritmos Genéticos e Redes Neurais.

Após a identificação dos parâmetros, é necessária realização de testes para validação do modelo. A validação é realizada através da análise do desempenho do modelo em relação aos dados de medição coletados e ao conhecimento do sistema que está sendo modelado, além da avaliação da adequabilidade do modelo ao propósito de utilização dele. No caso do modelo identificado não atender às expectativas, as diversas etapas do processo devem ser revistas. O modelo pode ser deficiente por algumas razões:

- O ensaio realizado, assim como os sinais coletados, não resultam em um conjunto de medições que possua informações suficientes a respeito da

dinâmica do sistema físico.

- A estrutura do modelo não é apropriada para reproduzir a dinâmica do sistema.
- O método de estimação não foi adequadamente escolhido.

Deve-se ter em mente que um modelo nunca pode ser aceito como uma descrição fidedigna do sistema. Pelo contrário, deve ser visto como bom o suficiente em certos aspectos que são de particular interesse para a aplicação à qual é destinado. Toda aprendizagem adquirida durante o processo iterativo de identificação contribui para o enriquecimento do conhecimento acerca do fenômeno modelado, contribuindo para que modelos cada vez melhores sejam obtidos.

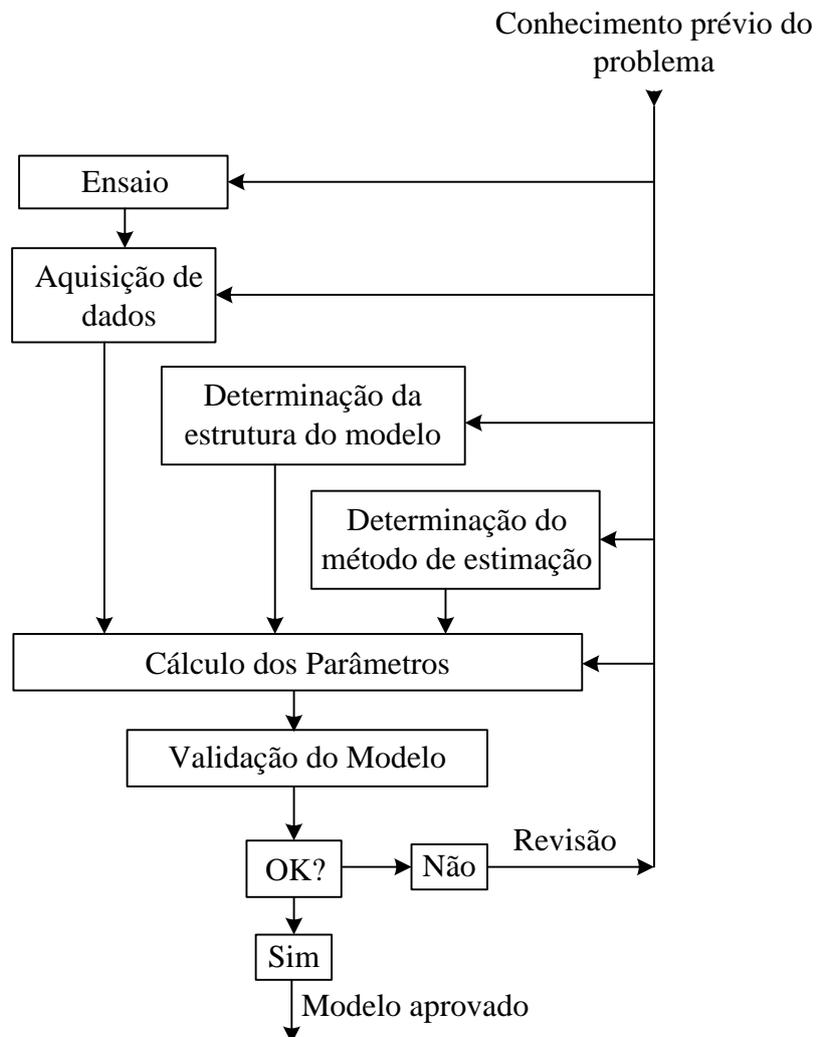


Figura 8: Fluxograma do processo de identificação de sistemas

3.2. IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS

Um dos passos iniciais na busca pela representação matemática de uma máquina síncrona é a definição da estrutura do modelo, a qual pode ser representada por circuitos equivalentes de parâmetros concentrados, funções de transferência, equações diferenciais, etc. Posteriormente, devem ser identificados os parâmetros do modelo através de uma metodologia de identificação, a qual será alimentada pela estrutura do modelo e pelos dados de medição coletados em ensaios.

Neste trabalho, a estrutura do modelo de máquina síncrona é assumida conhecida e representada por circuitos equivalentes de parâmetros concentrados, conforme descrito no Capítulo 2. Embora esta premissa simplifique o processo de identificação, a combinação da estrutura do modelo com os dados de medição de forma a serem identificados todos os parâmetros não é um processo trivial, tampouco único. Embora os modelos apresentados na referência [3] sejam, há muito, consolidados na representação de máquinas síncronas para estudos de estabilidade eletromecânica, são baseados em aproximações dos fenômenos físicos que acontecem na máquina. Além disso, as técnicas utilizadas para modelagem de fenômenos não lineares como a saturação magnética não são bem desenvolvidos e podem afetar a aplicabilidade do modelo em algumas situações.

Grande quantidade de testes pode ser executada com a finalidade de prover dados a serem utilizados na caracterização de máquinas síncronas. De acordo com a condição operativa da máquina quando da realização destes testes, o processo de identificação dos parâmetros pode ser classificado em duas categorias:

- i. Identificação *offline*: Os testes são realizados com a máquina fora de sua condição normal de funcionamento, ou seja, desconectada do sistema elétrico. Os testes podem ser realizados com a máquina em movimento, como por exemplo, o ensaio de saturação em vazio e o ensaio de curto-circuito, ou com a máquina em repouso, como se procede nos ensaios de resposta em frequência.

- ii. Identificação *online*: Os testes são realizados durante o funcionamento normal da máquina conectada ao sistema elétrico.

Cada uma das categorias de métodos apresentadas acima possui seus méritos e deméritos. Na identificação *online* os dados de medições coletados refletem a real condição operativa da máquina. No entanto, as possibilidades de perturbações a serem aplicadas nos sinais de entrada e a quantidade de sinais disponíveis para serem medidos são limitados, uma vez que deve ser assegurada a operação estável do sistema elétrico.

A identificação *offline* apresenta como principal desvantagem a necessidade de desconexão da máquina ao sistema elétrico, o que pode ser impraticável ou até mesmo impossível em alguns casos. Porém, quando este procedimento é factível, podem ser realizados os mais variados testes, sendo possível coletar um conjunto de dados de medição bastante rico em informações.

3.3. MÉTODOS DE ENSAIOS *OFFLINE* PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Tradicionalmente, os parâmetros de máquinas síncronas são obtidos através da folha de dados do fabricante e validados através de métodos de ensaios *offline*, os quais são padronizados e detalhadamente descritos na referência [1]. Esses métodos assumem que a estrutura do modelo da máquina é conhecida, e definida através de conceitos há muito consolidados na modelagem matemática de máquinas síncronas para estudos de estabilidade eletromecânica, sendo a referência [3] um guia completo sobre esse assunto. O objetivo, portanto, é a determinação dos parâmetros do modelo matemático representativo da máquina em estudo.

Os ensaios *offline* podem ser realizados no domínio do tempo ou, alternativamente, no domínio da frequência. Levando-se em consideração a severidade nas alterações da condição operativa da máquina, os ensaios no domínio do tempo podem ser classificados em ensaios em regime permanente ou ensaios transitórios (ensaios de curto-circuito). Por outro lado, os ensaios no domínio da frequência podem ser realizados com a máquina em repouso (SSFRT) ou com a máquina em movimento

(OCFRT e OLFRT). O fluxograma da Figura 9 ilustra as subclassificações dos métodos de ensaios *offline*.

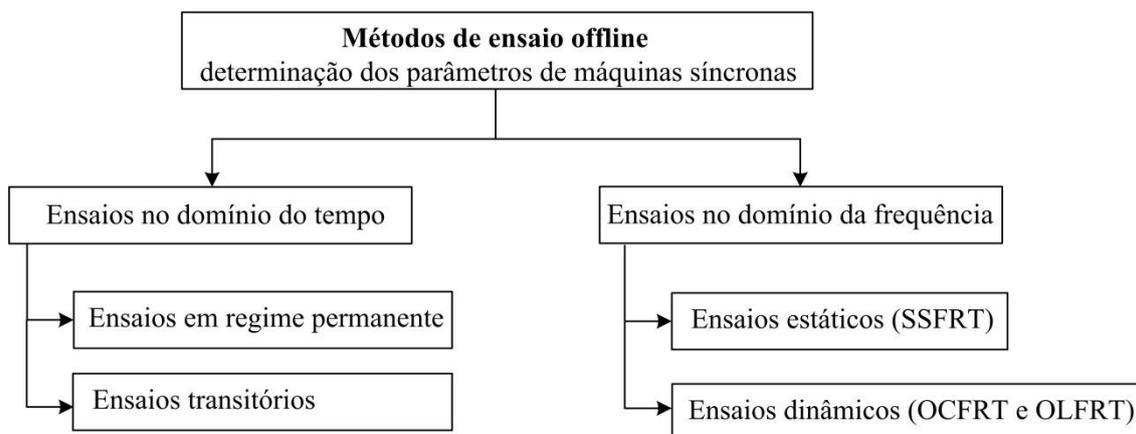


Figura 9: Subclassificações dos métodos de ensaio *offline* para determinação de parâmetros de máquinas síncronas

Sabe-se que os parâmetros de uma máquina síncrona não são constantes durante a vida útil do equipamento. O desgaste natural e os esforços mecânicos aos quais são submetidas as partes constituintes da máquina, as intervenções de manutenção - dentre as quais podemos citar, especialmente, o processo de rebobinagem -, podem causar mudanças significativas nos valores dos parâmetros. Além disso, alguns parâmetros, como as indutâncias de magnetização de eixo direto e de eixo em quadratura, assumem diferentes valores de acordo com o ponto de operação da máquina devido ao efeito de saturação magnética.

Devido às variações nos valores dos parâmetros causadas pelos vários motivos citados anteriormente e a necessidade de se ter a máquina desconectada do sistema elétrico, os ensaios *offline* não são considerados como um método prático e de desejável exatidão para a determinação dos parâmetros de uma máquina síncrona.

Na seção 3.3.1 serão apresentados os principais ensaios realizados para aquisição de dados de medições no domínio do tempo, utilizados na identificação de parâmetros de máquinas síncronas. As variações dos ensaios de aquisição de dados no domínio da frequência são apresentadas na seção 3.3.2. A referência [1] é um documento completo sobre procedimentos de testes realizados em máquinas síncronas e

bastante recomendada para se obter informações mais detalhadas acerca dos testes que serão apresentados nesses itens.

3.3.1 Ensaios no domínio do tempo

Os ensaios no domínio do tempo abrangem uma grande variedade de técnicas tradicionalmente aplicadas para determinação dos parâmetros das máquinas síncronas, dentre as quais podemos distinguir duas categorias básicas: os ensaios em regime permanente e os ensaios em regime transitório.

Como são técnicas mais tradicionais, os ensaios no domínio do tempo apresentam metodologias de cálculo muito bem definidas e de fácil execução. Além disso, a complexidade matemática envolvida no tratamento dos dados medidos é pequena, normalmente lançando mão somente de algumas operações algébricas para determinação dos parâmetros. Em contrapartida, esses ensaios fornecem milhares de amostras durante um experimento, envolvendo, ao mesmo tempo, todas as frequências naturais do sistema em estudo, em termos de amplitude e fase dos sinais medidos. Como consequência, tem-se um alto nível de redundância de frequência e, portanto, maiores níveis de ruído nos sinais se comparados aos obtidos nos testes no domínio da frequência.

Nas seções 3.3.1.1 e 3.3.1.2 serão discutidos, respectivamente, os ensaios em regime permanente e em regime transitório, sendo destacados os mais tradicionais testes realizados em cada uma dessas categorias, assim como os parâmetros que podem ser identificados em cada um desses testes.

3.3.1.1 Ensaios em regime permanente

Os ensaios em regime permanente são utilizados para analisar o desempenho da máquina em condições normais de operação. Nessas condições, as variações de corrente e tensão terminal são de pequena amplitude e acontecem lentamente. Através desses ensaios podem ser determinados os parâmetros síncronos da máquina e também, caso a

condição de operação desbalanceada da máquina seja de interesse, as resistências e reatâncias de sequência negativa e zero do circuito do estator.

Os ensaios de regime permanente mais tradicionais são o ensaio de saturação em circuito aberto e o ensaio de saturação em curto-circuito. Através dos resultados desses ensaios é possível obter o valor da indutância síncrona de eixo direto (L_d). O valor não saturado dessa indutância, em pu, é definido como a razão entre a corrente de campo necessária para gerar a corrente de armadura nominal em curto-circuito a corrente de campo necessária para gerar a tensão nominal a vazio. É conveniente lembrar, porém, que os valores saturados das indutâncias de magnetização mudam conforme as condições operativas da máquina.

O valor da indutância síncrona de eixo em quadratura (L_q) pode ser determinado através do ensaio de escorregamento. Para tanto, o rotor é acionado a uma velocidade ligeiramente diferente da velocidade síncrona, com o circuito do campo aberto e a armadura energizada por uma fonte trifásica de sequência positiva e frequência nominal, e com um nível de tensão abaixo do valor no qual a curva da característica de circuito aberto desvia da linha de entreferro. A análise em regime permanente é válida porque o escorregamento é muito pequeno. As modulações das tensões e correntes estatóricas são utilizadas para o cálculo das indutâncias L_q e L_d , respectivamente [12].

Uma alternativa para a obtenção do valor saturado de L_q é o ensaio de excitação negativa. Neste ensaio a máquina é acionada como um motor síncrono operando sem carga, com tensão aplicada na armadura não maior que 75% do valor nominal e com corrente de excitação aproximadamente igual seu valor na operação a vazio. A corrente de excitação é reduzida a zero, e gradualmente aumentada na polaridade oposta, causando um aumento na corrente de armadura. O valor negativo da corrente de excitação é gradualmente aumentado até que ocorra a instabilidade, sendo o valor de L_q igual à razão entre a tensão e a corrente da armadura no limiar da instabilidade.

A indutância L_q também pode ser obtida através das medições das tensões e correntes da armadura e do ângulo de carga [1].

A operação da máquina em regime permanente ligeiramente desbalanceada também pode ser de interesse, mesmo que muitas vezes tolerada apenas por um curto período de tempo. As resistências e reatâncias de sequência negativa e zero são usadas

para análise nessas condições e também podem ser determinadas através de ensaios no domínio do tempo, os quais se encontram detalhados em [1].

A indutância de dispersão da armadura (L_d) também influencia no comportamento da máquina em regime permanente, porém, não existem testes normatizados que permitem a obtenção desse parâmetro de forma prática. O valor de L_d é normalmente calculado pelo fabricante durante o projeto do equipamento.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros que podem ser obtidos por meio dos testes em regime permanente:

Tabela 3: Parâmetros obtidos através de ensaios em regime permanente

L_d	Indutância síncrona de eixo direto
L_q	Indutância síncrona de eixo em quadratura
X_2	Reatância de sequência negativa
R_2	Resistência de sequência negativa
X_0	Reatância de sequência zero
R_0	Resistência de sequência zero
RCC	Relação de curto-circuito

O estudo do comportamento dinâmico da máquina em condições de perturbação severa, como no caso da ocorrência de um curto-circuito, por exemplo, exige o conhecimento dos parâmetros transitórios da máquina, os quais são determinados pelos ensaios transitórios, como veremos a seguir.

3.3.1.2 Ensaios transitórios

Os ensaios transitórios envolvem mudanças abruptas nos valores de corrente e tensão nos circuitos trifásicos da máquina síncrona. Esses ensaios são importantes para verificar se o projeto mecânico da máquina é adequado para suportar o stress mecânico decorrente das correntes de curto-circuito, que pode ser muitas vezes maior que as

solicitações mecânicas provenientes da corrente de operação normal da máquina. Além disso, também são importantes para a determinação de várias características da máquina síncrona, como as reatâncias e constantes de tempo transitórias e subtransitórias. Esses parâmetros são utilizados na simulação do desempenho dinâmico da máquina nos períodos subtransitário e transitório quando da ocorrência de um distúrbio.

O ensaio de curto-circuito é provavelmente o mais conhecido teste para identificação dos parâmetros transitórios e subtransitórios e é realizado através da aplicação de um curto-circuito trifásico franco nos terminais da máquina síncrona operando sem carga e em circuito aberto. Este método ignora completamente o eixo em quadratura – o qual é insuficientemente excitado durante o curto-circuito – e pressupõe um modelo de segunda ordem para o eixo direto, conforme aquele apresentado no Capítulo 2.

Durante a realização do teste devem ser registradas as oscilografias das tensões e correntes nas fases da armadura até o instante em que as correntes alcancem o regime permanente. De forma a evitar erros, principalmente durante a determinação das constantes de tempo, a corrente de excitação deve ser mantida constante e igual ao seu valor pré-distúrbio durante todo o teste [1]. Adicionalmente, a velocidade angular da máquina também deve ser mantida constante e igual a 1,0 pu. Nessas condições, desprezando a resistência do circuito da armadura, o valor eficaz da componente alternada (ac) da corrente de armadura após a aplicação do curto circuito trifásico é equacionada como [1]:

$$I(t) = \frac{E}{L_d} + \left(\frac{E}{L'_d} - \frac{E}{L_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{E}{L''_d} - \frac{E}{L'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \quad (24)$$

em que:

$I(t)$ é o valor eficaz alternado da corrente de armadura de curto-circuito, em pu.

E é o valor eficaz alternado da tensão de armadura antes do curto-circuito, em pu.

T é o tempo em segundos, medido a partir do instante do curto-circuito.

Devido aos termos exponenciais envolvidos, uma análise gráfica permite a identificação das constantes de tempo transitória e subtransitória de eixo direto em curto-circuito (T'_d e T''_d). De forma similar, as indutâncias transitória e subtransitória de eixo direto (L'_d e L''_d) podem ser identificadas. Os procedimentos para identificação destes parâmetros através do resultado do ensaio de curto-circuito são apresentados na seção 11 da referência [1].

Uma variação do ensaio de curto-circuito trifásico deve ser utilizada quando não for possível manter constante a tensão de excitação. Neste caso, devem ser aplicados, simultaneamente, um curto-circuito trifásico na armadura e um curto-circuito no enrolamento de campo. Antes da aplicação dos curtos-circuitos, a máquina deve estar operando em circuito aberto, com velocidade nominal e com a corrente de campo necessária para se obter a tensão terminal desejada. Os parâmetros L'_d , L''_d , T'_d e T''_d podem ser identificados através das mesmas medições realizadas no ensaio de curto-circuito padrão, utilizando uma variação da equação (24) para descrever o comportamento da corrente de armadura durante o teste. Nessa equação, o termo (E/L_d) deve ser excluído, visto que a corrente de armadura assume valor zero em regime permanente.

Como alternativa ao ensaio de curto-circuito trifásico, destaca-se o ensaio de recuperação de tensão. As reatâncias transitórias e subtransitórias de eixo direto podem ser obtidas através das oscilografias das tensões de linha da armadura após a abertura abrupta de um curto-circuito trifásico em regime permanente quando a máquina está operando com sua velocidade nominal e com um determinado valor de excitação. Os valores das correntes de armadura antes da abertura do curto também devem ser registrados. Além das oscilografias das tensões de armadura durante o período transitório, as formas de onda dessas tensões após atingirem o regime permanente devem também ser registradas. Através da análise dessas formas de onda, juntamente com o valor da corrente de armadura antes da abertura do curto-circuito, é possível determinar as reatâncias transitória e subtransitória de eixo direto e, complementarmente ao ensaio de curto-circuito, também podem ser determinadas as constantes de tempo transitória e subtransitória de eixo direto em circuito aberto (T'_{do} e T''_{do}) da máquina síncrona.

Conforme abordado nos parágrafos anteriores, os ensaios transitórios que envolvem a aplicação de curto-circuito trifásico fornecem resultados que são utilizados

apenas para identificação dos parâmetros transitórios e subtransitórios de eixo direto da máquina síncrona. Esses ensaios são realizados a partir da máquina operando em circuito aberto, ou seja, com ângulo de carga nulo, e, portanto, não fornecem informações necessárias para a estimação dos parâmetros de eixo em quadratura. No entanto, é possível determinar o valor da reatância subtransitória de eixo em quadratura (X''_q) através de ensaios estáticos e ensaios envolvendo condições operativas desbalanceadas, como apresentado na seção 11.13 da referência [1]. O mais simples destes testes consiste na aplicação de tensão alternada com frequência nominal em cada par de terminais da armadura, com a máquina em repouso e com o circuito de campo em curto circuito. Através da medição do valor da corrente de armadura para cada tensão aplicada, pode-se obter o valor de X''_q e X''_d .

É possível obter não somente X''_q , mas também a reatância transitória de eixo em quadratura (X'_q) e as constantes de tempo transitória e subtransitória de eixo em quadratura em curto-circuito e em circuito aberto (T'_q , T''_q , T'_{q0} e T''_{q0}) através de ensaios com a máquina síncrona operando com tensão reduzida, carga leve e conectada de forma síncrona (ou assíncrona) a uma fonte de tensão trifásica. Esses ensaios possuem execução mais complexa se comparados aos ensaios anteriormente apresentados, sendo necessária a monitoração em tempo real do ângulo de carga da máquina – necessário para decomposição da corrente e tensão de armadura em suas componentes no eixo direto e no eixo em quadratura – e a aplicação de curto-circuito em instantes de tempo adequados. Alguns desses ensaios são descritos brevemente no Anexo 11A da referência [1].

A Tabela 4 apresenta os parâmetros que podem ser obtidos por meio dos testes transitórios:

Tabela 4: Parâmetros obtidos através de ensaios em regime transitório

X'_d	Reatância transitória de eixo direto
X'_q	Reatância transitória de eixo em quadratura
X''_d	Reatância subtransitória de eixo direto
X''_q	Reatância subtransitória de eixo em quadratura
T'_d	Constante de tempo transitória de eixo direto em curto-circuito
T'_{do}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto
T'_q	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em curto-circuito
T'_{qo}	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto
T''_d	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em curto-circuito
T''_{do}	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto
T''_q	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em curto-circuito
T''_{qo}	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto

3.3.2 Ensaios no domínio da frequência

Os testes de resposta em frequência constituem o estado da arte em estimação de parâmetros de máquinas síncronas. Esses testes têm sido o foco de inúmeros trabalhos nas últimas décadas [13-15] e já adquiriram uma teoria sólida e, em alguns casos, suplantam os testes mais consagrados de curto-circuito.

O interesse nos ensaios de resposta em frequência cresceu a partir da experiência de que os modelos derivados a partir de ensaios transitórios mostravam-se inadequados para reproduzir a dinâmica da máquina síncrona sob a influência do sistema de controle de excitação. Para uma modelagem que contemple essa influência, é necessária a utilização de dados que representem a dinâmica dos sinais do enrolamento de campo, os quais não são obtidos através dos testes transitórios e constituem uma vantagem significativa dos ensaios no domínio da frequência. Outra vantagem que pode ser destacada é que os testes de resposta em frequência podem ser realizados, de forma

relativamente simples, tanto na fábrica quanto em campo. Os testes são realizados com sinais de baixa potência, os quais não submetem a máquina a solicitações eletromagnéticas severas, tais como ocorrem em ensaios de curto-circuito trifásico abrupto, e os dados obtidos fornecem informações de ambos os eixos, direto e em quadratura. Além disso, ao passo que os ensaios transitórios fornecem dados especificamente para determinação de modelos de segunda ordem, modelos de ordem mais elevada podem ser identificados através dos dados provenientes dos ensaios de resposta em frequência, uma vez que são realizados com sinais em uma ampla faixa de frequência (de 0,001 Hz até frequências entre 100 Hz e 200 Hz).

Outros aspectos em que os ensaios no domínio da frequência diferem dos ensaios *offline* no domínio do tempo são a necessidade de maior exatidão nas medições e a maior complexidade na manipulação dos dados. Adicionalmente, o processo de identificação de parâmetros utilizando os resultados dos testes no domínio da frequência requer técnicas computacionais avançadas de ajuste de curvas.

Existem três variações dos ensaios no domínio da frequência. Os ensaios estáticos, caracterizados pela sigla SSFRT (do inglês, *Standstill Frequency Response Tests*), são realizados com a máquina em repouso. Os ensaios dinâmicos podem ser realizados com a máquina girando em vazio – OCFRT (do inglês, *Open Circuit Frequency Response Tests*) – ou com a máquina conectada à rede elétrica – OLFRT (do inglês, *On-line Frequency Response Tests*). Esses ensaios serão brevemente discutidos nas seções 3.3.2.1 e 3.3.2.2, com maior ênfase nos tradicionais ensaios SSFRT.

3.3.2.1 Ensaio estático (SSFRT)

Esse método de identificação de parâmetros para modelos de máquinas síncronas tem sido desenvolvido nos últimos 15 anos. Os procedimentos para realização desses ensaios encontram-se padronizados e descritos na seção 12 da referência [1] e consistem basicamente em excitar os circuitos de armadura ou de campo do gerador com sinais senoidais em uma ampla faixa de frequência, estando a máquina em repouso e desconectada da rede elétrica. Apesar dos primeiros trabalhos terem sido focados no estudo de turbogeradores, a aplicação desses testes em hidrogenadores foi alvo de importantes trabalhos [16-18] e ainda atrai estudiosos do tema atualmente.

Usualmente, os modelos adotados na representação de máquinas síncronas recaem na utilização de circuitos elétricos equivalentes compostos por resistências e indutâncias, conforme exemplificado na Figura 1. Alternativamente, pode-se representar a dinâmica de uma máquina utilizando uma abordagem no domínio da frequência, através de parâmetros operacionais na forma de funções de transferências, não havendo a necessidade de se trabalhar com valores instantâneos das grandezas rotóricas, a saber: corrente de campo e as correntes nos enrolamentos amortecedores. Esse tipo de abordagem é utilizado nos métodos no domínio da frequência, sendo que os parâmetros operacionais definidos a seguir têm se mostrado eficientes para obtenção de modelos de máquinas síncronas a partir desses ensaios.

- a) $Z_d(s)$: *Reatância operacional de eixo direto*. É obtida através da aplicação de sinais de excitação no circuito da armadura com o circuito de campo em curto-circuito. É definida pela Transformada de Laplace da razão entre a variação de tensão de armadura de eixo direto e a variação da corrente de armadura de eixo direto, com o enrolamento de campo em curto-circuito.

$$Z_d(s) = R_a + L_d(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta e_{fd} = 0} \quad \Omega \quad (25)$$

- b) $Z_q(s)$: *Reatância operacional de eixo em quadratura*. É obtida através da aplicação de sinais de excitação no circuito da armadura. É definida pela Transformada de Laplace da razão entre a variação de tensão de armadura de eixo em quadratura e a corrente de armadura de eixo em quadratura.

$$Z_q(s) = R_a + L_q(s) = - \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)} \quad \Omega \quad (26)$$

c) $G(s)$: *Função de transferência entre o circuito da armadura e o circuito do rotor.* É obtida através da aplicação de sinais de excitação no circuito de campo com os circuitos de armadura abertos. É definida pela Transformada de Laplace da razão entre a variação da tensão de armadura de eixo direto e a variação da tensão de campo.

$$G(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{s \Delta e_{fd}(s)} \right|_{\Delta i_d = 0} \quad (27)$$

Outra forma de se obter esse parâmetro é apresentada em (28):

$$sG(s) = \left. \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta e_{fd} = 0} \quad (28)$$

Por questões de conveniência costuma-se preferir (28), que pode ser obtida simultaneamente com $Z_d(s)$, por consistir de uma relação de grandezas envolvendo um mesmo esquema de ligação do enrolamento de campo da máquina, a saber, em curto-circuito ($\Delta e_{fd}=0$).

d) $Z_{afo}(s)$: *Impedância de transferência entre o circuito de armadura e o circuito de campo.* É obtida através da aplicação de sinais de excitação no circuito da armadura com o circuito de campo aberto. É definida pela Transformada de Laplace da razão entre a variação da tensão de campo e a variação da corrente de armadura de eixo direto.

$$Z_{afo}(s) = \left. \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \right|_{\Delta i_{fd} = 0} \quad (29)$$

e) $Z_{fao}(s)$: *Impedância de transferência entre o circuito de campo e o circuito de armadura*. É obtida através da aplicação dos sinais de excitação no circuito de campo com os circuitos da armadura abertos. É definida pela Transformada de Laplace da razão entre a variação da tensão de armadura de eixo direto e a variação da corrente de campo.

$$Z_{fao}(s) = \left. \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_{fd}(s)} \right|_{\Delta i_d = 0} \quad (30)$$

Os ensaios SSRFT requerem a medição da magnitude e ângulo de fase dos parâmetros operacionais através da aplicação de sinais de excitação senoidais em uma ampla faixa de potência. Para o levantamento das curvas dos parâmetros $Z_d(s)$, $G(s)$, $Z_{af0}(s)$ e $Z_{fao}(s)$, o rotor deve estar posicionado de forma que o eixo direto esteja alinhado com o eixo magnético da armadura. Por outro lado, para o levantamento da curva do parâmetro $Z_q(s)$, o rotor deve estar posicionado de forma que o eixo em quadratura esteja alinhado com o eixo magnético da armadura. Os procedimentos utilizados para o correto posicionamento do rotor assim como as ligações utilizadas para o levantamento das curvas de magnitude e fase para cada parâmetro operacional encontram-se detalhados na referência [1].

O processo de identificação inicia-se pela escolha da estrutura do modelo da máquina síncrona, representada por circuitos equivalentes de eixo direto e eixo em quadratura. Através da estrutura escolhida, os parâmetros operacionais podem ser escritos em função dos parâmetros básicos e dos parâmetros derivados do modelo da máquina. Como exemplo, no Capítulo 2, para um modelo de hidrogerador de segunda ordem, foram derivadas as equações de $L_d(s)$, $L_q(s)$ e $G(s)$ em função dos parâmetros do modelo. Os valores numéricos dos parâmetros são obtidos dos resultados do ensaio de resposta em frequência através de técnicas de ajuste de curvas aplicáveis a funções não lineares, dentre os quais se destacam os métodos: Levenberg-Marquardt, Máxima-Verossimilhança e os métodos de busca de padrões [1].

Sempre que possível, é recomendável a comparação entre a simulação do desempenho do modelo derivado dos testes SSFRT com o desempenho da máquina síncrona operando em carga. Em alguns casos, ensaios de resposta em frequência com a máquina operando em vazio (OCFRT) ou conectada à rede elétrica (OLFRT) podem ser utilizados para validação dos modelos SSFRT, ou para ajuste dos parâmetros dos circuitos do rotor às condições de operação em carga com rotação nominal. O efeito da força centrífuga nas bobinas do estator e nos anéis de retenção dos rotores de turbogeradores pode causar alterações nas características eletromagnéticas das máquinas que não são contempladas nos testes SSFRT, assim como podemos destacar o efeito dos enrolamentos amortecedores na dinâmica da máquina e a saturação magnética, os quais também não se manifestam quando a máquina está em repouso.

3.3.2.2 Ensaios dinâmicos (OCFRT e OLFRT)

Os ensaios OCFRT e OLFRT são variações dos ensaios SSFRT criados com o objetivo de superar os problemas relacionados à desvantagem de não se considerar os efeitos associados à condição operativa normal da máquina, conforme apresentado na seção 3.3.2.1.

Os testes OCFRT são realizados com a máquina em circuito aberto, com velocidade nominal e tensão de armadura entre 0,5 p.u. e 1,0 p.u. de seu valor nominal. O circuito de campo do gerador é excitado através de sinais senoidais na faixa de frequência entre 0,1 Hz e 10 Hz, e são medidas as variações nas tensões e correntes de campo, na velocidade angular e nas tensões terminais. A condição de operação em rotação nominal permite detectar fenômenos relacionados à indução magnética do rotor e à variação das características da máquina devido à acomodação das peças quando submetida à ação da força centrípeta.

Os testes OLFRT são realizados com a máquina conectada à rede elétrica e operando com velocidade, tensões de armadura e potência nominais, também podendo ser realizado com potências reduzidas. O circuito de campo do gerador é excitado através de sinais senoidais na faixa de frequência entre 0,1 Hz e 5 Hz, e são medidas as variações nas tensões e correntes de campo, na velocidade angular, nas tensões terminais e nos valores de potência ativa e reativa. Esse teste possui a vantagem de ser

realizado com a máquina em sua condição real de operação e pode ser utilizado como complemento aos testes SSFRT para correção dos parâmetros do modelo. No entanto, o que torna esse teste atraente acaba se configurando em sua desvantagem. O ensaio de resposta em frequência com a máquina conectada nos sistema elétrico é de execução complicada. Além disso, o processo de identificação requer a simulação do modelo matemático da máquina síncrona juntamente com o do sistema elétrico e não se sabe exatamente como as incertezas associadas ao modelo do sistema influenciam o processo de identificação dos parâmetros da máquina.

3.4. MÉTODOS *ONLINE* PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Nos últimos anos tem sido crescente o interesse na identificação *online* de parâmetros de máquinas síncronas. Os métodos *online* mostram-se atrativos, uma vez que a operação da máquina não precisa ser interrompida e a identificação dos parâmetros é realizada através de dados de medições coletados durante o funcionamento normal do equipamento.

Como já abordado anteriormente, esses métodos podem ser categorizados de duas maneiras. Na primeira categoria, os parâmetros físicos da máquina são identificados com base em uma estrutura de modelo previamente conhecida. Na segunda categoria, denominada modelagem tipo caixa preta, não se supõe conhecida a estrutura do modelo e a identificação dos parâmetros se dá através da utilização de técnicas de mapeamento não linear nos conjuntos de dados de entrada e saída.

Inúmeros métodos têm sido desenvolvidos recentemente para identificação de parâmetros de máquinas síncronas através de dados operacionais, sendo esta uma área de pesquisa bastante ativa no universo de máquinas síncronas e identificação de sistemas. Nas seções 3.3.2 e 3.3.3 serão brevemente discutidos os principais trabalhos estudados durante a elaboração da metodologia proposta nesta dissertação, dando ênfase aos métodos que partem do princípio de que a estrutura do modelo encontra-se predeterminada, conforme premissa utilizada neste trabalho.

3.4.1 Identificação a partir de uma estrutura de modelo conhecida

Na referência [19] é utilizada uma modelagem baseada em redes neurais artificiais para identificação dos parâmetros dos circuitos do rotor de um turbogerador utilizando dados provenientes de diversas condições operativas. Uma vez que os parâmetros do circuito do rotor são funções não lineares das condições operativas do gerador, modelos de redes neurais são utilizados para mapear a não linearidade existente entre variáveis representativas da condição operativa da máquina (potência ativa e ângulo de carga) e os parâmetros dos circuitos do rotor. Inicialmente, os parâmetros do modelo linear da máquina são identificados usando a metodologia apresentada em [20], através de pequenas perturbações executadas no campo do gerador operando em carga leve e subexcitado. Os valores saturados das indutâncias L_{ad} e L_{aq} são identificados através de técnicas de mapeamento não linear utilizando redes neurais, a partir de dados provenientes de uma série de testes nos quais pequenas perturbações são aplicadas ao campo da máquina em diversas condições operativas. A seguir, cada parâmetro do circuito do rotor é modelado por uma rede neural artificial que possui a potência ativa e o ângulo de carga da máquina como entradas e o parâmetro que se deseja estimar como saída. Para treinamento das redes neurais são utilizados padrões construídos através de dados de medições coletados durante transitórios, assim como os parâmetros do rotor estimados através desses dados utilizando um método baseado no erro de saída (OEM, do inglês *Output-Error-Method*). Os estudos de validação comprovam que os modelos de redes neurais obtidos interpolam corretamente entre padrões não utilizados no processo de treinamento.

Valverde et al. [21,22] propõem uma técnica de identificação não linear de parâmetros para máquinas síncronas baseada em uma variação do Filtro de Kalman, denominada UKF (do inglês, *Uncented Kalman Filter*). A metodologia utiliza medições de tensão e corrente dos circuitos da armadura e do campo, assim como da velocidade angular do rotor durante períodos transitórios para atualização dos parâmetros do modelo da máquina síncrona. A transformada de Park é usada para representar as grandezas físicas do estator, medidas no sistema de eixo abc, nas equações não lineares da máquina no sistema de eixo dq. Essas equações são organizadas em uma representação em espaço de estados na qual é utilizado o filtro UKF. Todos os parâmetros e estados são simultaneamente estimados. Assim, os fluxos enlaçados e

correntes em todos os enrolamentos da máquina podem ser determinados. Destaca-se a não necessidade da medição do ângulo de carga da máquina, uma vez que essa grandeza pode ser estimada dentro do algoritmo de identificação do filtro UKF. A metodologia foi testada com dados provenientes de simulações de um modelo de turbogerador em regime permanente e transitório.

Kayhani et al. [20] apresentam uma metodologia para identificação dos parâmetros dos circuitos da armadura e dos circuitos do rotor de um gerador síncrono utilizando dados de simulações representados no sistema de eixo abc fixo no estator. A estrutura do modelo da máquina é assumida conhecida e pequenas perturbações no sistema de excitação do gerador são simuladas para gerar os dados utilizados no processo de identificação. A identificação dos parâmetros dos circuitos da armadura e do rotor é tratada como dois problemas distintos. No primeiro é utilizado o método da Verossimilhança Máxima Recursiva (VMR), ao passo que no segundo é utilizado um método OEM. Inicialmente, os parâmetros da armadura são estimados através da simulação de um sistema máquina x barra infinita. Com o gerador operando subexcitado e com carga leve, são desconsideradas as não linearidades decorrentes da saturação magnética. O sinal de referência do regulador de tensão é alterado em pequena intensidade e são coletadas as tensões e correntes nos circuitos da armadura e a corrente no circuito de campo. Também se faz necessária a medição do ângulo de carga da máquina, utilizado para referenciar as grandezas medidas ao sistema de eixo dq, o qual é utilizado no processo de identificação. Assumindo que as correntes nos enrolamentos amortecedores e a taxa de variação dos fluxos enlaçados na armadura são nulas, as equações de tensão da máquina são simplificadas e rearranjadas na forma de um sistema de equações lineares, no qual é utilizado o método VMR para identificação dos parâmetros da armadura. Para a identificação dos parâmetros dos circuitos do rotor, o mesmo sistema é simulado para diferentes níveis de perturbação no sistema de excitação e são incluídas as contribuições dos enrolamentos amortecedores e a variação dos fluxos enlaçados na armadura. As equações de tensão formam um sistema de equações diferenciais que são desacopladas de forma a criar subproblemas independentes para identificação dos parâmetros do eixo direto e do eixo em quadratura. Nestes subproblemas é utilizado um método de identificação baseado na minimização do erro de saída através do método iterativo de Gauss-Newton, sendo o esquema iterativo de identificação apresentado na Figura 10. Além disso, o processo de identificação foi

repetido com diferentes níveis de ruídos acrescidos aos sinais de medição, sendo observado que o método VMR obtém um bom desempenho mesmo para níveis elevados de ruídos, ao passo que o aumento da intensidade do distúrbio aplicado ao sistema de excitação melhora a desempenho do método OEM perante os sinais ruidosos.

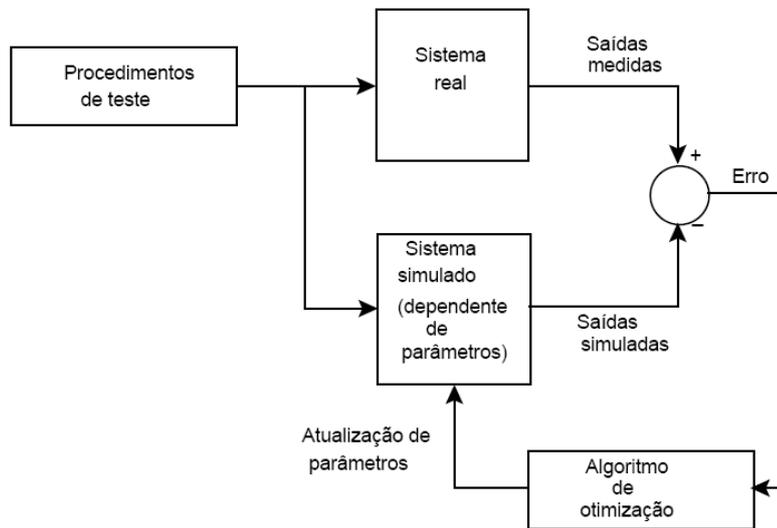


Figura 10: Procedimento padrão de estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos pelo método OEM (“Output Error Method”)

Na referência [23] Kayhani et al. propõem uma metodologia de identificação de parâmetros através de dados operacionais coletados durante a resposta do gerador a pequenos distúrbios no sistema de excitação. As dinâmicas são geradas por degraus de 2% a 5% no valor de tensão de referência do regulador de tensão, de forma que o teste pode ser executado repetidamente em vários pontos de operação sem afetar a estabilidade do sistema. O processo de identificação é dividido em duas partes. Na primeira parte, objetivando uma condição de operação não saturada para estimação dos parâmetros do modelo linear, a máquina é conduzida em carga leve e subexcitada. A partir dos dados de medições coletados durante os pequenos distúrbios no sistema de excitação da máquina, os parâmetros dos circuitos da armadura e do rotor são identificados através do método VMR, semelhante àquele apresentado na referência [20]. A segunda parte consiste na identificação de modelos para o fenômeno de saturação magnética. Os modelos selecionados no estudo baseiam-se na variação não linear das indutâncias L_{ad} e L_{aq} para um grande número de condições operativas.

Inicialmente, o método VMR é aplicado aos dados de medições coletados durante pequenas perturbações para identificação das indutâncias L_{ad} e L_{aq} para diversas condições operativas com a máquina saturada, enquanto que os demais parâmetros do modelo linear da máquina são mantidos fixos. Posteriormente, com base nesse histórico de identificações, os modelos de saturação são identificados através de um processo de ajuste de curva não linear. A validação dos modelos identificados é feita através da comparação entre o resultado de simulação e as medições coletadas em uma máquina síncrona de pólos salientes para distúrbios da ordem de 20% a 30% na tensão de referência do regulador de tensão.

Keyhani et al. combinaram em [24] as metodologias de identificação propostas em [23] e em [20]. O modelo de saturação magnética e os parâmetros dos circuitos do rotor são identificados utilizando técnicas de mapeamento não linear a partir de dados de medição coletados em diversas condições operativas. Desta forma, os efeitos da saturação magnética, posição do rotor e carregamento são incluídos no processo de identificação.

3.4.2 Modelagem tipo caixa preta

Na modelagem tipo caixa preta não se supõem conhecida a estrutura do modelo. O objetivo maior é estimar ou aproximar, com a maior precisão possível, o mapeamento entre o conjunto de entradas medidas e o conjunto de saídas medidas correspondentes.

Para sistemas dinâmicos lineares, existem diversas técnicas bem estabelecidas [11,25]. Por outro lado, identificação de sistemas não lineares, como, por exemplo, uma máquina síncrona (com saturação), ainda é assunto de pesquisa atual. Diversas abordagens têm sido desenvolvidas nos últimos anos, como mínimos quadrados não lineares, redes neurais, bases de *wavelets*, algoritmos genéticos e lógica *fuzzy* [26-30]. Estas ferramentas estão se mostrando úteis em diversas áreas de processamento de sinais e podem ainda se tornar importantes para modelagem e identificação de parâmetros de máquinas síncronas. Deve ser observado, porém, que uma das desvantagens de técnicas tipo caixa preta em geral é a dificuldade da interpretação física do sistema entrada-saída obtido.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO

PROPOSTA

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta para identificação dos parâmetros do modelo matemático de uma máquina síncrona utilizando dados operacionais. Dependendo da condição operativa da máquina síncrona quando da realização dos testes e coleta de dados, a metodologia assume duas configurações distintas. Quando a máquina síncrona se encontra operando subexcitada e em carga leve, ou seja, sem influência das não linearidades decorrentes da saturação do circuito magnético, o processo de identificação é dividido em dois subproblemas. No primeiro, os parâmetros da armadura são identificados utilizando o método da Verossimilhança Máxima Recursiva (VMR). Em seguida, os parâmetros dos circuitos do rotor são identificados utilizando Algoritmos Genéticos (AG). No caso da máquina estar operando na região não linear da curva de saturação, o método VMR não pode ser utilizado, e todos os parâmetros são identificados através do AG.

Ao longo do capítulo serão discutidos como o método VMR e os AGs foram utilizados no problema de identificação dos parâmetros da máquina síncrona. Por fim, será apresentado o esquema de identificação utilizado em cada configuração da metodologia proposta.

4.1. MÉTODO DA VEROSSIMILHANÇA MÁXIMA RECURSIVA (VMR)

Nesta seção é descrito o método da Verossimilhança Máxima Recursiva (VMR) para a estimação de parâmetros em sistemas lineares de equações. Destaca-se este método pelo fato de ser um dos mais utilizados no contexto de estimação paramétrica para máquinas síncronas, principalmente nos trabalhos de Keyhani e coautores [20, 23 e 24]. Em linhas gerais, para um sistema subdeterminado de equações lineares que, portanto, possui infinitas soluções, o método VMR fornece uma maneira de selecionar aquela solução que possui a probabilidade máxima de ser a solução desejada. Tecnicamente, algoritmos do tipo VMR computam estimativas consistentes de parâmetros a partir de dados corrompidos com ruído. Ou seja, as estimativas de métodos tipo VMR convergem aos valores verdadeiros dos parâmetros na medida em que o número de observações tende a infinito. Esta propriedade não é compartilhada por métodos de mínimos quadrados. Em condições onde se despreza o efeito da saturação do circuito magnético, o comportamento das variáveis de estado do circuito de armadura é descrito por um sistema linear de equações, ao qual se aplica o método VMR. Portanto, inicia-se a discussão com um sistema linear geral:

$$Y = H\theta + V \quad (31)$$

em que Y é o vetor de saídas do sistema, H é a matriz (estática) relacionando entradas e saídas, θ é o vetor de parâmetros a serem estimados, e V é o ruído nas medidas (das saídas), suposto Gaussiano e independente.

Sejam os dados no instante k denotados por Y_k e H_k . O método VMR utilizado para identificar o vetor de parâmetros parte do pressuposto que $\hat{\theta}_k$ e $\hat{\theta}_{k+1}$ são as estimativas de θ baseadas nas medidas até o instante $k + 1$ e segue os passos detalhados a seguir:

- i. A variância do ruído (σ_k) e a sua média (m_k) são atualizadas de acordo com (32) e (33), respectivamente.

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k + \frac{1}{k+1} \left[\frac{k}{k+1} (Y_{k+1} - m_k)^2 - \sigma_k \right] \quad (32)$$

$$m_{k+1} = m_k + \frac{1}{k+1} (Y_{k+1} - m_k) \quad (33)$$

ii. A covariância do erro é atualizada de acordo com:

$$R_{k+1} = R_k - R_k H_{k+1} \left(H_{k+1}^T R_k H_{k+1} + \sigma_{k+1} \right)^{-1} H_{k+1}^T R_k \quad (34)$$

iii. A estimativa de θ é atualizada de acordo com:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + R_{k+1} H_{k+1} \sigma_{k+1}^{-1} \left(Y_{k+1} - H_{k+1}^T \hat{\theta}_k \right) \quad (35)$$

Observações:

1. Nas recursões acima, as condições iniciais são $\theta_0=0$ e R_0 com valor grande (por exemplo, igual a αI , sendo α um número positivo grande), o que implica na suposição natural de grande incerteza no valor inicial θ_0 .
2. A filosofia geral na ordem das atualizações recursivas é a utilização sistemática dos valores mais atuais disponíveis, o que se observa, especificamente, na atualização da covariância do erro R_k e da estimativa $\hat{\theta}_k$.

4.1.1 Estimação dos parâmetros da armadura pelo método VMR

Adotam-se as seguintes premissas: a máquina encontra-se operando subexcitada, em carga leve e conectada a um sistema de energia elétrica. Desta forma, o efeito da saturação é suprimido e a máquina é assumida ter um comportamento linear. O gerador é provido de malhas de controle de tensão e velocidade.

O objetivo é identificar os parâmetros do gerador síncrono com a máquina em operação no sistema elétrico, ou seja, com as duas malhas de regulação fechadas como mostrado na Figura 11. Uma vantagem da utilização do método VMR para identificação dos parâmetros da armadura é que as incertezas de parâmetros nos modelos nos reguladores de tensão e velocidade, na excitatriz, na turbina e no sistema de energia elétrica (SEE) não influenciam o processo de identificação, uma vez que o método é baseado em equações que envolvem apenas os parâmetros do modelo da máquina e dados de medição coletados neste equipamento.

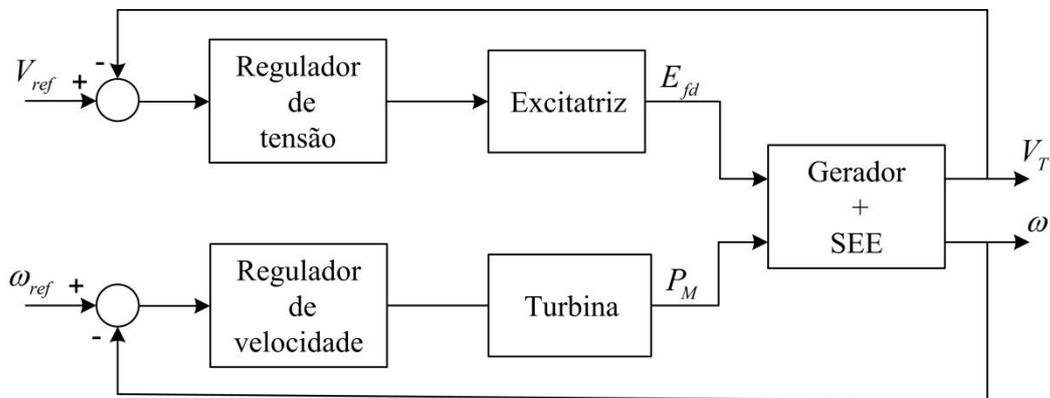


Figura 11: Malhas de controle de tensão e velocidade

Na operação em regime permanente os seguintes fenômenos podem ser desconsiderados:

- Efeito dos enrolamentos amortecedores: $i_{1d} = i_{1q} = 0$.
- Efeitos transitórios no estator: $d\lambda_d/dt = d\lambda_q/dt = 0$.

Assim, as equações de tensão do estator apresentadas na Tabela 1 podem ser manipuladas de forma a se obter:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_d & 0 & \omega \cdot i_q & 0 \\ -i_q & \omega \cdot i_{fd} & 0 & -\omega \cdot i_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_a \\ L_{ad} \\ L_q \\ L_d \end{bmatrix} \quad (36)$$

Comparando-se (36) com (31) e considerando a ausência de ruídos de medição, nota-se que o vetor Y é formado pelas medições de tensão terminal da máquina, H depende das medições da corrente de armadura, corrente de campo e velocidade angular, e o vetor θ é formado pelos parâmetros do modelo linear da armadura a serem identificados.

Quando são adicionados ruídos aos sinais de medição, (36) torna-se (37):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_d & 0 & \omega \cdot i_q & 0 \\ -i_q & \omega \cdot i_{fd} & 0 & -\omega \cdot i_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_a \\ L_{ad} \\ L_q \\ L_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

em que ε é o vetor de ruído das medidas, considerado gaussiano e de média nula. Uma das formas de se avaliar o desempenho do método VMR é diminuindo o valor da relação de amplitude sinal/ruído SNR (do inglês *Signal to Noise Ratio*).

4.2. ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)

A motivação da utilização do AG surgiu das dificuldades encontradas na utilização do método VMR na identificação dos parâmetros do rotor e na inclusão do efeito da saturação do circuito magnético da máquina.

O problema da identificação dos parâmetros dos circuitos do rotor de uma máquina síncrona por meio de dados operacionais é de complexidade muito maior que a identificação dos parâmetros do estator. Além do maior número de parâmetros, há a impossibilidade prática de medição dos sinais nos enrolamentos amortecedores, fazendo com que o grau de observabilidade do problema seja deficiente. Esses fatores dificultam a utilização de algoritmos baseados em uma única estimativa inicial, os quais podem obter frequentemente mínimos locais, devido a não convexidade da função objetivo e do ponto de partida da busca. Somente através de um ponto de partida próximo da solução, desde que não haja solução local na direção de busca, poderia ser alcançada a solução ótima do problema. Uma forma de superar essas dificuldades é a utilização de um método que independa do comportamento da função ao longo do espaço de busca e possa obter as melhores soluções sem convergir para soluções locais com evidente robustez.

Uma ferramenta computacional desenvolvida em 1962 por John Henry Holland [31], fundamentada na teoria da evolução das espécies de Darwin e conhecida com Algoritmos Genéticos (AG), tem sido amplamente utilizada na resolução de problemas complexos de otimização, principalmente porque apresenta flexibilidade de uso, relativa simplicidade de implementação e eficácia em realizar busca global em ambientes adversos. Por essas e outras características, o AG foi utilizado no problema de identificação dos parâmetros dos circuitos do rotor.

Uma abordagem teórica completa sobre AG é encontrada em [31], onde a forma original do AG é descrita. Em [32-34] novas técnicas são apresentadas. Além disso, outras publicações e livros são listados em [35], que é uma coletânea bibliográfica sobre o assunto. No Anexo A são apresentadas algumas das principais características dos AGs, além da descrição de todas as técnicas utilizadas no AG implementado neste trabalho.

4.2.1 Identificação dos parâmetros do circuito do rotor utilizando AG

Uma das grandes motivações da utilização do AG é sua facilidade de integração à aplicação que se deseja otimizar. Muitos algoritmos de otimização requerem um alto grau de interconexão entre a aplicação e a definição da função objetivo. O AG, por sua

vez, possui uma interface simples, necessitando apenas da habilidade de propor uma solução e receber a sua avaliação, como exemplificado na Figura 12.

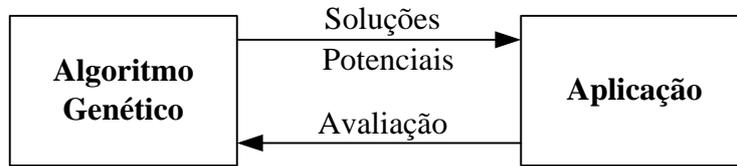


Figura 12: Interação do AG com aplicações

O AG necessita da informação do valor da função objetivo para cada indivíduo da população (candidato a solução), sendo esta, na maioria dos casos, a função que se deseja minimizar ou maximizar. A função objetivo fornece, para cada indivíduo, uma métrica de quão próximo da solução ele está, ou seja, para um problema de minimização, quanto menor o valor da função objetivo, maior a probabilidade do indivíduo sobreviver no ambiente e reproduzir-se, passando parte de seu material genético para gerações posteriores (novas soluções).

A integração do AG ao problema da identificação dos parâmetros de uma máquina síncrona é apresentada no diagrama da Figura 13. O sistema a ser identificado é representado de forma fidedigna através de seu modelo matemático para estudos de estabilidade eletromecânica com todos os equipamentos representados com seus parâmetros verdadeiros, sendo um deles a máquina síncrona cujos parâmetros deseja-se identificar. As grandezas necessárias ao processo de identificação, representadas no diagrama pelo vetor de medições Y , são resultados de simulações dinâmicas ou medições realizadas em campo na máquina conectada ao sistema elétrico. Fazendo analogia a um problema prático de estimação de parâmetros, a parte do diagrama delimitada pela linha tracejada representa o sistema real, cujos sinais de interesse são as medições das grandezas físicas realizadas em campo através de medidores instalados na máquina síncrona.

Paralelamente ao modelo matemático com os parâmetros verdadeiros do sistema a ser identificado, tem-se um modelo idêntico em que se assume, intencionalmente, que os parâmetros transitórios e subtransitórios da máquina sob estudo são desconhecidos.

O bloco denominado “Entrada” é composto pelos dados de entrada do fluxo de potência e garante que os dois sistemas estejam, na condição pré-distúrbio, no mesmo ponto de operação. O bloco “Evento” indica que os dois sistemas são submetidos a um mesmo distúrbio durante a simulação dinâmica, enquanto os símbolos Y e \hat{Y} representam, respectivamente, medições coletadas no modelo da máquina com parâmetros verdadeiros, e no modelo cujos parâmetros estão sendo estimados. Através da comparação dos sinais Y e \hat{Y} é possível observar a influência dos parâmetros do rotor na resposta da máquina síncrona.

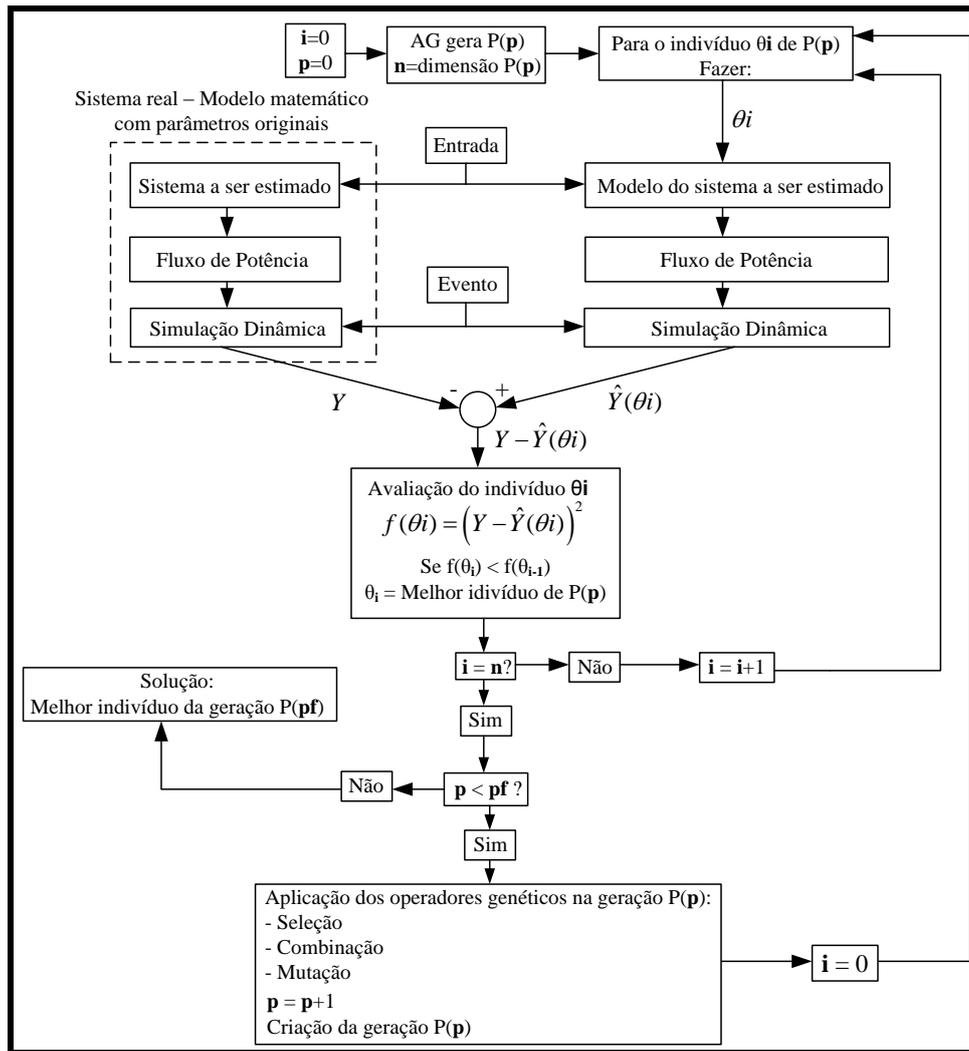


Figura 13: Diagrama esquemático do processo de identificação, em que:

i =contador de indivíduos; **p** =contador de população/geraçāo; **pf** =índice correspondente à última geraçāo (critério de parada); **n** =dimensāo da populaçāo; **θ** =indivíduo/cromossomo; **Y** =resultado da simulaçāo dinâmica com os parâmetros verdadeiros; **\hat{Y}** =resultado da simulaçāo dinâmica com os parâmetros identificados.

O AG é configurado de tal forma que cada indivíduo é a representaçāo codificada de um vetor formado pelos parâmetros que estāo sendo identificados. Através da definiçāo de valores máximos e mínimos para cada parâmetro é estabelecida uma regiāo de busca a partir da qual o AG gera a populaçāo de indivíduos. Para cada indivíduo da populaçāo é realizada uma simulaçāo dinâmica e o vetor \hat{Y} é comparado com o vetor Y obtido na simulaçāo do modelo do sistema com os parâmetros originais.

Através da diferença $Y-\hat{Y}$ é avaliada a adequabilidade de cada indivíduo da população. Após a avaliação de todos os indivíduos, se o critério de parada não for satisfeito, é dado início a formação de uma nova população, utilizando-se os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação. Cada indivíduo da nova geração deve ser avaliado, dando origem a um processo cíclico que termina quando o critério de parada é satisfeito, sendo a melhor solução dada pelo indivíduo de maior adequabilidade da última população processada.

Diferentemente do método VMR, o processo de identificação dos parâmetros do rotor da máquina síncrona utilizando AGs é influenciado pelas incertezas nos parâmetros dos modelos do regulador de tensão e do regulador de velocidade, do estabilizador de sistema de potência, da turbina, da excitatriz, e do sistema de energia elétrica, uma vez que esses modelos são utilizados na simulação dinâmica para comparação com os sinais de referência. Por outro lado, é possível incluir no processo de identificação qualquer um dos parâmetros que compõem o modelo do sistema simulado. No entanto, neste trabalho o AG foi utilizado apenas para identificação de parâmetros de geradores síncronos.

4.2.2 Definição da função adequabilidade

A avaliação de cada indivíduo resulta num valor que, em inglês, é denominado *fitness*; no português é chamado de adequabilidade ou aptidão. No problema estudado, o objetivo é a minimização do erro de identificação, que, por sua vez, é função da diferença $Y - \hat{Y}(\theta_i)$ para cada indivíduo θ_i . Quanto maior o valor da adequabilidade de um indivíduo, menor será a diferença $Y - \hat{Y}(\theta_i)$, de forma que a função adequabilidade pode ser entendida como o inverso da função objetivo que se deseja minimizar. Ao longo deste trabalho, o termo “resíduo” será usado como referência ao valor da função objetivo, de forma que o indivíduo de menor resíduo corresponderá àquele de maior adequabilidade da população.

Definindo os vetores de medição Y e \hat{Y} como sendo:

$$Y = [M_1 \quad M_2 \quad \dots \quad M_n]^T \quad (38)$$

$$\hat{Y}(\theta_i) = [\hat{M}_1(\theta_i) \quad \hat{M}_2(\theta_i) \quad \dots \quad \hat{M}_n(\theta_i)]^T \quad (39)$$

em que M indica os sinais medidos na simulação do sistema com parâmetros verdadeiros e $\hat{M}(\theta_i)$ os sinais medidos na simulação realizada com o indivíduo θ_i , a função objetivo e a função adequabilidade são dadas pelas equações (40) e (41), respectivamente.

$$f_{OBJ}(\theta_i) = Resíduo(\theta_i) = \sum_{j=1}^n [Y_{j1} - \hat{Y}_{j1}(\theta_i)]^2 \quad (40)$$

$$f_{ADQB}(\theta_i) = \frac{1}{f_{OBJ}(\theta_i)} \quad (41)$$

4.2.3 Características do AG utilizado

No AG utilizado neste trabalho o espaço de busca permanece fixo ao longo das gerações e a primeira geração é criada aleatoriamente. A representação cromossômica é feita por meio de codificação binária, discretizando o intervalo contínuo onde os valores das variáveis estão contidos. As populações são formadas por um número fixo de indivíduos, com cromossomos também de tamanho constante. Cada indivíduo é constituído de um único cromossomo, razão pela qual é comum utilizar os termos “cromossomo” e “indivíduo” indistintamente ao longo do trabalho.

A técnica de seleção de torneio com três indivíduos foi utilizada juntamente com uma estratégia elitista de quatro indivíduos. O escalonamento linear da função adequabilidade foi utilizado para controlar a pressão seletiva. Para os demais operadores genéticos, foram utilizadas as técnicas de cruzamento de dois pontos e uma taxa de mutação constante. O critério de parada é baseado na determinação de um número máximo de gerações.

Com base no conhecimento dos valores típicos dos parâmetros de máquinas síncronas, foi adotada uma estratégia heurística para auxiliar o AG na busca pelas melhores soluções através de regras criadas para validação de indivíduos. Essas regras, representadas pelas desigualdades apresentadas na Tabela 5, são aplicadas a cada indivíduo da população. No caso do conjunto de parâmetros representado por um determinado indivíduo não atender a pelo menos uma das desigualdades, o indivíduo é eliminado do processo evolutivo através de sua associação forçada a um valor nulo de adequabilidade.

Tabela 5: Regras utilizadas para validação dos indivíduos

$X_d > X'_d$	$X'_d > X_l$	$X'_d > X''_d$	$T'_{do} > T''_{do}$	$T'_{do} > T''_{qo}$
--------------	--------------	----------------	----------------------	----------------------

4.3 METODOLOGIA PROPOSTA COM GERADOR SUBEXCITADO (NÃO SATURADO)

A primeira configuração da metodologia proposta parte do pressuposto de que os ensaios foram realizados com a máquina síncrona subexcitada, com carga leve e submetida a uma pequena perturbação no sinal de referência do regulador de tensão. Essas hipóteses devem ser verdadeiras para que as simplificações apresentadas na seção 4.1.1 sejam válidas e o método VMR possa ser utilizado.

A Figura 14 apresenta de forma gráfica a metodologia de identificação, que utiliza as medições das correntes e tensões do estator (i_a, i_b, i_c, v_a, v_b e v_c), da corrente de campo (i_{fd}) e da velocidade do rotor (ω). O ângulo de carga (δ) é obtido utilizando-se o valor de X_q fornecido pelo fabricante do gerador. As medições são inicialmente utilizadas para estimação dos parâmetros da armadura (R_a, X_d, X_q e X_l) através do método da VMR. Uma vez estimados os parâmetros da armadura, estes se juntam às medições realizadas, para que os parâmetros transitórios e subtransitórios ($X'_d, X''_d, T'_{do}, T''_{do}$ e T''_{qo}) sejam estimados através do AG.

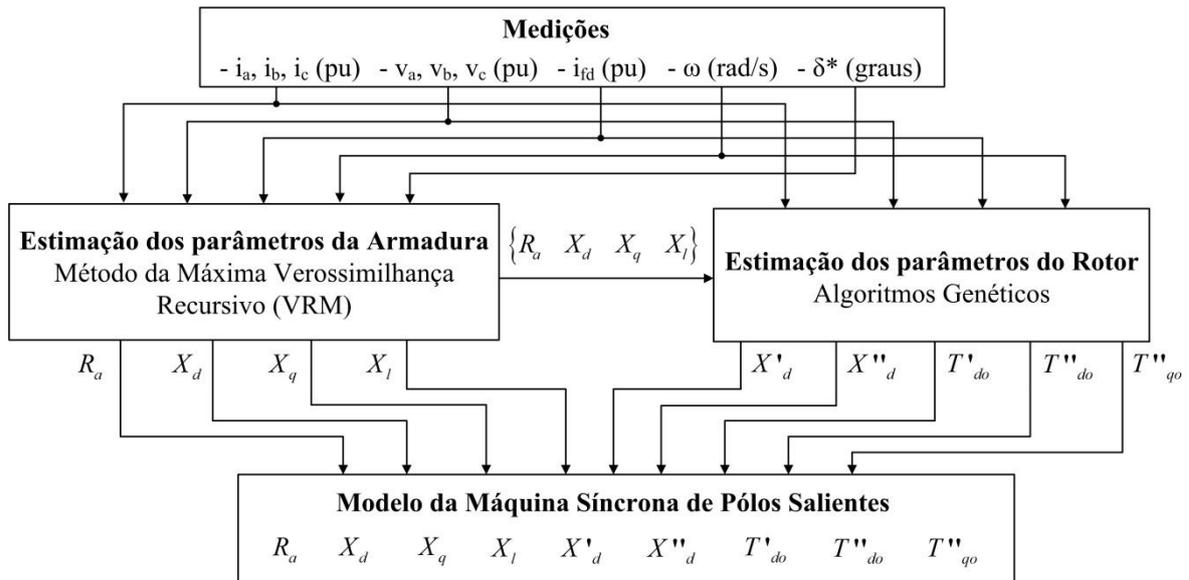


Figura 14: Metodologia proposta com gerador subexcitado

4.4. METODOLOGIA PROPOSTA COM GERADOR SATURADO

Na situação em que o gerador se encontra operando na região não linear da curva de saturação, a hipótese de linearidade do sistema não pode ser adotada, e com isso o método VMR apresenta resultados não satisfatórios. Se esse for o caso, a configuração proposta na Figura 14 é modificada, de modo que todos os parâmetros, da armadura e do rotor, sejam identificados pela utilização do AG, conforme apresentado na Figura 15. Nesse caso, não há necessidade de se definir o ângulo de carga (δ), a priori, uma vez que o mesmo é definido no próprio processo de identificação dos parâmetros.

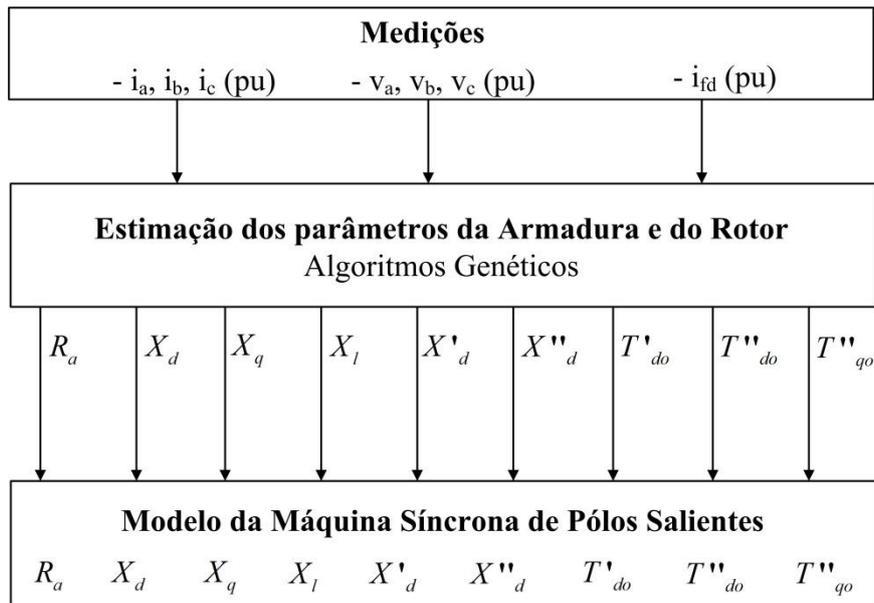


Figura 15: Metodologia proposta com gerador saturado

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

A metodologia de identificação apresentada no capítulo anterior foi testada em três sistemas para identificação de parâmetros de geradores síncronos de pólos salientes. Inicialmente os testes de identificação foram realizados com dados de simulações, cujos resultados são apresentados na seção 5.1. Posteriormente, foi realizado um estudo de caso prático em que foram utilizados dados de medições, conforme pode ser verificado na seção 5.2.

O primeiro sistema utilizado para testes consiste em um gerador conectado a um barramento infinito e foi fundamental para que a metodologia final fosse tomando forma, uma vez que novas idéias eram facilmente testadas. O segundo sistema é conhecido como WSCC [2], sendo composto por três geradores e nove barras. O terceiro, e mais importante, é o sistema da UHE Luiz Carlos Barreto, de propriedade de Furnas. Nesse sistema a metodologia não somente foi testada com dados de simulações, como também com dados de medições reais obtidos de uma das unidades geradoras que foram modernizadas recentemente.

5.1. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZANDO DADOS DE SIMULAÇÃO ELETROMECCÂNICA

Para o desenvolvimento e consolidação da metodologia proposta, inicialmente os testes de identificação foram realizados com dados derivados de simulações eletromecânicas.

Cabe ressaltar que em todas as simulações apresentadas nesta seção não foi utilizada a representação da saturação magnética no modelo matemático das máquinas

síncronas, resultando em pontos de operação sempre na região linear da curva de saturação. Como abordado na seção 4.1.1, essa condição operativa é necessária para que o método VMR apresente resultados satisfatórios e pode ser facilmente reproduzida em campo com a máquina operando subexcitada e com carga leve.

Na seção 5.1.1 é apresentado o resultado da identificação dos parâmetros da armadura do gerador do sistema teste desenvolvido no ambiente Matlab/Simulink através do método VMR. O mesmo método é utilizado para identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados provenientes de simulações dinâmicas realizadas nos programas Anatem e Simulight, conforme apresentado na seção 5.2.1. Nas seções 5.2.3 e 5.2.4 o AG é utilizado para identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 dos sistemas WSCC e UHE Luiz Carlos Barreto.

5.1.1. Identificação dos parâmetros da armadura do gerador do sistema Máquina x Barra Infinita

O sistema teste, apresentado na Figura 16, foi construído no Matlab/Simulink, através da utilização de modelos pré-definidos de máquina síncrona, regulador de tensão e regulador de velocidade. Esse sistema, constituído de um hidrogerador conectado a um barramento infinito, foi de fundamental importância para testar o método VMR aplicado ao problema da identificação dos parâmetros da armadura da máquina síncrona. Os dados do gerador síncrono de pólos salientes são apresentados na Tabela 6, enquanto, na Tabela 7, têm-se os resultados do fluxo de potência e inicialização da máquina.

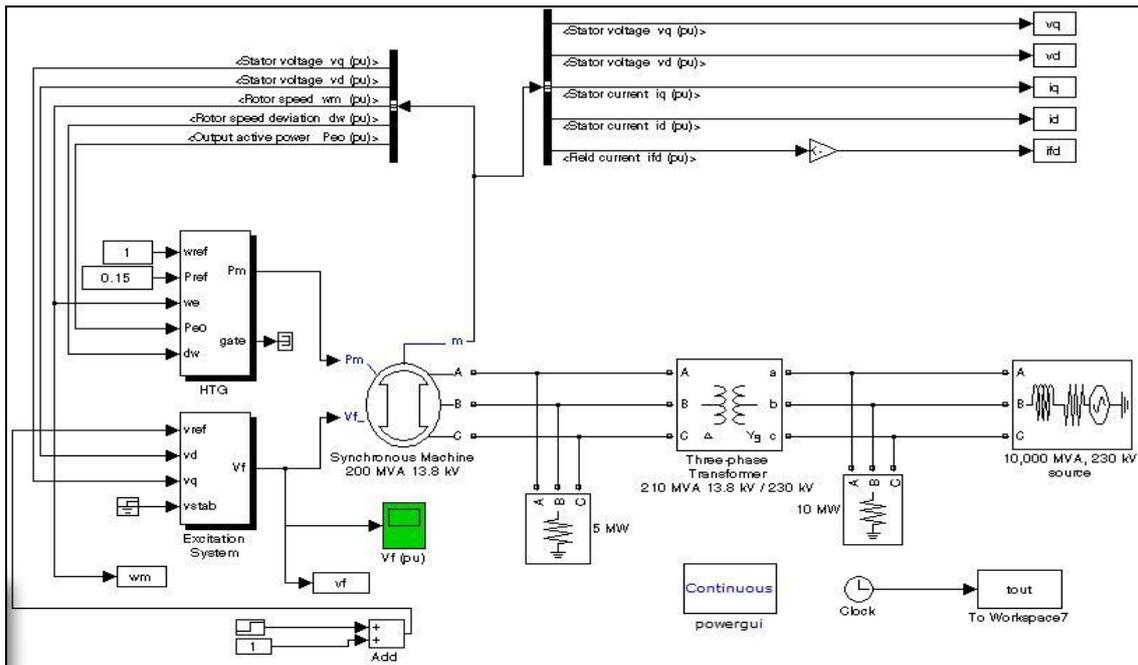


Figura 16: Sistema máquina x barra infinita construído no Matlab/Simulink

Tabela 6: Dados do gerador síncrono de pólos salientes do sistema máquina x barra infinita

Dados do gerador síncrono					
Potência (MVA)	200	R_a (pu)	0,0028544	T'_d (s)	1,01
Tensão (kV)	13,8	H (s)	3,2	T''_d (s)	0,053
Frequência [Hz]	60	Polos	32	T'_{q0} (s)	0,1
X_d (pu)	1,305	X''_d (pu)	0,252	X''_q (pu)	0,243
X'_d (pu)	0,296	X_q (pu)	0,474	X_l (pu)	0,18

Tabela 7: Fluxo de potência e inicialização do gerador do sistema máquina x barra infinita

Fluxo de Potência & Inicialização da máquina	
Tipo de barra	PV
Fase Van	-28,83 °
Vab	1 (pu) 1,17 °
Vbc	1(pu) -118,83°
Vca	1(pu) 121,17°
Ia	0,15 (pu) -28,05°
Ib	0,15 (pu) -148,05°
Ic	0,15 (pu) 91,95°
P	0,15 (pu)
Q	-0,002 (pu)
Vf	1,0091 (pu)

Pelo resultado do fluxo de potência e inicialização da máquina, nota-se que o gerador se encontra operando subexcitado e em carga leve, não sendo influenciado pela saturação do circuito magnético. Além disso, com a simulação de um degrau de pequena intensidade na tensão de referência do regulador de tensão, as simplificações propostas na seção 4.1.1 são válidas, e as equações de tensão da máquina podem ser reescritas na forma do sistema linear apresentado em (36), ao qual é aplicado o método VMR para identificação do vetor de parâmetros.

Foi realizada uma simulação dinâmica de 12s, em que no instante $t=3s$ é aplicado um degrau de +0,2% no sinal de referência do regulador de tensão (V_{ref}). Para utilização no processo de identificação, foram coletados os sinais de tensão e corrente de eixo direto e eixo em quadratura, corrente de campo e velocidade angular da máquina, em p.u., como pode ser observado nas Figuras 17 e 18.

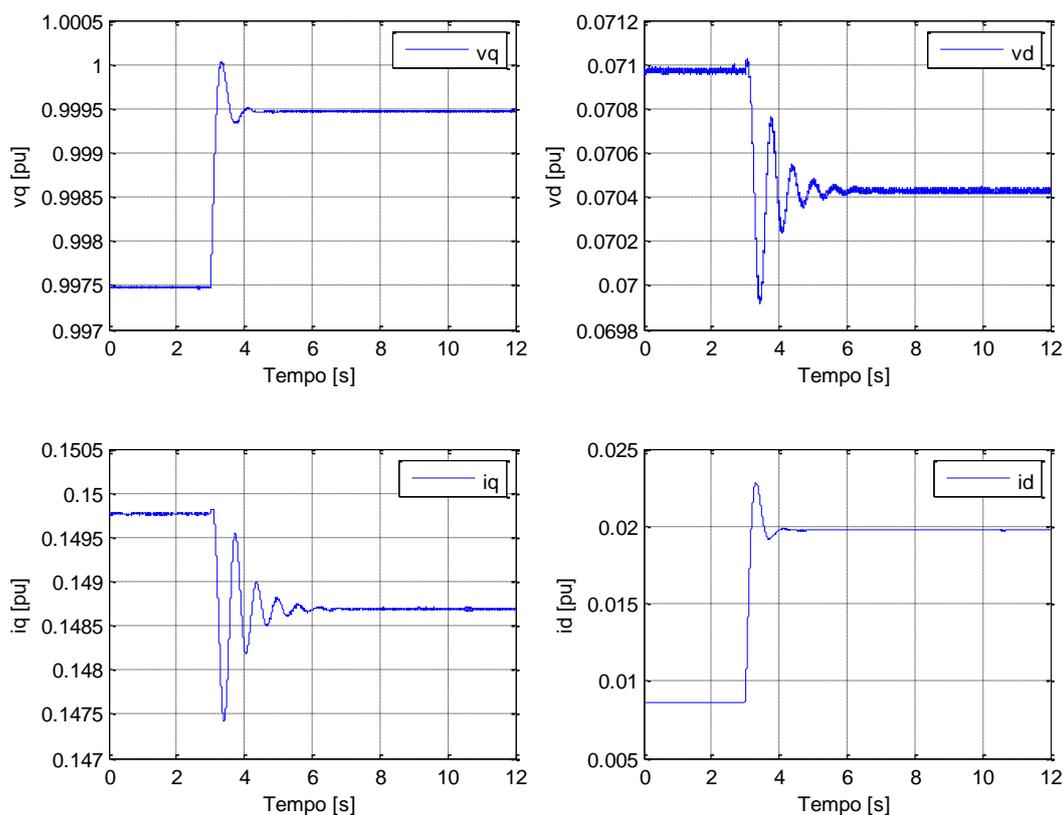


Figura 17: Resposta de i_d , i_q , v_d e v_q ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita.

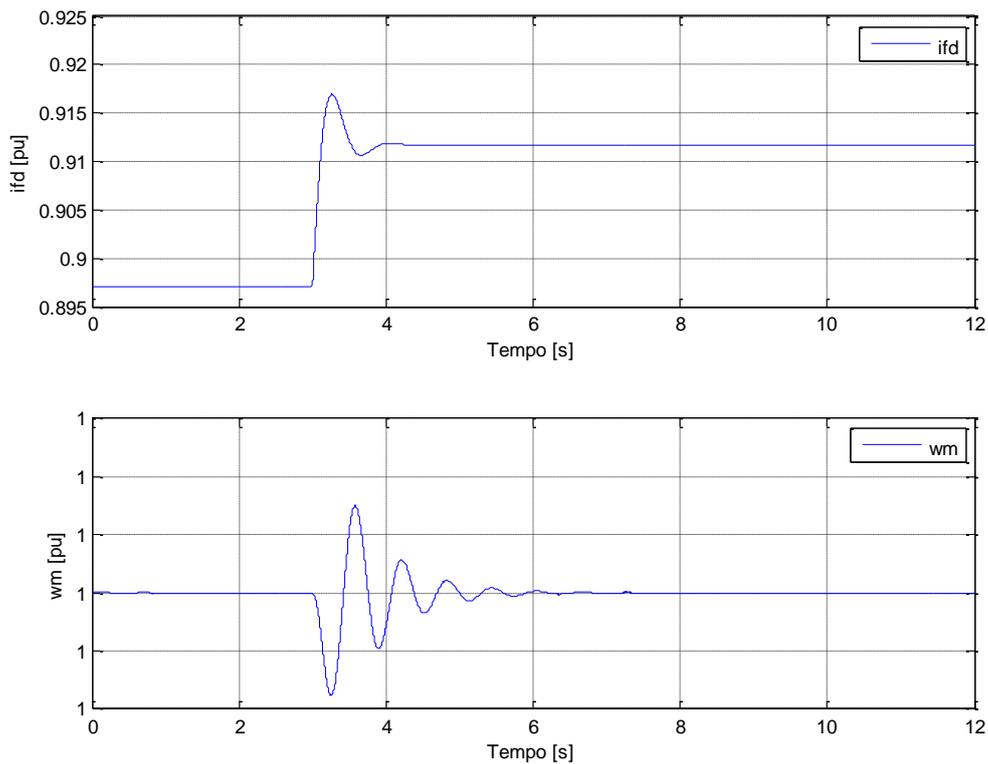


Figura 18: Resposta de i_{fd} e ω_m ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita

Sabe-se que os dados de medição obtidos em ensaios de máquinas são corrompidos por ruídos. O erro intrínseco dos medidores, o processo de conversão CA para CC do sistema de excitação e as interferências eletromagnéticas são alguns dos fatores que contribuem para a poluição dos dados. Para analisar o efeito dos ruídos no processo de identificação, os dados de simulação foram corrompidos pela adição de ruído branco de distribuição gaussiana com média zero e covariância determinada pela relação de amplitude sinal/ruído (SNR, do inglês *Signal to Noise Ratio*), expressa em dB. O valor do parâmetro SNR, que é inversamente proporcional ao nível de ruído acrescido às medições, foi variado para avaliar a robustez do método de identificação perante os sinais ruidosos. Como exemplo, nas Figuras 19 e 20 podem ser observados os sinais utilizados no processo de identificação corrompidos por um ruído de 50 dB de SNR.

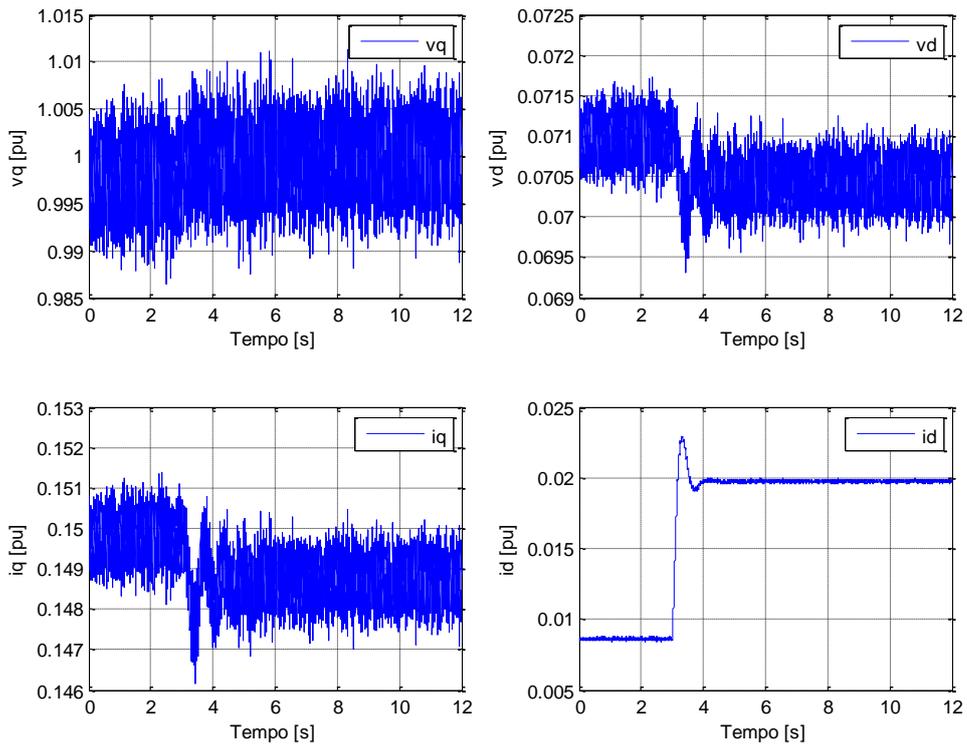


Figura 19: Resposta de i_d , i_q , v_d e v_q ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita com ruído de 50 dB de SNR.

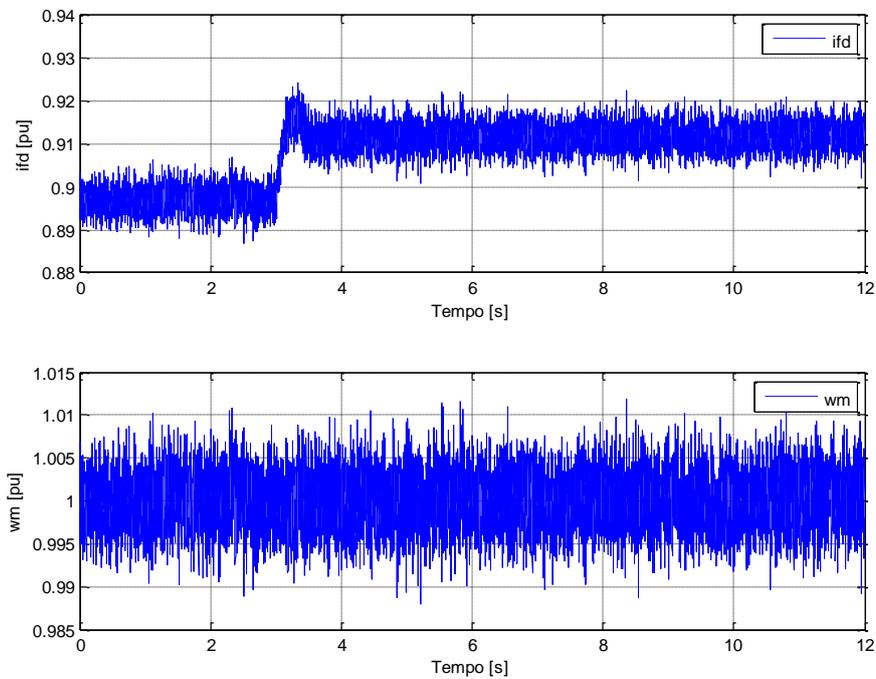


Figura 20: Resposta de i_{fd} e ω_m ao degrau em V_{ref} no gerador do sistema máquina x barra infinita com ruído de 50 dB de SNR.

Apenas os dados de regime permanente foram utilizados para a identificação dos parâmetros. Ou seja, o período compreendido entre os instantes $t=3s$ e $t=8s$ da simulação não foi utilizado no método VMR. Essa manipulação de dados é coerente com as simplificações propostas na seção 4.1.1 e garantem um melhor desempenho do método de identificação.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados do processo de identificação. Podem ser observados os valores originais de cada parâmetro (azul), os valores identificados (preto) e seus respectivos erros associados (vermelho) para diferentes níveis de ruídos acrescidos aos dados de simulação.

Tabela 8: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do gerador do sistema máquina x barra infinita a partir de simulação dinâmica desconsiderando os dados de regime transitório

Caso		R_a [pu]	L_{ad} [pu]	L_q [pu]	L_d [pu]
Valores iniciais		0	0	0	0
Valores reais		2.8544e-003	1.1250e+000	4.7400e-001	1.3050e+000
Sem ruído	Estimado	2.8323e-003	1.1250e+000	4.7402e-001	1.3050e+000
	Erro %	7.7518e-001	9.9510e-005	-4.3229e-003	-2.0936e-003
SNR=500	Estimado	2.8323e-003	1.1250e+000	4.7402e-001	1.3050e+000
	Erro %	7.7518e-001	9.9510e-005	-4.3229e-003	-2.0936e-003
SNR=100	Estimado	2.8311e-003	1.1250e+000	4.7402e-001	1.3050e+000
	Erro %	8.1650e-001	1.3679e-004	-4.2765e-003	-1.8894e-003
SNR=50	Estimado	-5.3218e-002	1.1153e+000	4.6752e-001	1.2836e+000
	Erro %	1.9644e+003	8.6235e-001	1.3664e+000	1.6380e+000

O método de identificação apresenta bons resultados para níveis de ruído de até 50 dB de SNR; exceto para o valor identificado da resistência de armadura, que apresenta desejável exatidão para ruídos de SNR de até 100 dB. O desempenho do método pode ser avaliado nas Figuras 21 a 24, nas quais é possível observar o valor identificado para cada parâmetro ao longo do processo recursivo (azul) em relação ao valor original (vermelho) para um ruído de 100 dB de SNR acrescido aos dados de simulação.

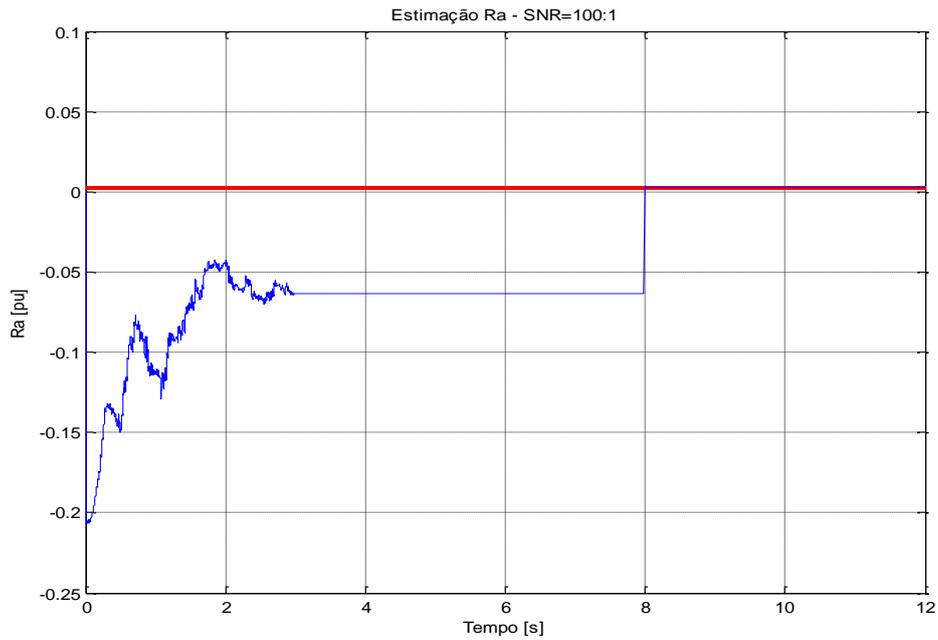


Figura 21: Identificação de R_a do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.

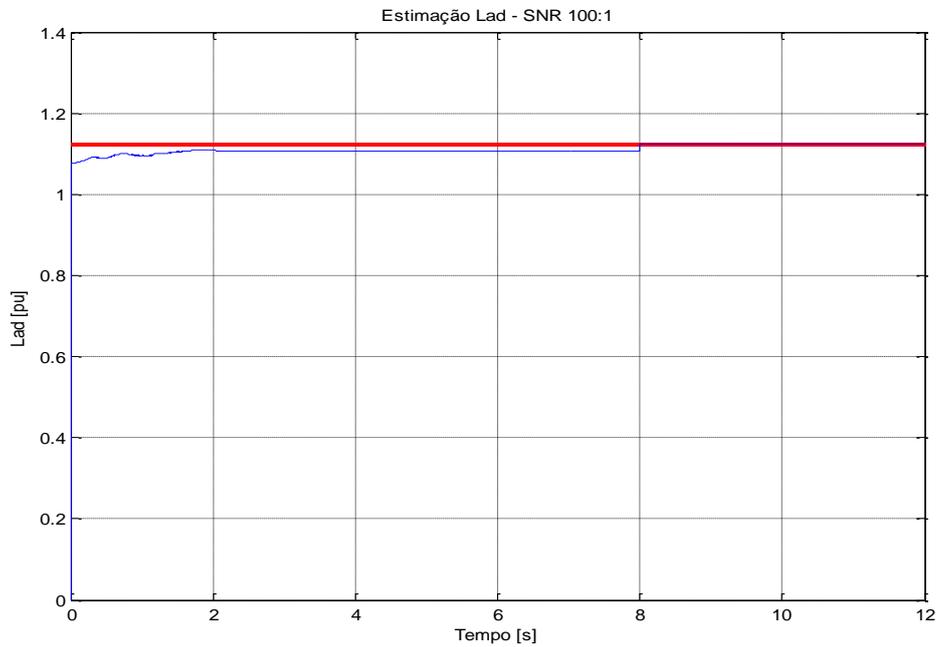


Figura 22: Identificação de L_{ad} do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.

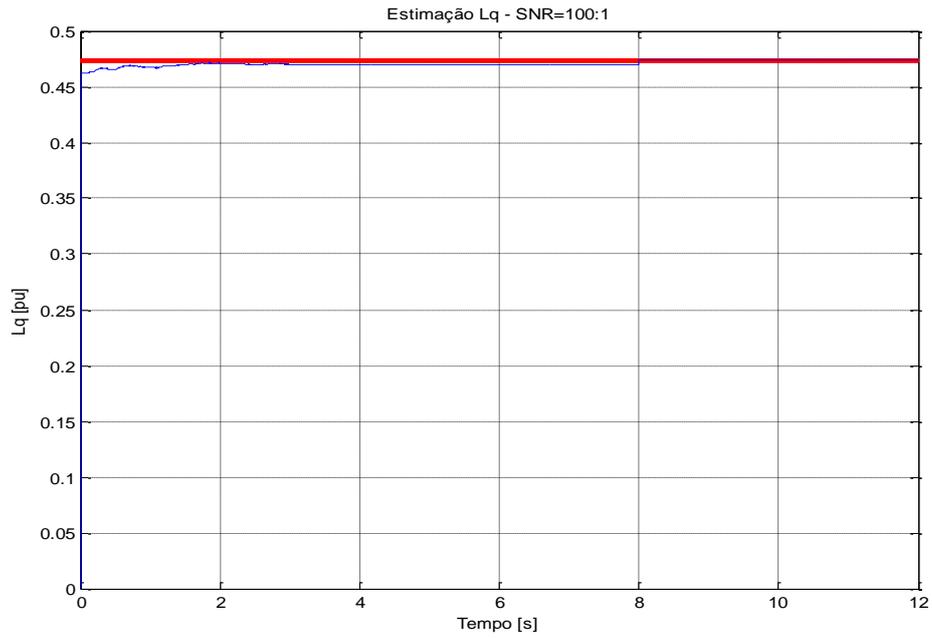


Figura 23: Identificação de L_q do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.

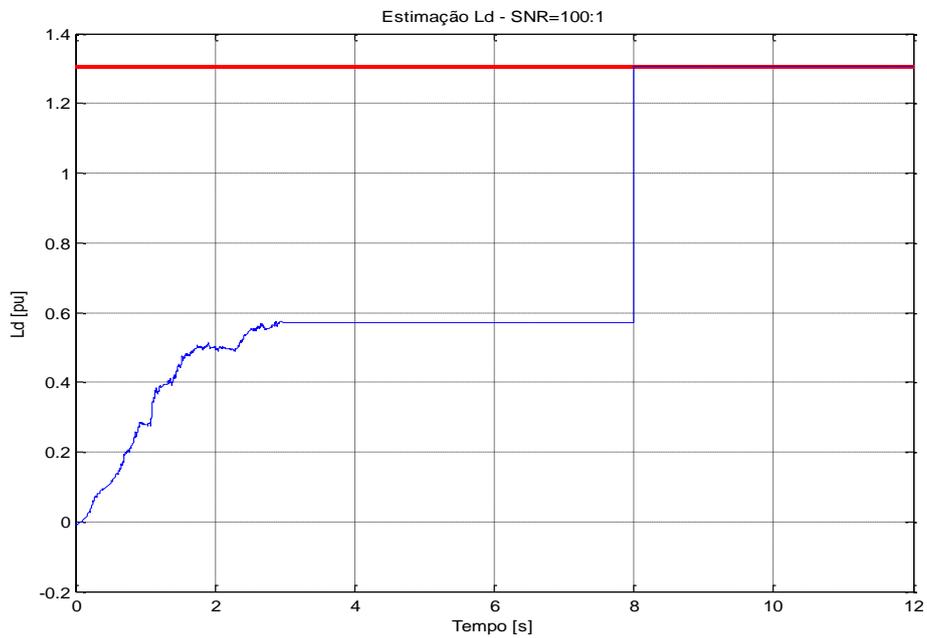


Figura 24: Identificação de L_d do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB desprezando os dados do período transitório.

Nas Figuras 21 a 24 a máquina encontra-se em regime permanente desde o início da simulação até o instante $t=3s$. Nesse período, anterior à perturbação, o método responde muito bem para os valores estimados de L_q e L_{ad} que, já nos primeiros pontos processados, apresentam-se significativamente próximos de seus valores originais. No caso dos parâmetros R_a e L_q a evolução é mais lenta e é possível observar claramente o efeito dos ruídos nos instantes iniciais. A partir do instante $t=3s$ inicia-se o período transitório e o estimador é desligado até o instante $t=8s$. Quando ligado novamente, após a máquina atingir um novo ponto de equilíbrio, todos os parâmetros convergem rapidamente para as proximidades de seus respectivos valores verdadeiros.

A Tabela 9 apresenta o resultado do processo de identificação quando não são suprimidos os dados do período transitório. Neste caso não é obtida uma boa identificação para a resistência da armadura (parâmetro de menor magnitude) mesmo na condição de ausência de ruídos nos resultados da simulação. Além disso, os erros de identificação são ligeiramente maiores quando se comparado ao cenário em que os dados de regime transitório não foram utilizados. Nas Figuras 25 a 28, é possível observar o valor identificado para cada parâmetro ao longo do processo recursivo (azul) em relação ao valor original (vermelho) para um ruído de 100 dB de SNR.

Tabela 9: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do gerador do sistema máquina x barra infinita a partir de simulação dinâmica considerando os dados de regime transitório.

Caso		R_a [pu]	L_{ad} [pu]	L_q [pu]	L_d [pu]
Valores iniciais		0	0	0	0
Valores reais		2.8544e-003	1.1250e+000	4.7400e-001	1.3050e+000
Sem ruído	Estimado	1.8785e-003	1.1246e+000	4.7392e-001	1.2968e+000
	Erro %	3.4188e+001	3.2868e-002	1.6491e-002	6.2666e-001
SNR=100	Estimado	1.8750e-003	1.1246e+000	4.7392e-001	1.2968e+000
	Erro %	3.4311e+001	3.2940e-002	1.6596e-002	6.2717e-001
SNR=50	Estimado	-9.1712e-002	1.1085e+000	4.6191e-001	1.2614e+000
	Erro %	3.3130e+003	1.4653e+000	2.5497e+000	3.3442e+000

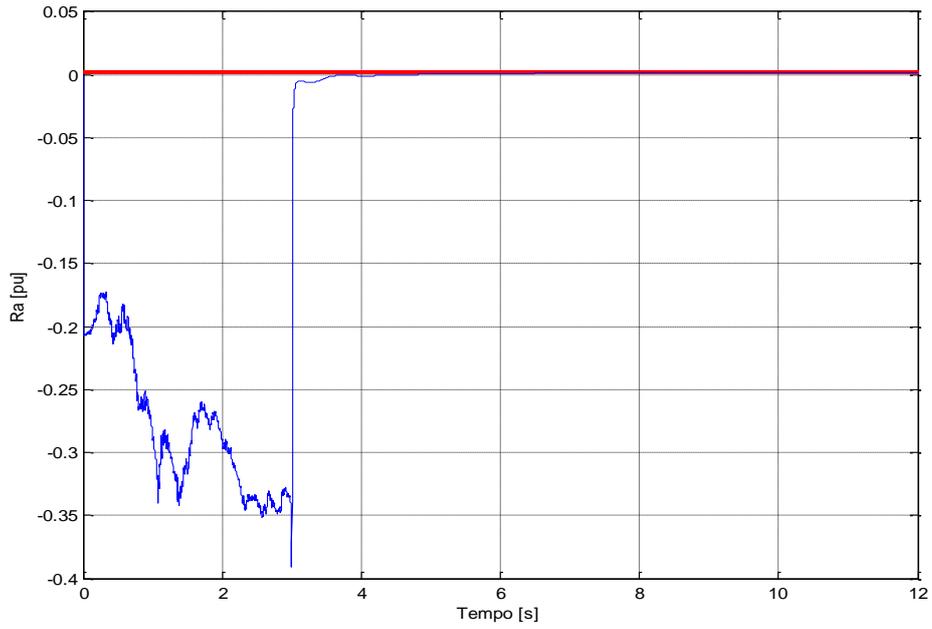


Figura 25: Identificação de R_a do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB considerando os dados do período transitório.

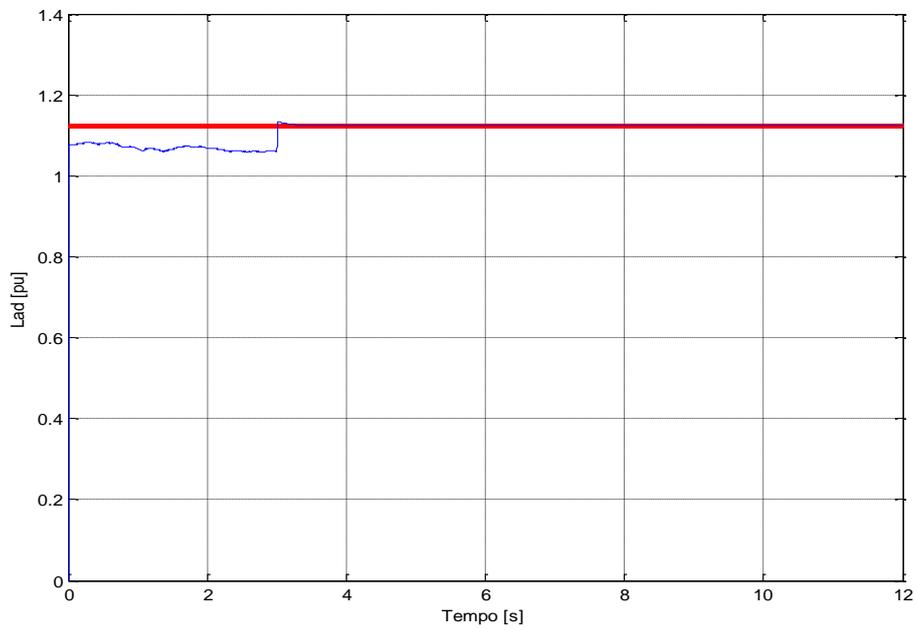


Figura 26: Identificação de L_{ad} do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB considerando os dados do período transitório.

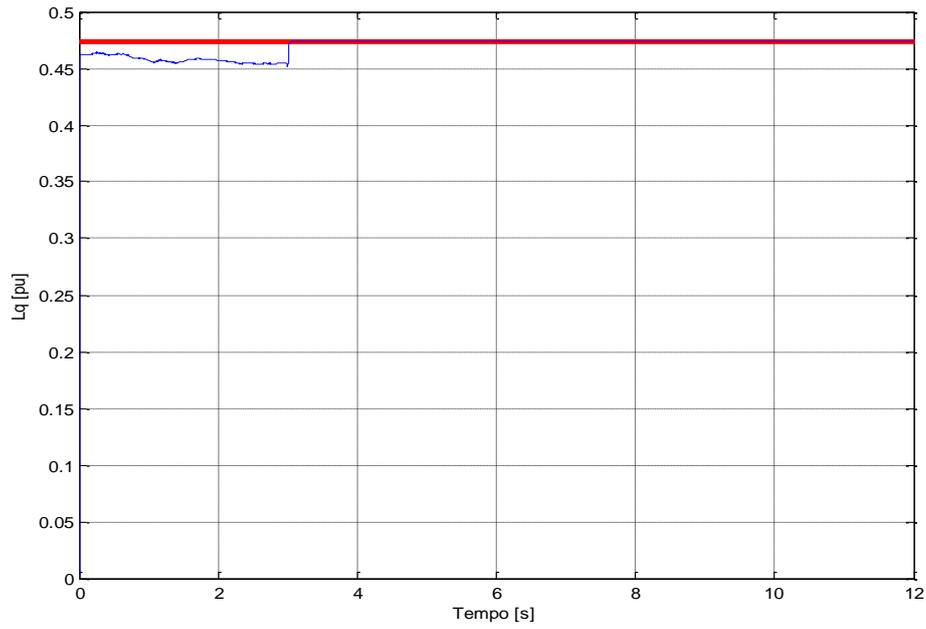


Figura 27: Identificação de L_q do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB considerando os dados do período transitório

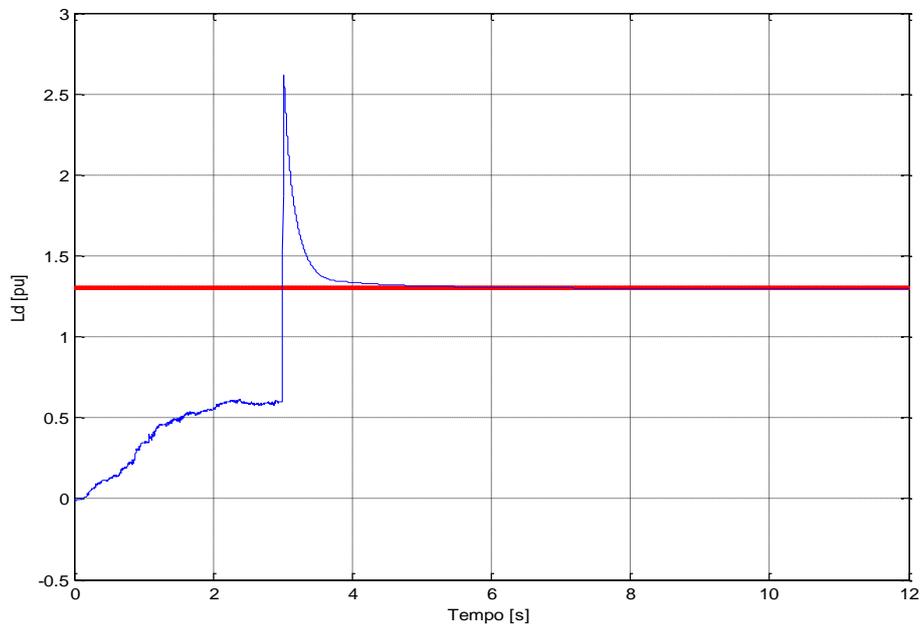


Figura 28: Identificação de L_d do gerador do sistema máquina x barra infinita ao longo do processo recursivo com ruído de SNR=100 dB e considerando os dados do período transitório

5.1.2. Identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto

Após a utilização do sistema desenvolvido no ambiente Matlab/Simulink, prosseguiu-se com a aplicação do método VMR para identificação dos parâmetros da armadura de um dos geradores síncronos da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados coletados de simulações eletromecânicas.

A UHE Luiz Carlos Barreto possui seis geradores síncronos de pólos salientes conectados ao SIN por meio de três linhas de transmissão. Nas simulações de transitórios eletromecânicos foram representados os seis geradores juntamente com suas malhas de controle de velocidade e de tensão (conforme apresentado no Anexo B), os transformadores elevadores, as linhas de transmissão que conectam a usina ao SIN e uma barra infinita com uma carga equivalente, conforme diagrama unifilar da Figura 29.

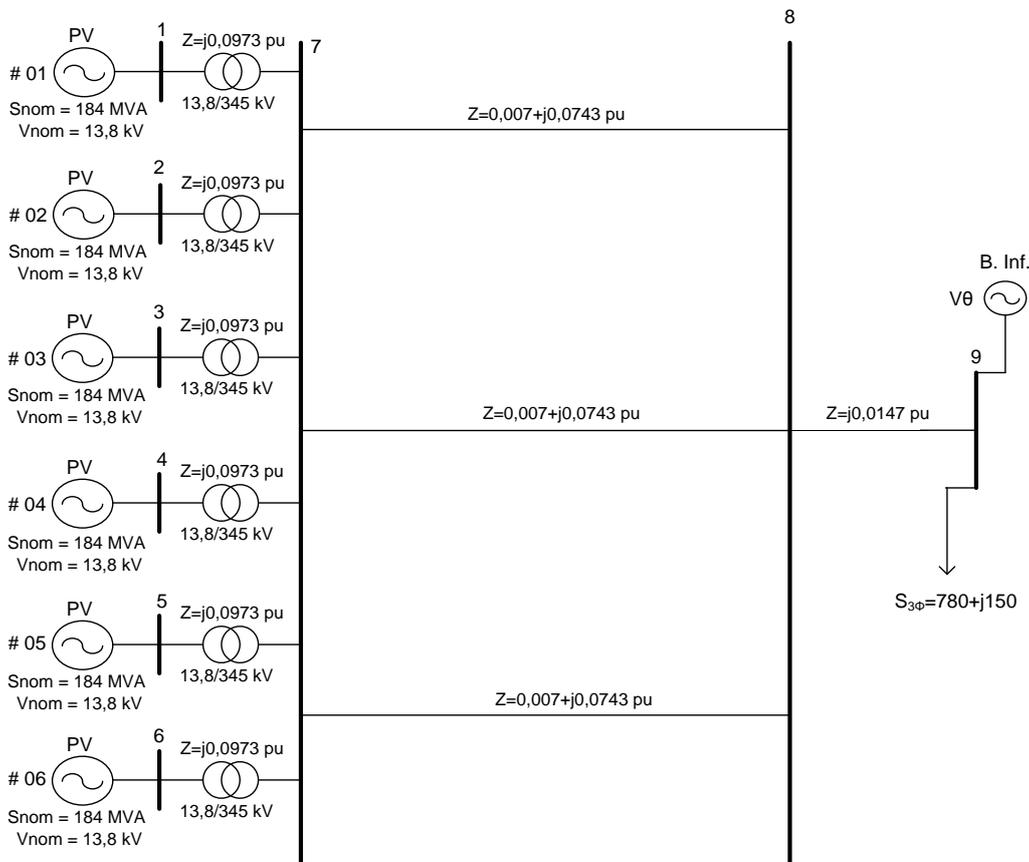


Figura 29: Diagrama unifilar do sistema UHE Luiz Carlos Barreto.

Os valores dos parâmetros dos modelos matemáticos dos equipamentos e malhas de controle foram extraídos dos arquivos *.CDU e *.BLT fornecidos por FURNAS para simulação dinâmica no programa Anatem [36]. Mais informações sobre o modelo do sistema de excitação das máquinas da UHE Luiz Carlos Barreto podem ser encontradas nas referências [37-39].

O Gerador #01 foi a máquina escolhida para estimação dos parâmetros da armadura e seus dados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Dados do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto.

Dados do Gerador #01					
Potência (MVA)	184	X_d (pu)	0,9359	X''_d (pu)	0,215
Tensão (kV)	13,8	X_q (pu)	0,59	T'_{do} (s)	5,6
H (s)	4,3	X_l (pu)	0,185	T''_{do} (s)	0,02
R_a (pu)	0	X'_d (pu)	0,24	T''_{qo} (s)	0,05

Para realização das simulações foram utilizados os programas Anatem [36] e Simulight [40,41], sendo que neste último a metodologia foi testada com simulações trifásicas em condições equilibradas e desequilibradas.

5.1.2.1 Identificação através de simulações eletromecânicas realizadas no Anatem

Foi realizada uma simulação dinâmica contemplando apenas a sequência positiva do sistema em condições equilibradas. O evento simulado foi um degrau na tensão de referência do regulador de tensão do Gerador #01. A Tabela 11 apresenta a condição operativa do Gerador #01 antes e após o período transitório, assim como os detalhes do evento simulado.

Tabela 11: Condição operativa do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto antes e após o período transitório na simulação pelo Anatem.

	Antes do distúrbio	Após o distúrbio
Potência Ativa	130,00 (MW) / 0,707 (pu)	130,00 (MW) / 0,707 (pu)
Potência Reativa	23,75 (MVar) / 0,129 (pu)	25,57 (MVar) / 0,139 (pu)
Tensão Terminal	13800 (V) / 1,000 (pu)	13827 (V) / 1,002 (pu)
Corrente de Armadura	5529 (A) / 0,718 (pu)	5532 (A) / 0,718 (pu)
Frequência	60 (Hz)	60 (Hz)
Tensão de Excitação	1,284 (pu)	1,293 (pu)
Corrente de Excitação	1,710 (pu)	1,722 (pu)
Distúrbio	Degrau de +0,2% em Vref no Gerador #01 ; t=3(s)	

As Figuras 30 a 35 apresentam os sinais coletados no Gerador #01 que foram utilizados no método VMR para identificação dos parâmetros da armadura.

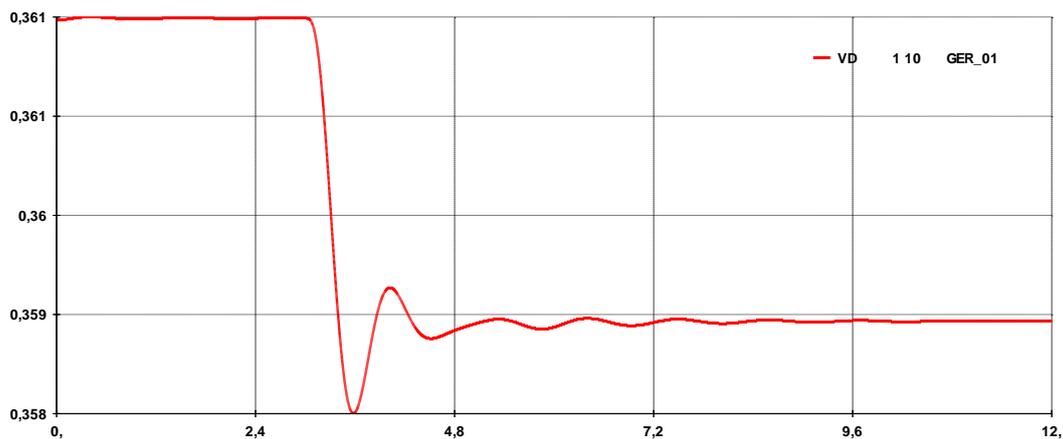


Figura 30: Resposta de v_d (pu) ao degra em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.

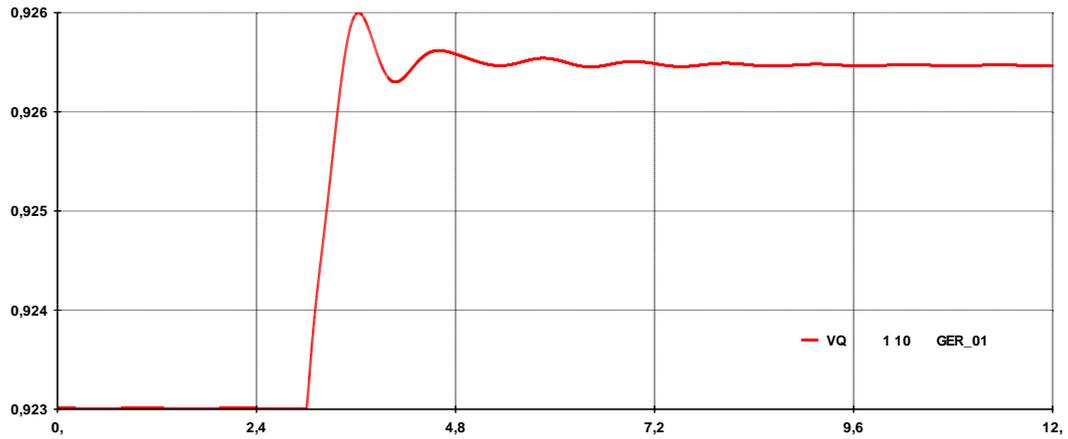


Figura 31: Resposta de v_q (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.

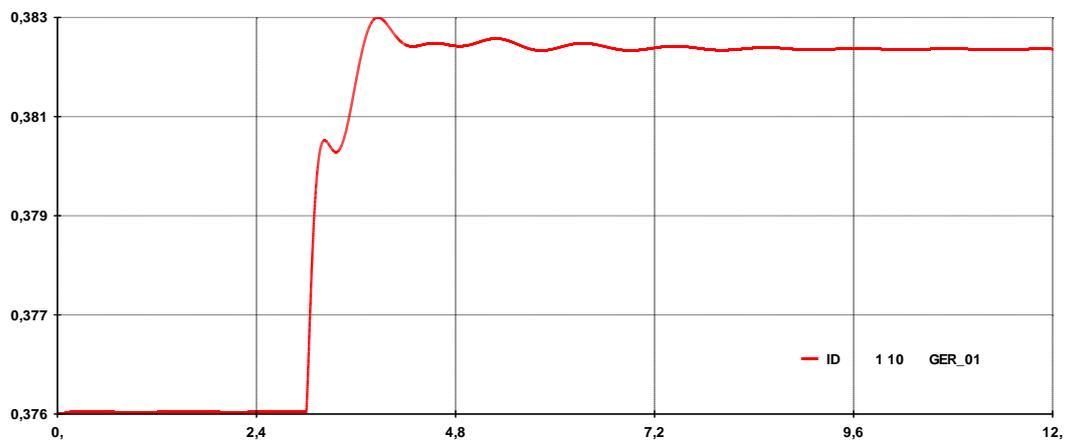


Figura 32: Resposta de i_d (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.

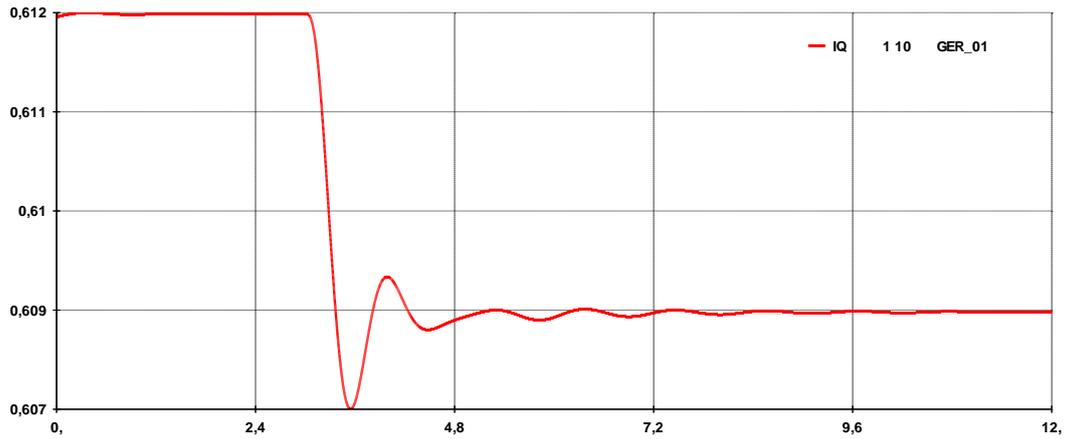


Figura 33: Resposta de i_q (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.

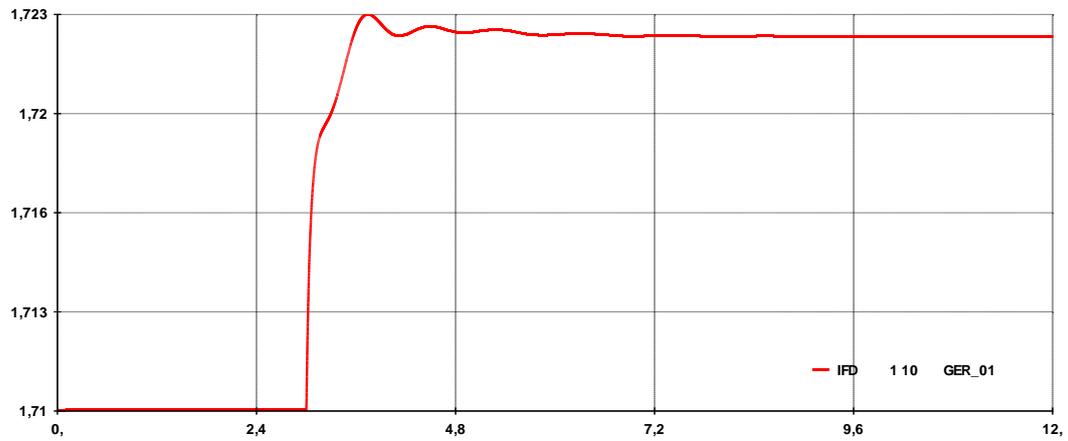


Figura 34: Resposta de i_{fd} (pu) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.

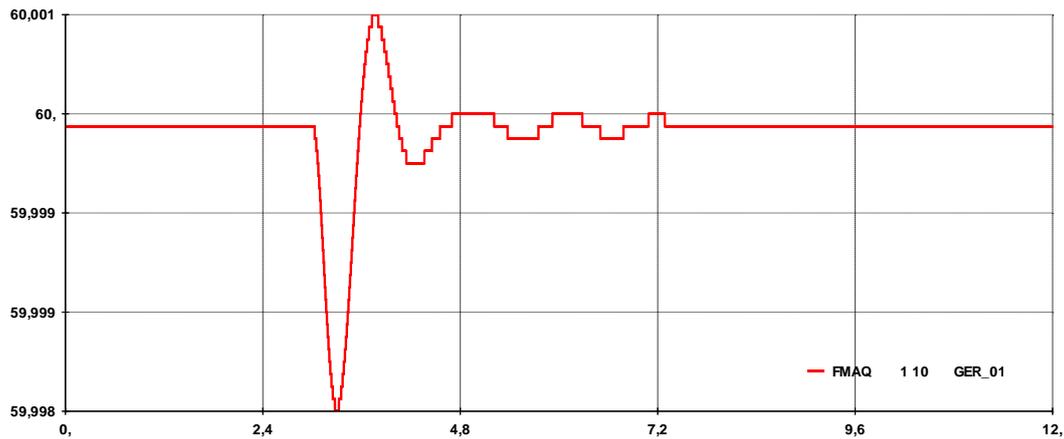


Figura 35: Resposta da frequência (Hz) ao degrau em V_{ref} no Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação realizada no Anatem.

A Tabela 12 apresenta o resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 para ruídos de diferentes níveis de SNR acrescentados aos dados de simulação. Os dados do período transitório não foram utilizados no processo recursivo de identificação. Observa-se que o método possui uma boa exatidão para dados corrompidos com ruído de até 100 dB de SNR, apresentando o maior erro de identificação na ordem de 2%.

Tabela 12: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação dinâmica realizada no Anatem

Caso		R_a [pu]	L_{ad} [pu]	L_q [pu]	L_d [pu]
Condição Inicial		0	0	0	0
Valores reais		0	7.5090e-01	5.9000e-01	9.3590e-01
Sem ruído	Estimado	1.4280e-0050	7.4240e-01	5.9001e-01	9.2263e-01
	Erro %	-	-1.1320e+00	1.6949e-03	-1.4179e+00
SNR=500	Estimado	1.4280e-005	7.5082e-001	5.9001e-001	9.6052e-001
	Erro %	-	1.0221e-002	-2.2693e-003	-2.6305e+000
SNR=100	Estimado	-4.0082e-006	7.5080e-001	5.9000e-001	9.6044e-001
	Erro %	-	1.3503e-002	-2.8490e-004	-2.6219e+000
SNR=50	Estimado	-4.2663e-001	5.1534e-001	4.8013e-001	1.7903e-001
	Erro %	-	3.1371e+001	1.8622e+001	8.0871e+001

O desempenho do método para o cenário em que não foram adicionados ruídos aos dados de simulação pode ser verificado nas Figuras 36 a 39, nas quais se pode observar o valor identificado para cada parâmetro ao longo do processo recursivo (azul) em relação ao seu valor original (vermelho). A máquina encontra-se em regime permanente desde o início da simulação até o instante $t=3s$, a partir do qual o estimador é “desligado” até o instante $t=9s$. Quando “ligado” novamente, após a máquina atingir um novo ponto de equilíbrio, todos os parâmetros convergem rapidamente para as proximidades de seus respectivos valores verdadeiros.

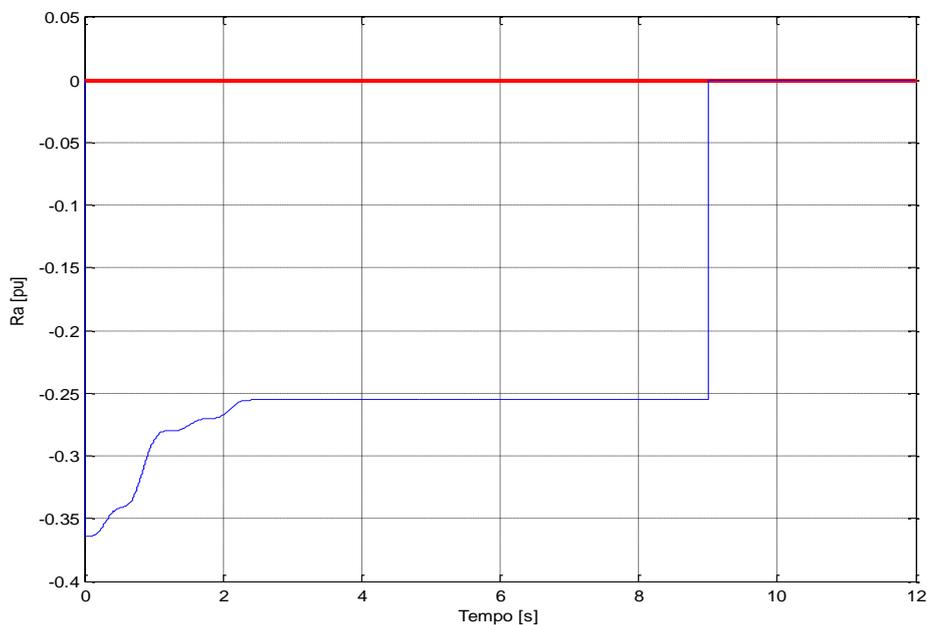


Figura 36: Identificação de R_a do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem

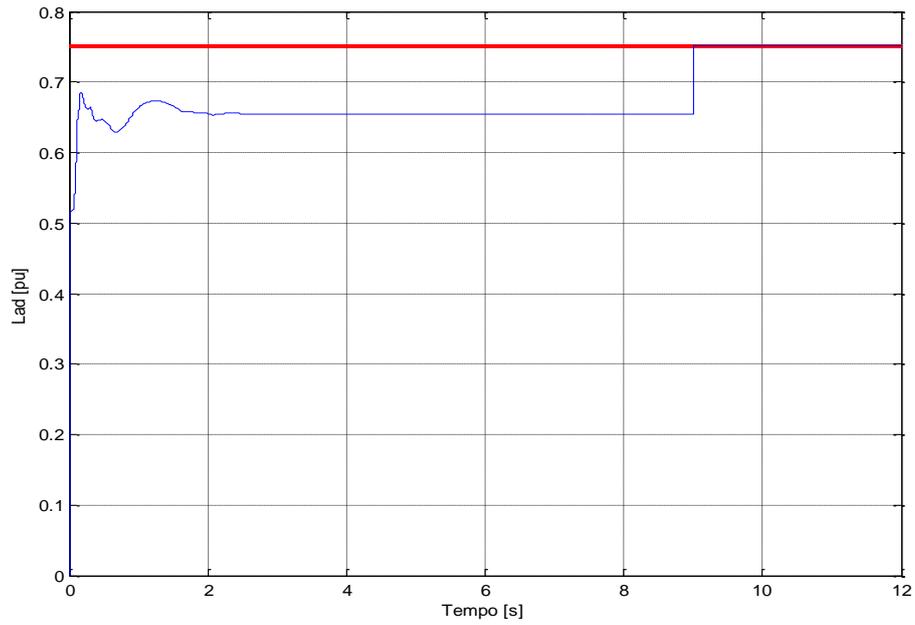


Figura 37: Identificação de L_{ad} do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem

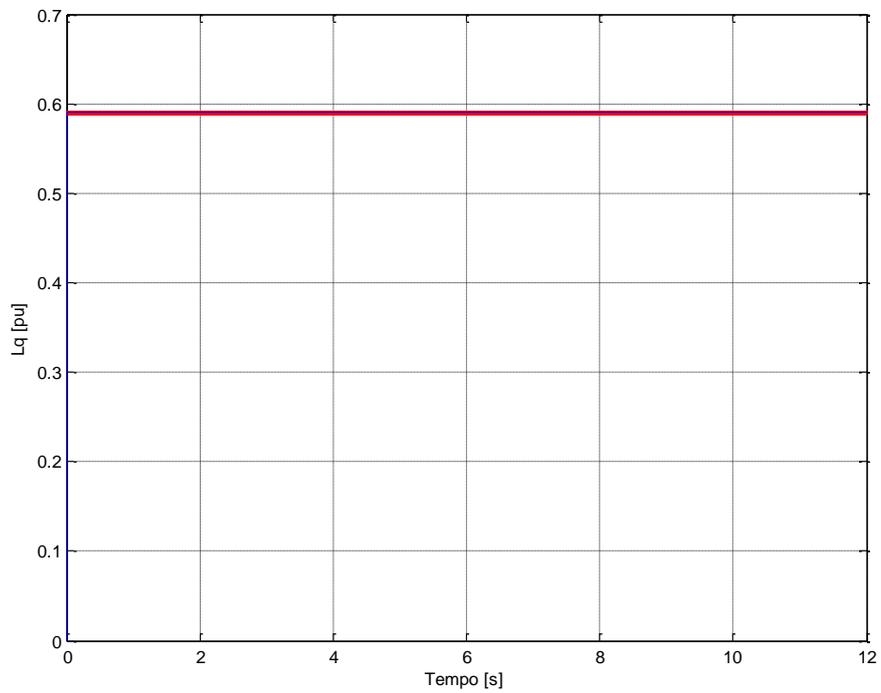


Figura 38: Identificação de L_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem

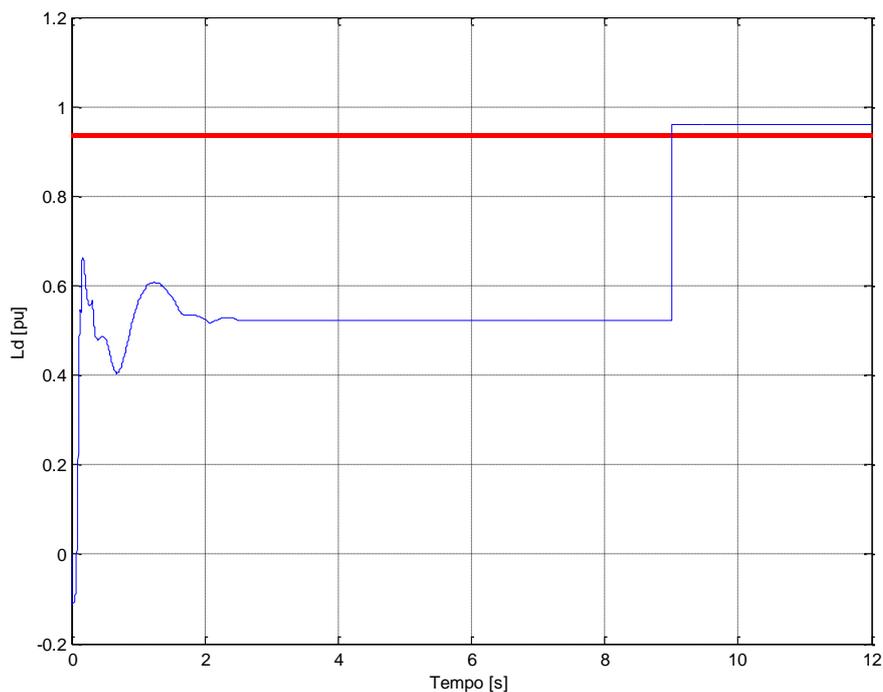


Figura 39: Identificação de L_d do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação realizada no Anatem

5.1.2.2 Validação Anatem x Simulight

O programa Simulight [40,41], desenvolvido pela COPPE em uma série de projetos P&D ANEEL com a empresa Light S.E.S.A., permite a realização de simulações trifásicas de estabilidade eletromecânica em sistemas de energia elétrica [42]. Essa característica, em especial, apresenta-se bastante interessante para o estudo de identificação de parâmetros de máquinas síncronas através de dados operacionais, uma vez que o resultado trifásico da simulação representa de forma mais fidedigna a realidade física das medições realizadas em máquinas elétricas operando conectadas ao sistema elétrico. Além disso, permite a identificação dos parâmetros da máquina por meio de simulações do sistema elétrico em condições desequilibradas.

O Simulight, por se tratar de um programa relativamente recente, não possui a mesma disseminação do Anatem no que diz respeito às simulações dinâmicas de

sistemas de energia elétrica. Portanto, nesta seção, visando apresentar ao leitor o desempenho do Simulight, é feita uma comparação entre respostas de uma simulação dinâmica de sequência positiva do sistema UHE Luiz Carlos Barreto (Figura 29) realizada em ambos os programas. Para tanto, com o suporte dos arquivos dinâmicos do Anatem e das referências [37-39], todos os elementos do sistema foram representados no Simulight. Porém, algumas simplificações foram necessárias para facilitar a modelagem das malhas de controle de tensão e velocidade e do estabilizador de sistema de potência, cujos diagramas de blocos dos modelos implementados no Simulight são mostrados no Anexo B.

Para comparação dos resultados apresentados pelos dois programas, foi simulada a desconexão do Gerador #06 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto, inicialmente na condição operativa apresentada na Tabela 11. Nas Figuras 40 a 44 podem ser observadas, sobrepostas, as respostas dos dois programas para sinais coletados no Gerador #01. A quase que perfeita sobreposição das curvas dá confiança de se utilizar o Simulight no processo de identificação.

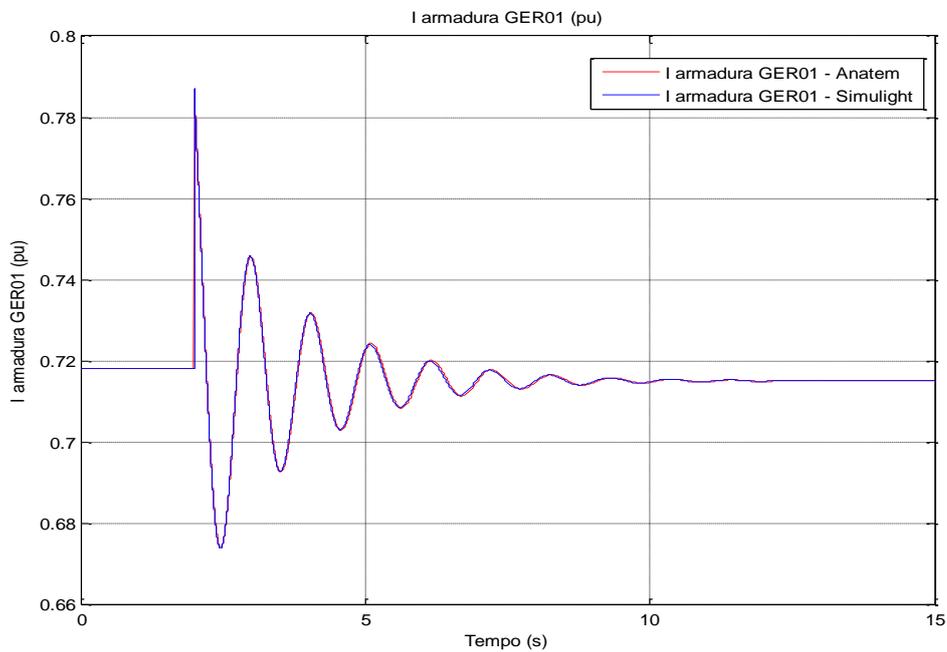


Figura 40: Corrente de armadura do Gerador #01 – Simulight x Anatem

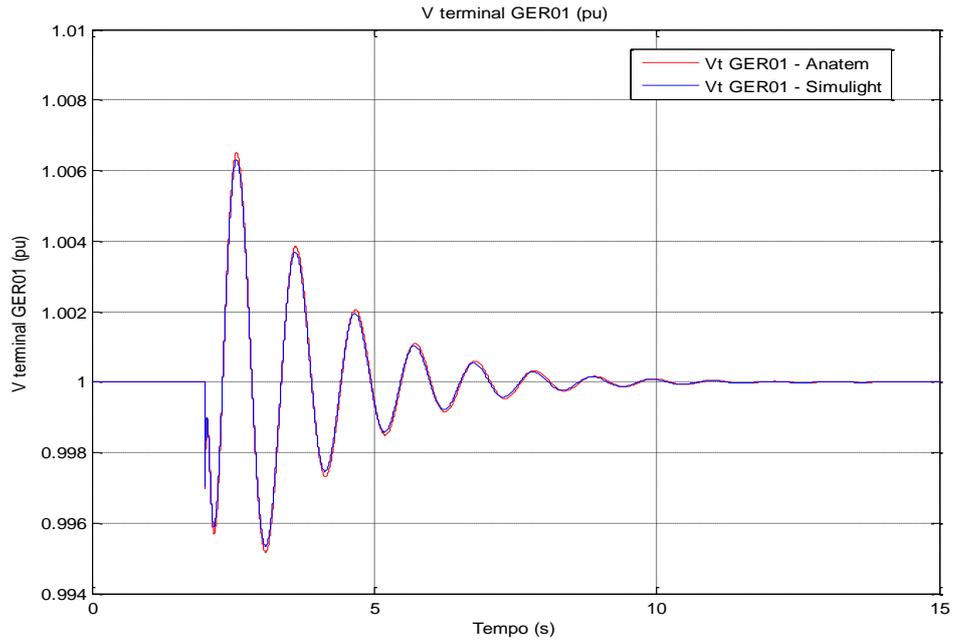


Figura 41: Tensão de armadura do Gerador #01 – Simulight x Anatem

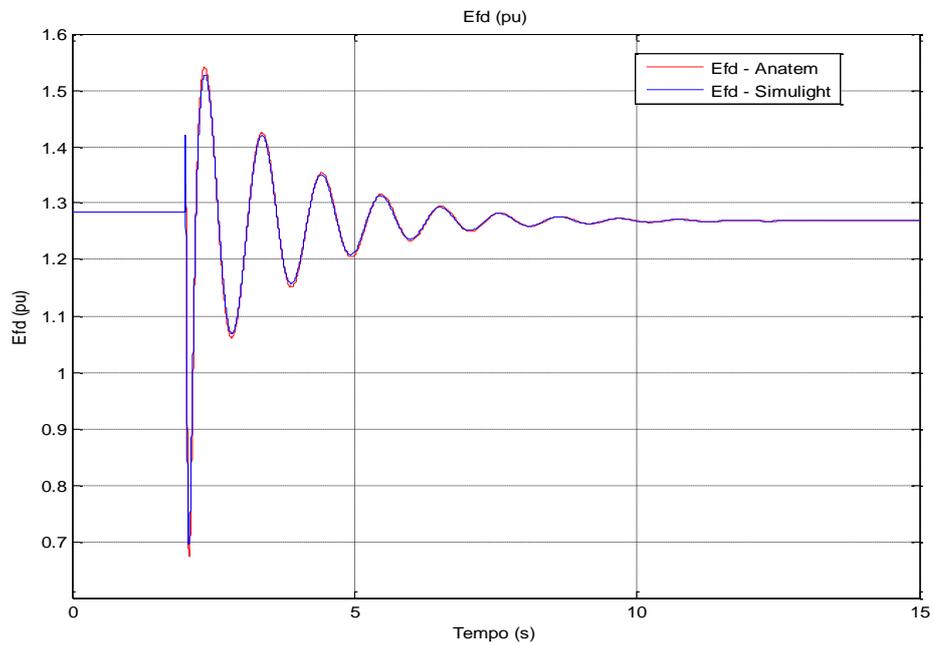


Figura 42: Tensão de campo do Gerador #01 – Simulight x Anatem

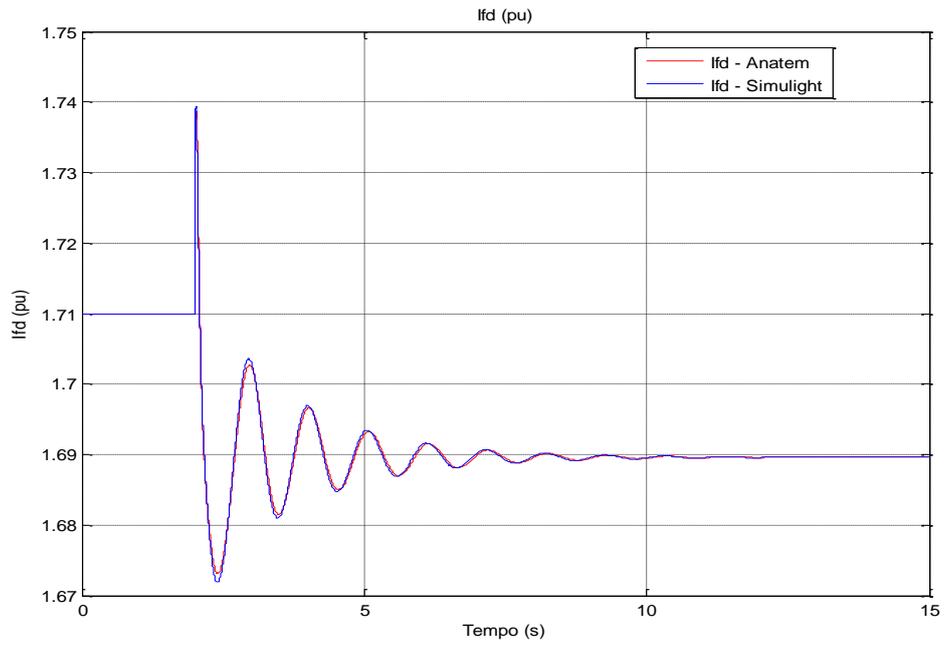


Figura 43: Corrente de campo do Gerador #01 - Simulight x Anatem

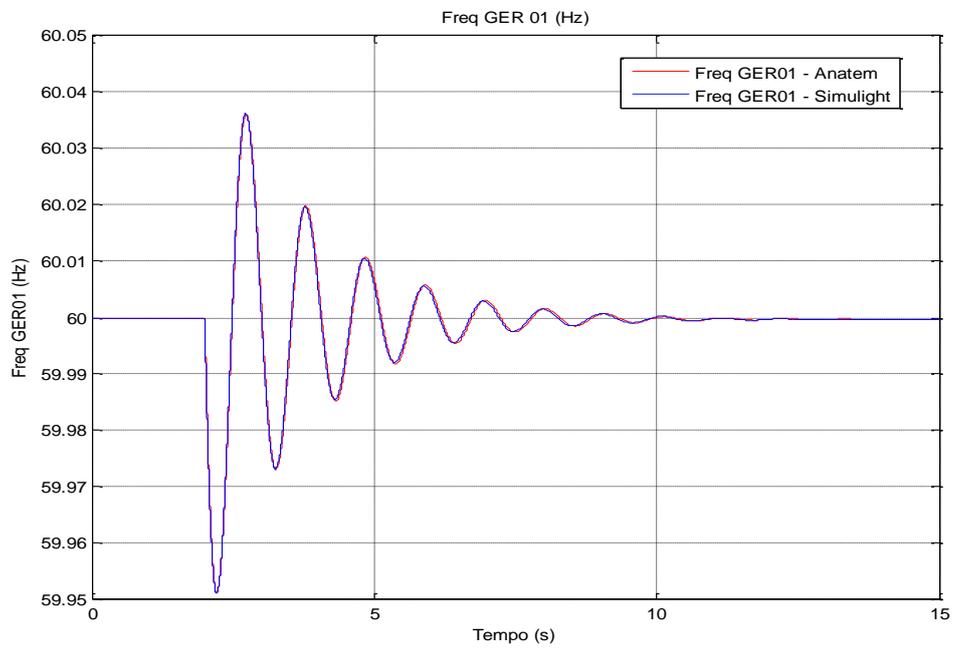


Figura 44: Frequência do Gerador #01 – Simulight x Anatem

5.1.2.3 Identificação através de simulações eletromecânicas realizadas no Simulight

Para efeito de comparação com os resultados obtidos através da simulação no Anatem, os parâmetros da armadura do Gerador #01 foram identificados a partir de uma simulação de sequência positiva realizada no Simulight. Além disso, visando avaliar o desempenho da metodologia diante de dados que representam de forma mais fidedigna a realidade física das medições realizadas em campo durante o funcionamento da máquina conectada ao sistema elétrico, simulações trifásicas do sistema UHE Luiz Carlos Barreto em condições equilibradas e desequilibradas de tensão e corrente foram utilizadas para identificação dos parâmetros da armadura do gerador em estudo.

i. Simulação de sequência positiva

A simulação de sequência positiva foi realizada no Simulight com o Gerador #01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto na mesma condição operativa e para o mesmo distúrbio apresentados na Tabela 11. A Tabela 13 resume os resultados do processo de identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01, desconsiderando os dados do regime transitório, para as medições corrompidas por ruídos de diferentes valores de SNR. Assim como na identificação através da simulação no ANATEM, o método apresenta desejável exatidão para ruídos de até 100 dB de SNR.

Tabela 13: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação de sequência positiva realizada no Simulight

Caso		R_a [pu]	L_{ad} [pu]	L_q [pu]	L_d [pu]
Valores reais		0	7.5090e-01	5.9000e-01	9.3590e-01
Sem ruído	Estimado	7.5530e-005	7.5091e-001	5.9005e-001	9.3582e-001
	Erro %	-	-1.0862e-003	-8.0013e-003	8.9916e-003
SNR=500	Estimado	7.5530e-005	7.5091e-001	5.9005e-001	9.3582e-001
	Erro %	-	-1.0862e-003	-8.0013e-003	8.9916e-003
SNR=100	Estimado	5.7216e-005	7.5088e-001	5.9004e-001	9.3573e-001
	Erro %	-	2.4510e-003	-6.0372e-003	1.8608e-002
SNR=50	Estimado	-4.2647e-001	3.6033e-001	3.2394e-001	-1.4546e-001
	Erro %	-	5.2014e+001	4.5095e+001	1.1554e+002

ii. Simulação trifásica equilibrada

A modelagem trifásica do sistema UHE Luiz Carlos Barreto foi implementada no programa Simulight. O distúrbio aplicado e a condição operativa do Gerador #01 durante a simulação são os mesmos apresentados na Tabela 11. As Figuras 45 e 46 apresentam as magnitudes e ângulos de fase das tensões e correntes de armadura, corrente de campo e velocidade angular do Gerador #01.

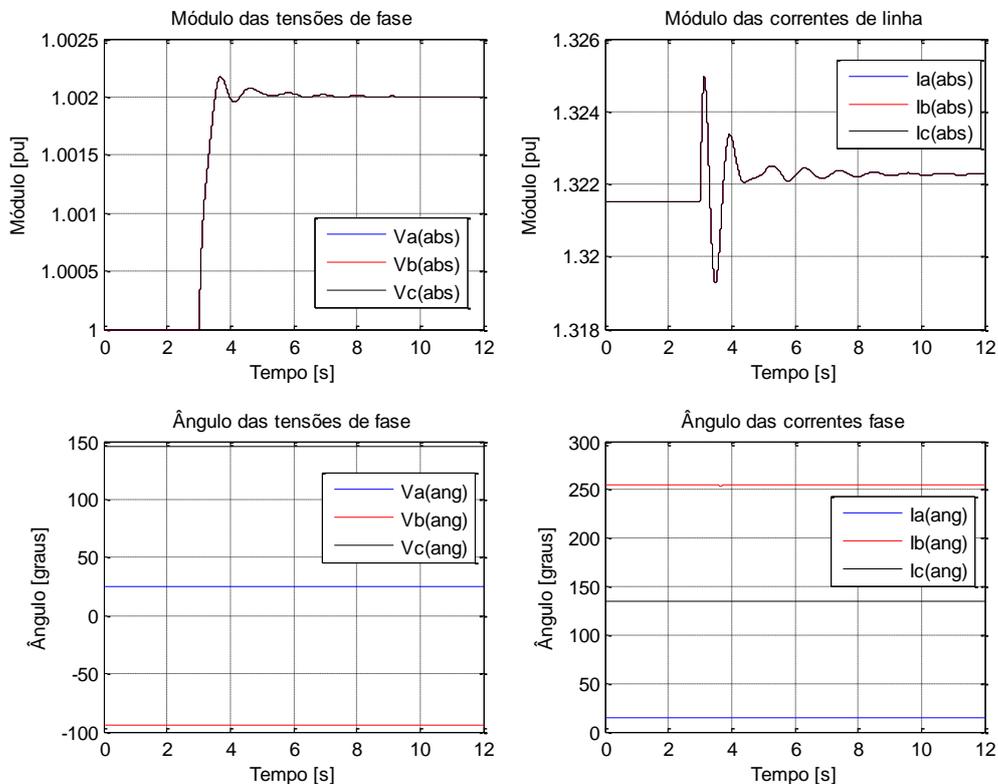


Figura 45: Módulo e fase das tensões e correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

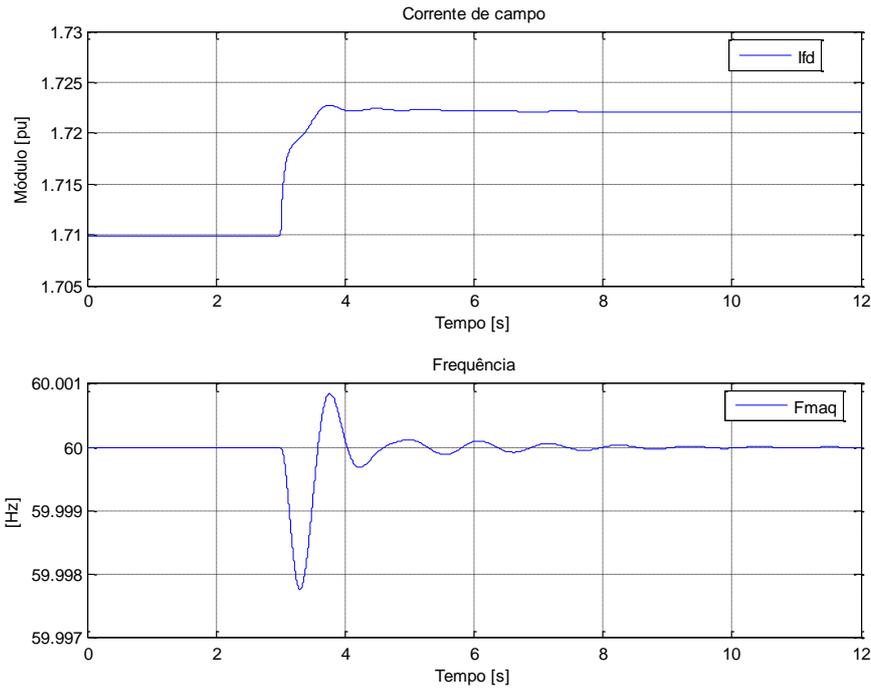


Figura 46: Corrente de campo e frequência do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

As medições apresentadas nas Figuras 45 e 46 são factíveis de serem obtidas diretamente em campo durante a monitoração da máquina síncrona operando conectada ao sistema elétrico. Porém, para serem utilizadas no método VMR, é necessário que as tensões e correntes da armadura estejam referenciadas ao sistema de eixo solidário ao rotor (sistema de eixos dq). Para isso, o procedimento descrito a seguir foi utilizado.

A partir dos fasores de tensão e corrente apresentados em (42), o ângulo de carga da máquina é calculado através da equação (43) utilizando o valor de X_q – um dos parâmetros a ser identificado – fornecido pelo fabricante da máquina. As tensões e correntes da armadura no sistema de eixo dq são obtidas através das equações (44) a (50).

$$\begin{aligned}
 \vec{V}_A &= V_a \angle \varphi_a & \vec{V}_B &= V_b \angle \varphi_b & \vec{V}_C &= V_c \angle \varphi_c \\
 \vec{I}_A &= I_a \angle \theta_a & \vec{I}_B &= I_b \angle \theta_b & \vec{I}_C &= I_c \angle \theta_c
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

$$E_{qda} \underline{\delta} = V_a \underline{\varphi_a} + jX_q \cdot I_a \underline{\theta_a} \quad (43)$$

$$P = (V_a \cdot I_a \cdot \cos(\varphi_a - \theta_a) + V_b \cdot I_b \cdot \cos(\varphi_b - \theta_b) + V_c \cdot I_c \cdot \cos(\varphi_c - \theta_c)) / 3 \quad (44)$$

$$Q = (V_a \cdot I_a \cdot \sin(\varphi_a - \theta_a) + V_b \cdot I_b \cdot \sin(\varphi_b - \theta_b) + V_c \cdot I_c \cdot \sin(\varphi_c - \theta_c)) / 3 \quad (45)$$

$$V_t = (V_a + V_b + V_c) / 3 \quad (46)$$

$$v_q = V_t \cdot \cos \delta \quad (47)$$

$$v_d = V_t \cdot \sin \delta \quad (48)$$

$$i_d = (P \cdot \sin \delta + Q \cdot \cos \delta) / V_t \quad (49)$$

$$i_q = (P \cdot \cos \delta - Q \cdot \sin \delta) / V_t \quad (50)$$

Os sinais calculados das tensões e correntes de armadura referenciadas ao sistema de eixo dq são apresentados na Figura 47.

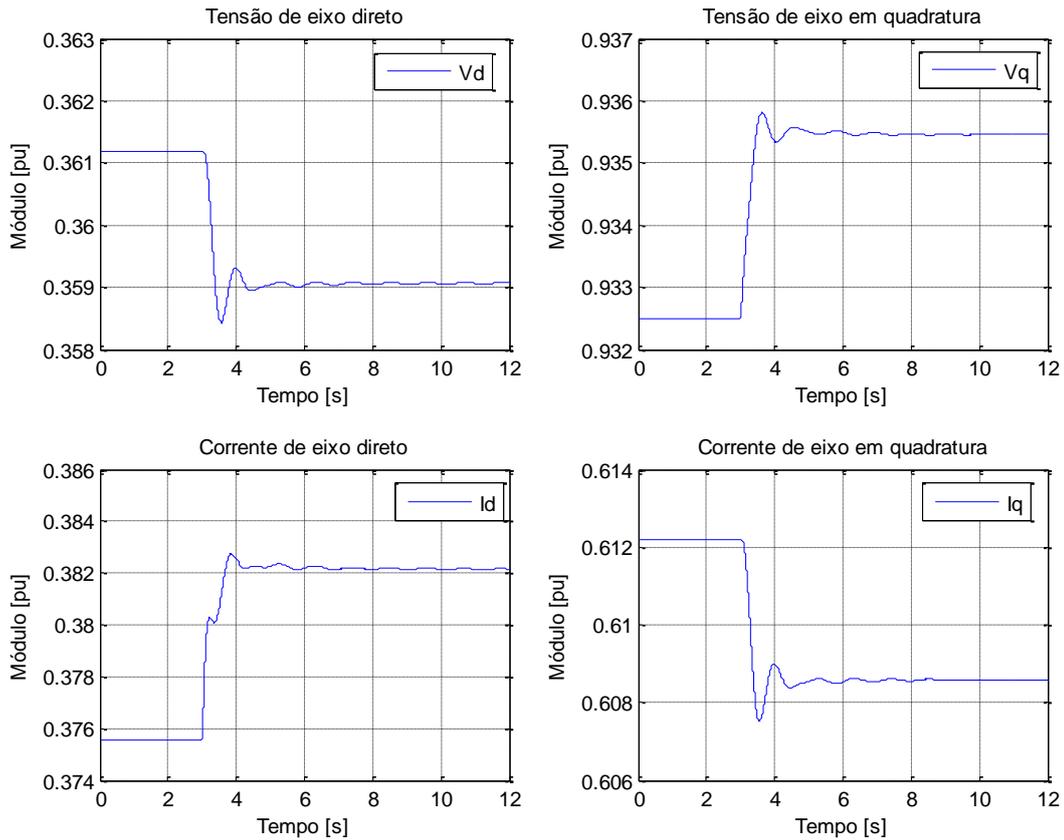


Figura 47: Tensões e correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto calculadas no referencial do rotor durante simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

A Tabela 14 resume os resultados do processo de identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01, desconsiderando o período transitório, para os dados de simulação corrompidos por ruídos de diferentes valores de SNR. Pode-se observar uma desejável exatidão do método para níveis de ruído de até 100 dB de SNR.

Tabela 14: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

Caso		R_a [pu]	L_{ad} [pu]	L_q [pu]	L_d [pu]
Valores reais		0	7.5090e-01	5.9000e-01	9.3590e-01
Sem ruído	Estimado	-3.5613e-006	7.5090e-001	5.9000e-001	9.3591e-001
	Erro %	-	-1.2662e-005	3.7871e-004	-5.8011e-004
SNR=500	Estimado	-3.5613e-006	7.5090e-001	5.9000e-001	9.3591e-001
	Erro %	-	-1.2662e-005	3.7871e-004	-5.8011e-004
SNR=100	Estimado	-2.8341e-006	7.5090e-001	5.9000e-001	9.3591e-001
	Erro %	-	-2.2661e-004	3.0125e-004	-1.2212e-003
SNR=50	Estimado	6.5731e-002	8.5574e-001	6.3099e-001	1.3044e+000
	Erro %	-	-1.3961e+001	-6.9476e+000	-3.9376e+001

O desempenho do método ao longo do processo recursivo, para o cenário em que ruídos de 100 dB de SNR foram acrescentados aos dados de simulação, pode ser observado nas Figuras 48 a 51, nas quais se pode observar o valor identificado para cada parâmetro ao longo do processo recursivo (azul) em relação ao valor original do mesmo (vermelho). Para a exclusão dos dados de regime transitório o estimador é “desligado” no instante $t=3s$. Quando “ligado” novamente, no instante $t=9s$, após a máquina atingir um novo ponto de equilíbrio, todos os parâmetros convergem rapidamente para as proximidades de seus respectivos valores verdadeiro.

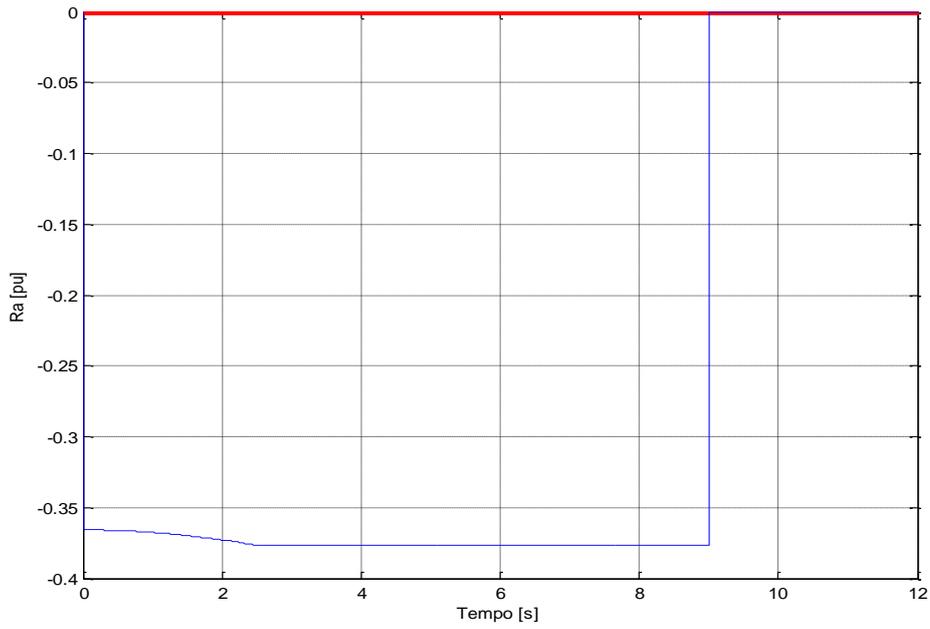


Figura 48: Identificação de R_a do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

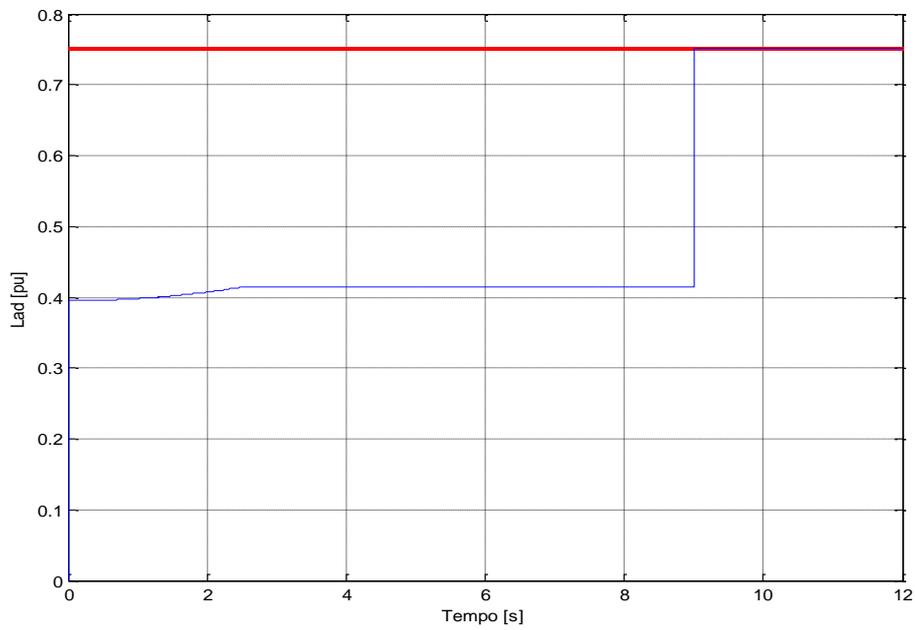


Figura 49: Identificação de L_{ad} do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

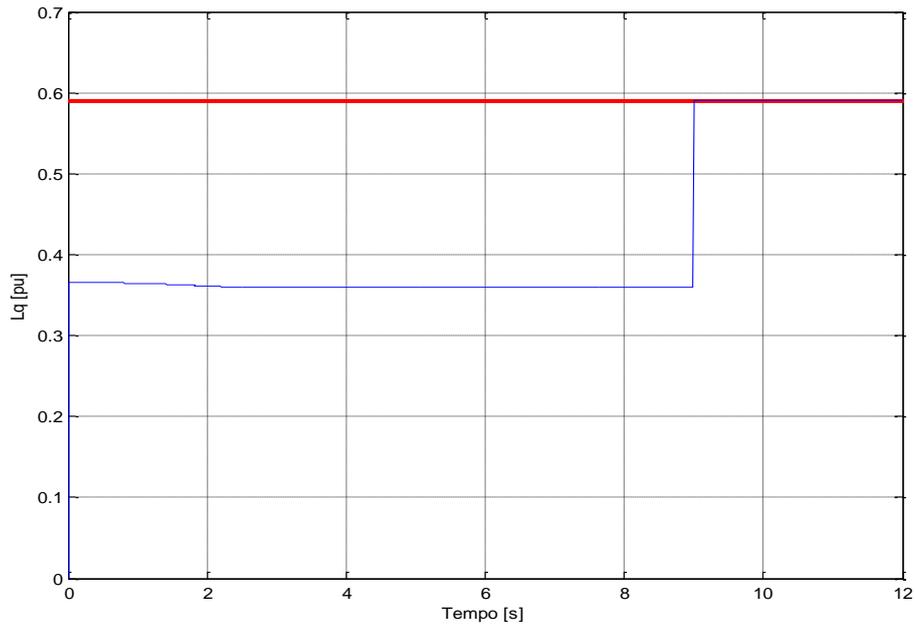


Figura 50: Identificação de L_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

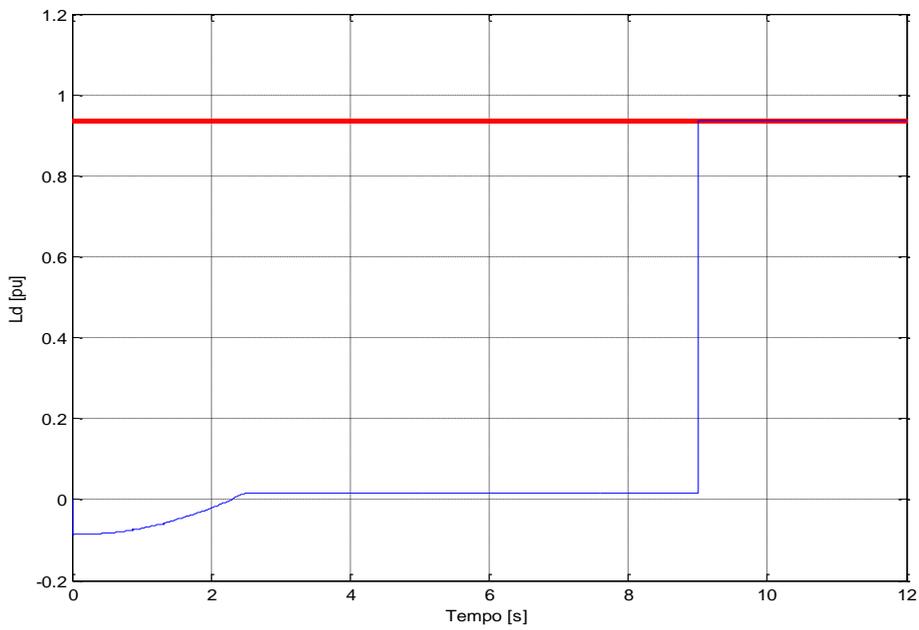


Figura 51: Identificação de L_d do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica equilibrada realizada no Simulight

iii. Simulação trifásica desequilibrada

Nesta simulação uma carga trifásica desequilibrada foi adicionada ao barramento do Gerador #01. A Tabela 15 apresenta as condições operativas do gerador antes e após o regime transitório, assim como os detalhes do evento simulado.

Tabela 15: Condição operativa do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto antes e após o período transitório durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

Condição Operativa do Gerador #01		
	Antes do distúrbio	Após o distúrbio
Tensão Fase A	7,205 (kV) [0,904 pu] / 14,174 (graus)	7,680 (kV) [0,964 pu] / 12,560 (graus)
Tensão Fase B	8,364 (kV) [1,0498 pu] / -99,010 (graus)	8,963 (kV) [1,125 pu] / -100,493 (graus)
Tensão Fase C	8,362 (kV) [1,0495 pu] / 136,566 (graus)	8,963 (kV) [1,125 pu] / 135,388 (graus)
Corrente Fase A	17015 (A) [2,2103 pu] / 334,1679 (graus)	19366 (A) [2,5152 pu] / 325,514 (graus)
Corrente Fase B	4214 (A) [0,5474 pu] / 226,660 (graus)	5828 (A) [0,7570 pu] / 198,050 (graus)
Corrente Fase C	4593 (A) [0,5966 pu] / 57,053 (graus)	7483 (A) [0,9722 pu] / 47,921 (graus)
Potência Ativa	133,768 (MW) [0,727 pu]	133,768 (MW) [0,727 pu]
Potência Reativa	146,096 (MVar) [0,794 pu]	232,281 (MVar) [1,262 pu]
Frequência	60 (Hz)	60 (Hz)
Tensão de Excitação	1,877 pu	2,259 pu
Corrente de Excitação	2,483 pu	3,015 pu
Distúrbio	Degrau de +7% em Vref no Gerador #01, t=1(s)	

As Figuras 52 a 56 apresentam as magnitudes e ângulos de fase das tensões e correntes de armadura, corrente de campo e frequência coletados no Gerador #01 durante a simulação. A partir das grandezas de fase, as equações (42) a (50) foram utilizadas para calcular as tesões e correntes de armadura no sistema de eixo dq, as quais são utilizadas no método VMR e são ilustradas na Figura 57.

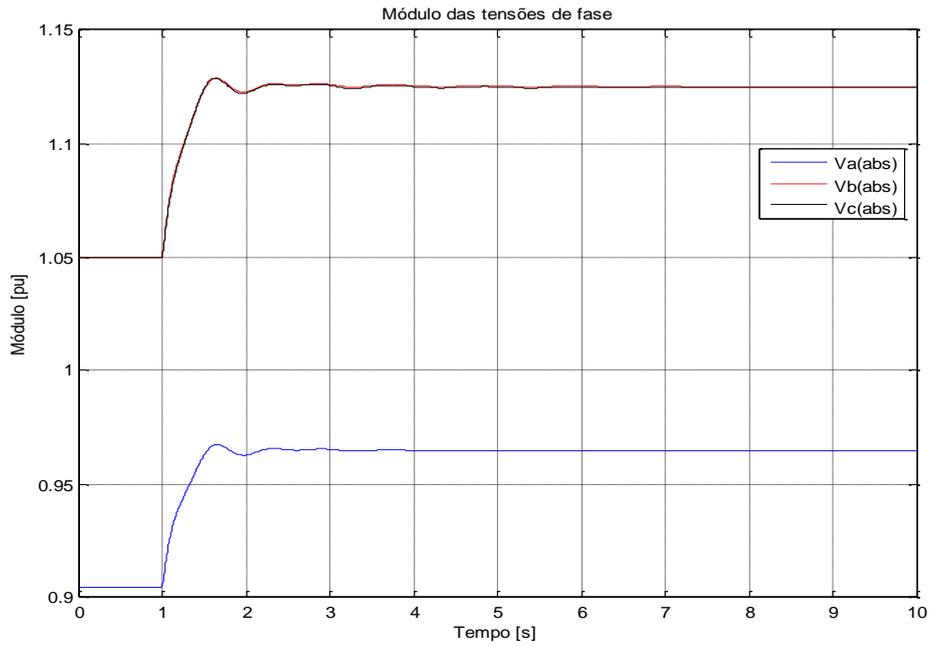


Figura 52: Módulo das tensões de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

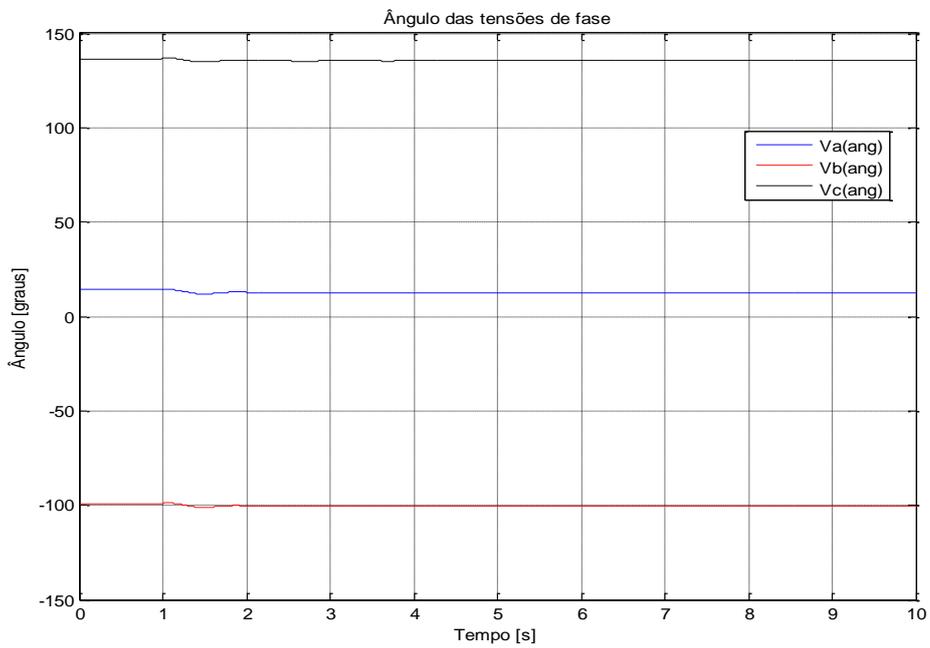


Figura 53: Ângulo de fase das tensões de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

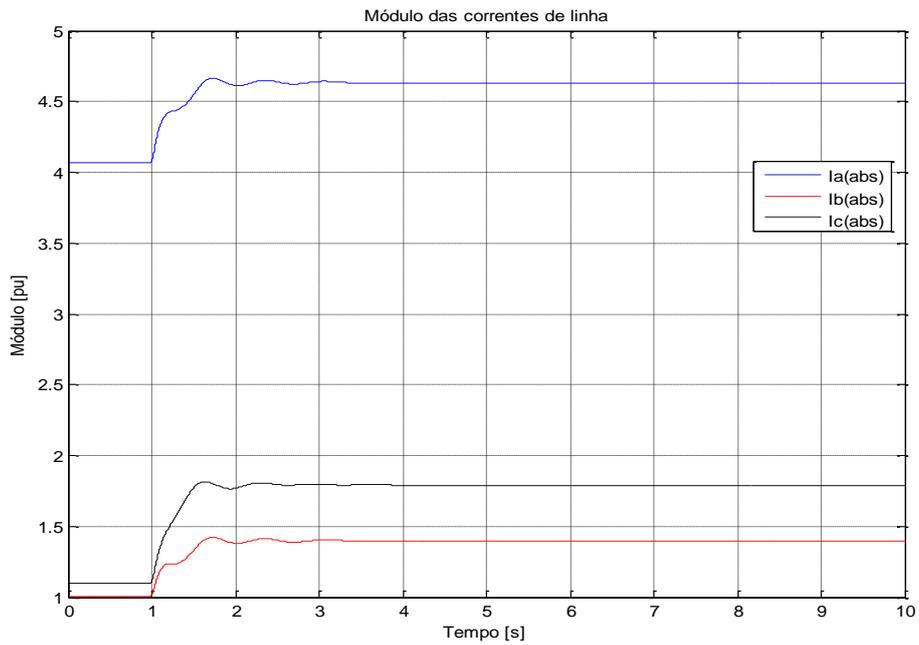


Figura 54: Módulo das correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante Simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

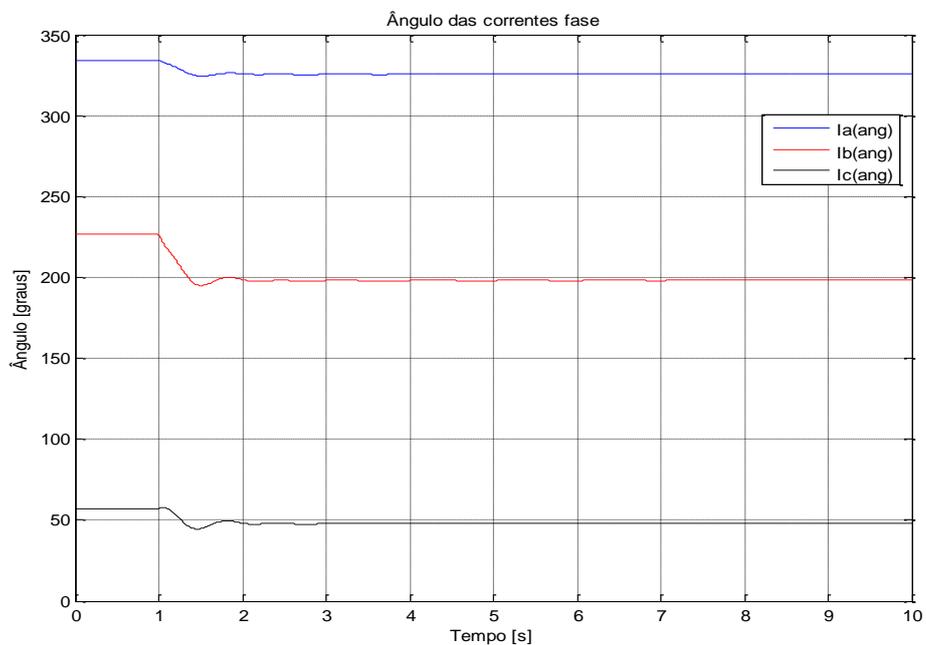


Figura 55: Ângulo de fase das correntes de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

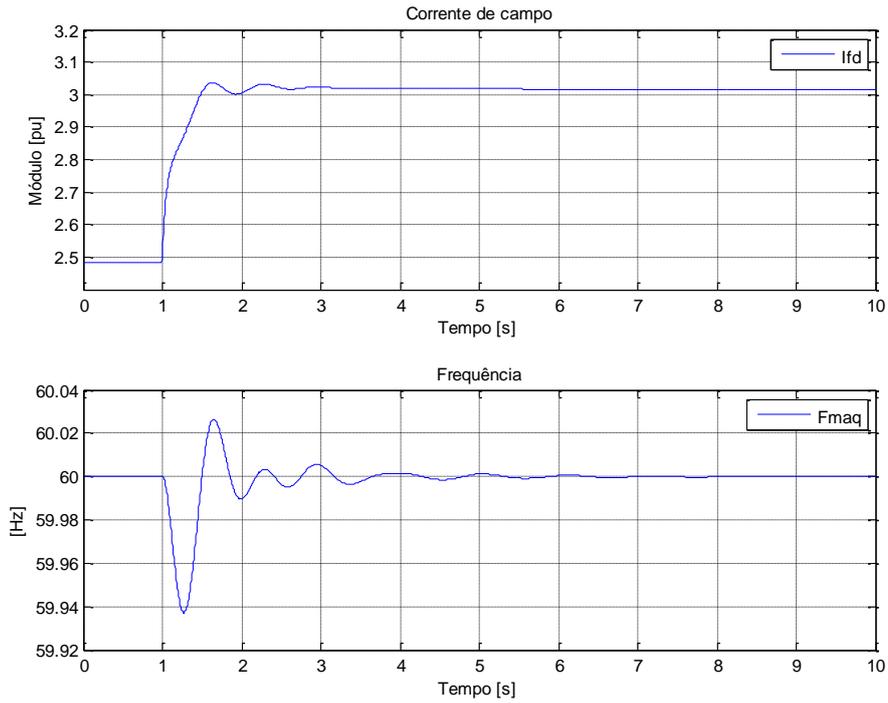


Figura 56: Corrente de campo e frequência elétrica do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

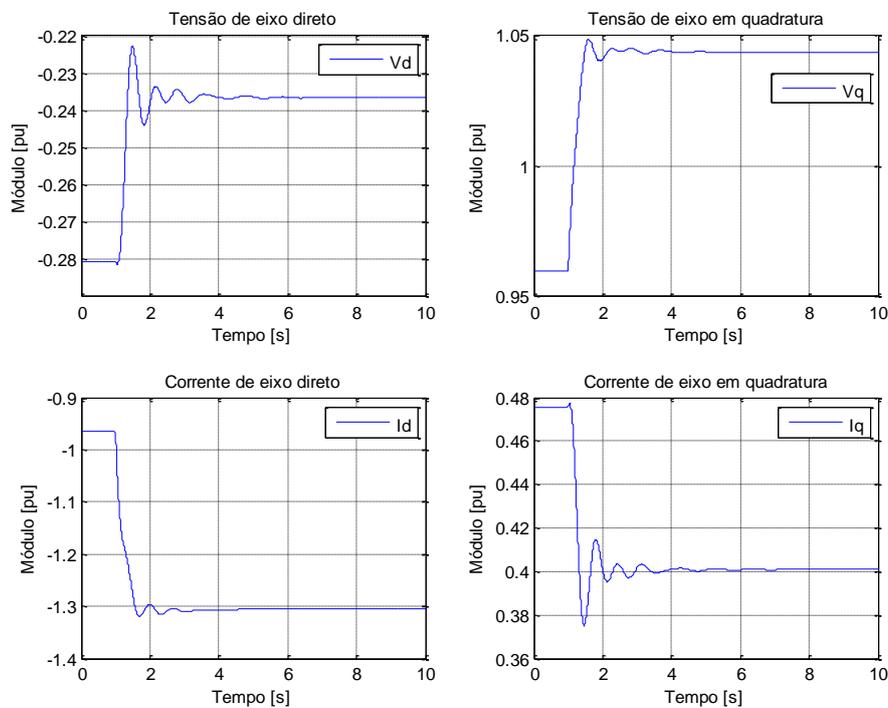


Figura 57: Sinais calculados de v_d , v_q , i_d e i_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto durante simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

A Tabela 16 resume os resultados do processo identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01, desconsiderando o regime transitório, para os dados de simulação corrompidos por ruídos de diferentes valores de SNR. É possível observar que o método apresenta excelentes resultados de identificação utilizando os dados da simulação trifásica desequilibrada mesmo para níveis de ruídos excessivamente altos (50 dB de SNR).

Tabela 16: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight

Caso		R_a [pu]	L_{ad} [pu]	L_q [pu]	L_d [pu]
Valores reais		0	7.5090e-01	5.9000e-01	9.3590e-01
Sem ruído	Estimado	1.7014e-005	7.5070e-001	5.9004e-001	9.3542e-001
	Erro %	-	2.6258e-002	-6.1031e-003	-5.8011e-004
SNR=500	Estimado	1.7014e-005	7.5070e-001	5.9004e-001	9.3542e-001
	Erro %	-	2.6258e-002	-6.1031e-003	5.0843e-002
SNR=100	Estimado	1.7931e-005	7.5071e-001	5.9004e-001	9.3544e-001
	Erro %	-	2.5620e-002	-6.4889e-003	4.9651e-002
SNR=50	Estimado	-5.5826e-004	7.5216e-001	5.8825e-001	9.3926e-001
	Erro %	-	-1.6763e-001	2.9650e-001	-3.5908e-001

O desempenho do método ao longo do processo recursivo, sem adição de ruídos aos dados de simulação, pode ser observado nas Figuras 58 a 61, nas quais se pode observar a evolução do valor estimado para cada parâmetro ao longo do processo recursivo (azul) em relação ao valor real do mesmo (vermelho). Para a exclusão dos dados de regime transitório o estimador é “desligado” no instante $t=1s$. Quando ligado novamente, no instante $t=6s$, após a máquina atingir um novo ponto de equilíbrio, todos os parâmetros convergem rapidamente para as proximidades de seus respectivos valores verdadeiros.

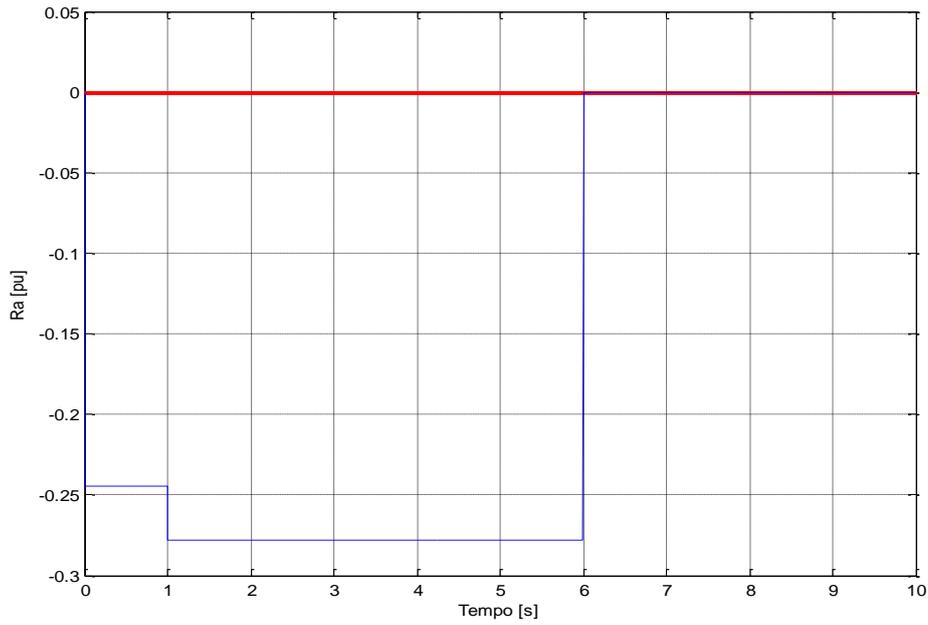


Figura 58: Identificação de R_a do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.

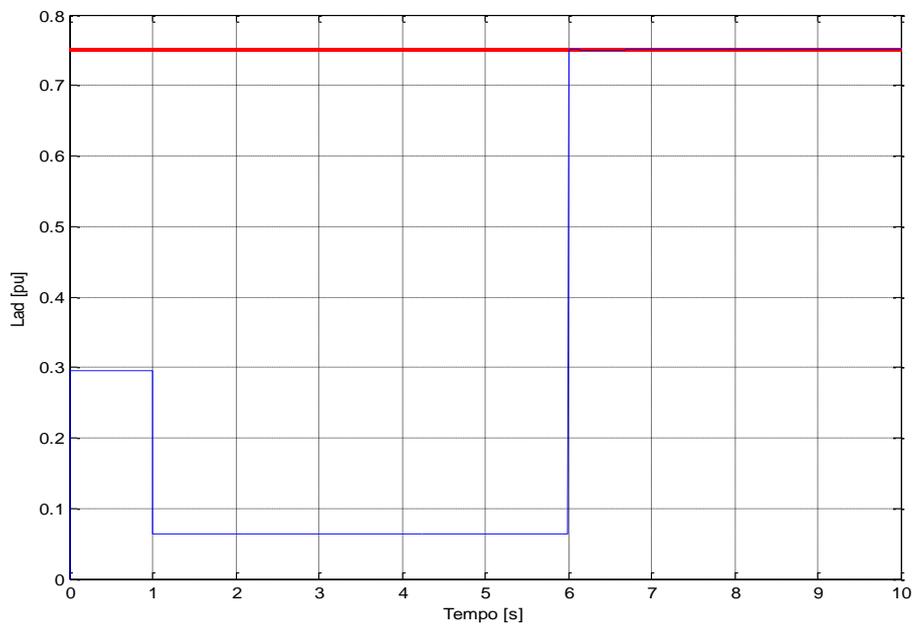


Figura 59: Identificação de L_{ad} do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.

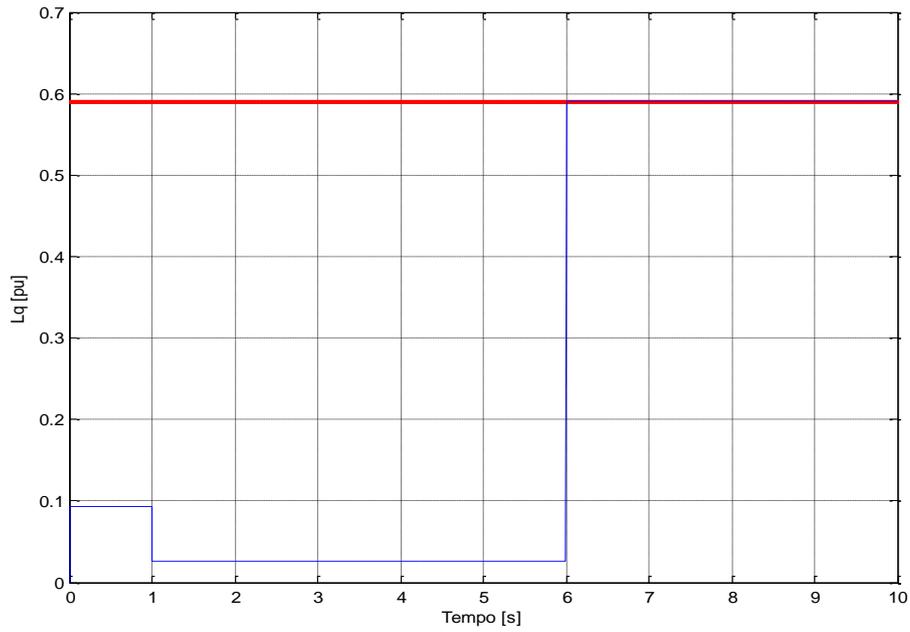


Figura 60: Identificação de L_q do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.

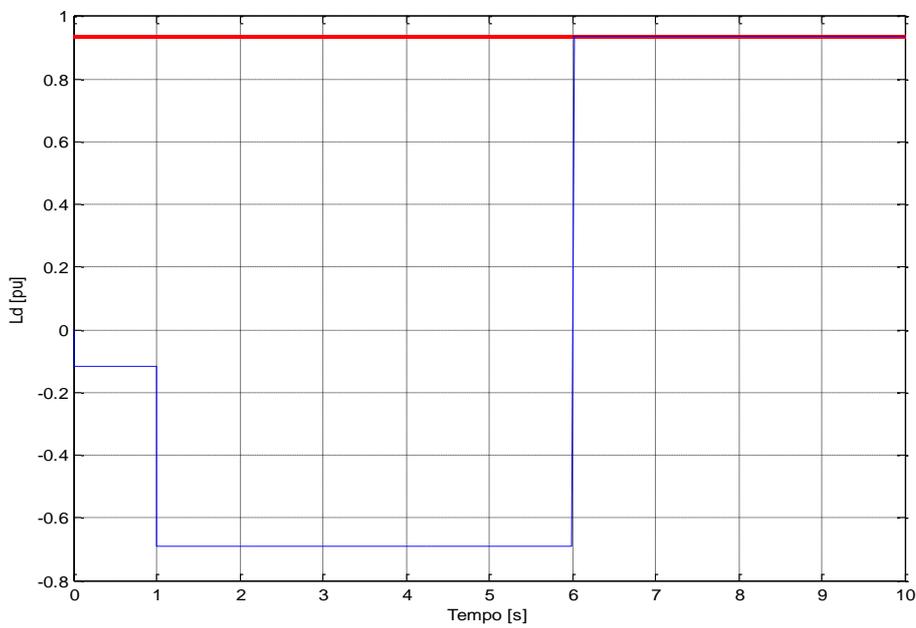


Figura 61: Identificação de L_d do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto ao longo do processo recursivo através de simulação trifásica desequilibrada realizada no Simulight.

5.1.3. Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC

O Sistema WSCC [2] é utilizado largamente na literatura especializada para realização de estudos na área de sistemas elétricos de potência. Conforme diagrama unifilar apresentado na Figura 62, é composto por nove barras e três geradores síncronos, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 17.

Os geradores são providos de malhas de controle de tensão. No entanto, reguladores de velocidade e estabilizadores de sistemas de potência não foram representados.

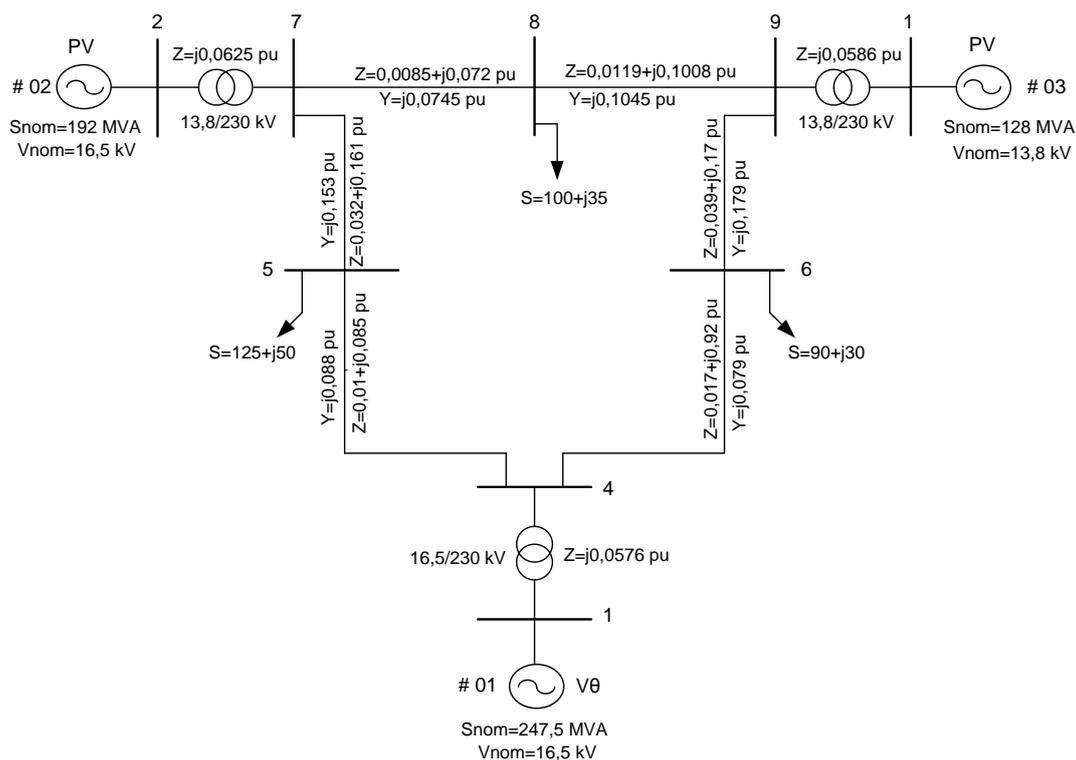


Figura 62: Diagrama unifilar do sistema WSCC.

Tabela 17: Dados dos geradores do sistema WSCC.

Parâmetros	Gerador #01	Gerador #02	Gerador #03
Potência (MVA)	247,5000	192,0000	128,0000
Tipo	Hidrogerador	Turbogerador	Turbogerador
Vnom (kV)	16,5000	13,8000	13,8000
H (s)	9,5520	3,3300	2,3530
D (pu)	0,0000	0,0000	0,0000
r (pu)	0,0030	0,0030	0,0030
X _d (pu)	0,3614	1,7200	1,6800
X _q (pu)	0,2398	1,6600	1,6100
X _l (pu)	0,0000	0,0000	0,0000
X' _d (pu)	0,2000	0,3000	0,3000
X' _q (pu)	-	0,3780	0,3200
X'' _d (pu)	0,1505	0,2300	0,2321
X'' _q (pu)	0,1505	0,2300	0,2321
T' _{do} (s)	8,9600	6,0000	5,8900
T' _{qo} (s)	-	0,5350	0,6000
T'' _{do} (s)	0,0300	0,0300	0,0300
T'' _{qo} (s)	0,0700	0,0700	0,0700

O ponto de operação do sistema na condição pré-distúrbio em termos de perfil de tensão, despacho e carregamento é caracterizado na Tabela 18.

Tabela 18: Ponto de operação do sistema WSCC na condição pré-distúrbio.

Barra	Tensão (Módulo)	Tensão (Ângulo)	Geração (MW)	Geração (MVar)	Carga (MW)	Carga (MVar)
1	1,0400	0,00	71,6410	27,0459	0,0000	0,0000
4	1,0258	-2,22	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	1,0250	9,28	163,0000	6,6537	0,0000	0,0000
7	1,0258	3,72	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	1,0250	4,66	85,0000	-10,8597	0,0000	0,0000
9	1,0324	1,97	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,9956	-3,99	0,0000	0,0000	125,0000	50,0000
6	1,0127	-3,69	0,0000	0,0000	90,0000	30,0000
8	1,0159	0,73	0,0000	0,0000	100,0000	35,0000

O sistema WSCC foi o primeiro a ser utilizado para testar a metodologia baseada nos AGs para identificação dos parâmetros do rotor de uma máquina síncrona. Uma simulação de transitórios eletromecânicos do sistema representado com todos os seus

parâmetros verdadeiros foi utilizada como referência para o AG, conforme região destacada pela linha tracejada no esquema de identificação apresentado na Figura 13. De acordo com esse esquema, o AG evolui seus indivíduos, compostos pelo conjunto de parâmetros do rotor do Gerador #01, ao longo de gerações de forma a minimizar a diferença entre a resposta dinâmica do modelo que está sendo identificado e a do modelo original.

Os parâmetros de controle do AG e o evento simulado são mostrados nas Tabelas 19 e 20, respectivamente. O espaço de busca definido para cada parâmetro é apresentado na Tabela 21 e foram escolhidos de acordo com os valores típicos de parâmetros de hidrogeradores [8].

Tabela 19: Parâmetros de controle do AG utilizados na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

Parâmetros de controle do AG	
Numero máximo de gerações	60
Numero de indivíduos	5000
Método de seleção	Torneio (3)
Probabilidade de cruzamento	0,6
Probabilidade de mutação	0,01
Tipo de cruzamento	Cruzamento em dois pontos
Outras técnicas	Escalonamento linear Elitismo de 4 indivíduos
Tempo de processamento para cada geração	
24 minutos e 30 segundos	

Tabela 20: Evento aplicado na simulação eletromecânica para identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

Evento da simulação dinâmica		
Degrau em V_{ref} no Gerador #01		
Instante	Valor inicial	Valor final
0,005 s	1,076 pu	1,2 pu

Tabela 21: Espaço de busca do AG utilizado na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

Espaço de Busca do AG		
	Mínimo	Máximo
X'_d (pu)	0,2	0,36
X''_d (pu)	0,15	0,35
T'_{do} (s)	1,5	9,0
T''_{do} (s)	0,01	0,05
T''_{qo} (s)	0,01	0,09

Os vetores Y e \hat{Y} utilizados na definição da função adequabilidade, conforme as equações (40) e (41), foram compostos pelos seguintes dados de simulação coletados no modelo do Gerador #01:

- Corrente de armadura de sequência positiva (I_+), em p.u.
- Tensão de armadura de sequência positiva (V_+), em p.u.
- Corrente de campo (I_{fd}), em p.u.
- Velocidade angular (ω), em rad/s.

As Figuras 63 a 67 apresentam a evolução de cada parâmetro ao longo do processo de identificação. O eixo das ordenadas representa espaço de busca definido para o parâmetro, ao passo que o eixo das abscissas representa as gerações do AG. Os valores dos parâmetros plotados a cada geração correspondem ao indivíduo de maior adequabilidade, ou seja, a melhor solução encontrada pelo AG até o momento. A Figura 68 apresenta o valor do resíduo (função objetivo) associado ao melhor indivíduo de cada geração.

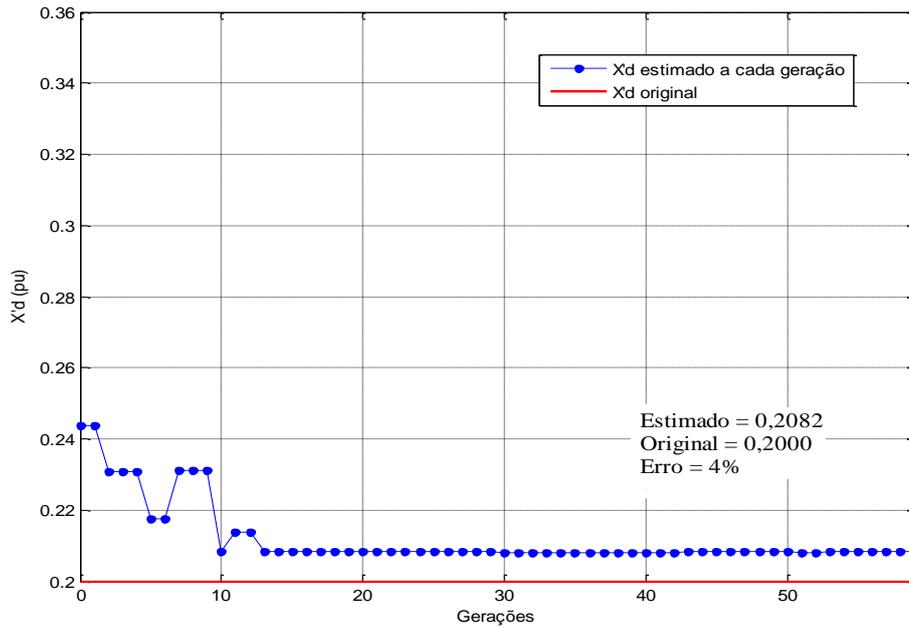


Figura 63: X'_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

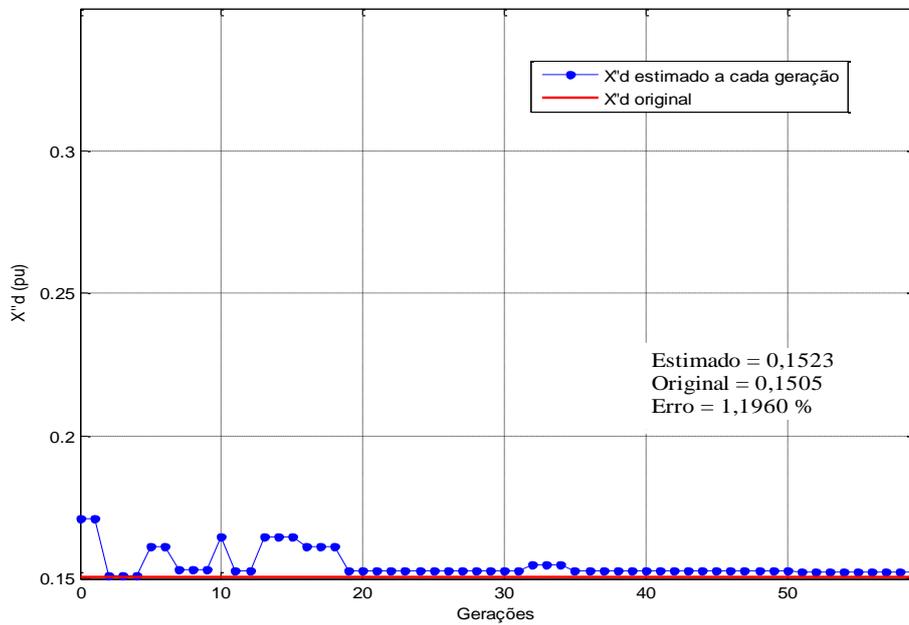


Figura 64: X''_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

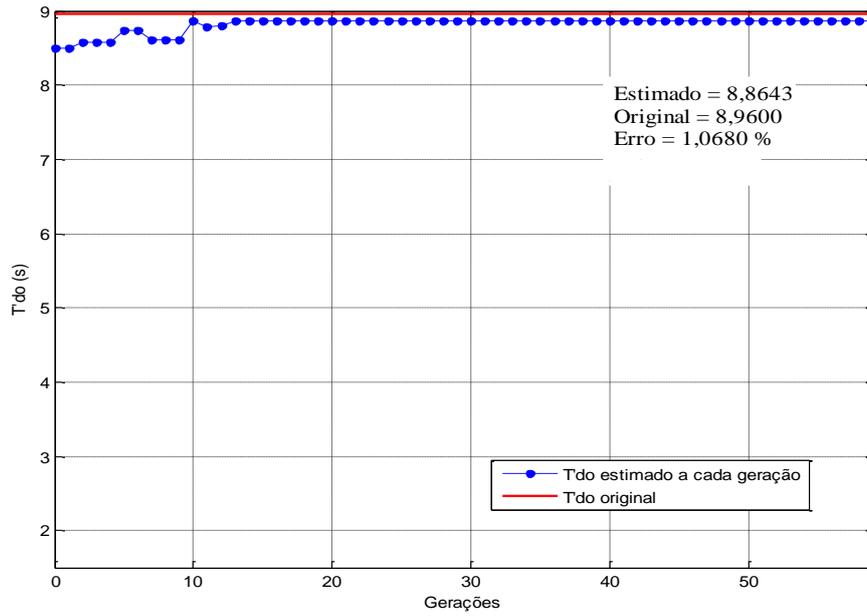


Figura 65: T'_{do} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

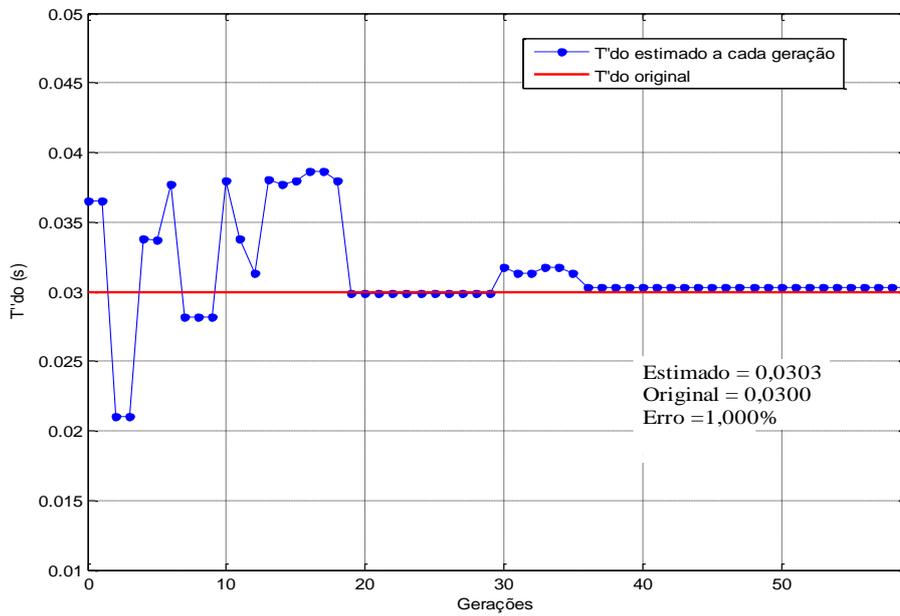


Figura 66: T''_{do} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

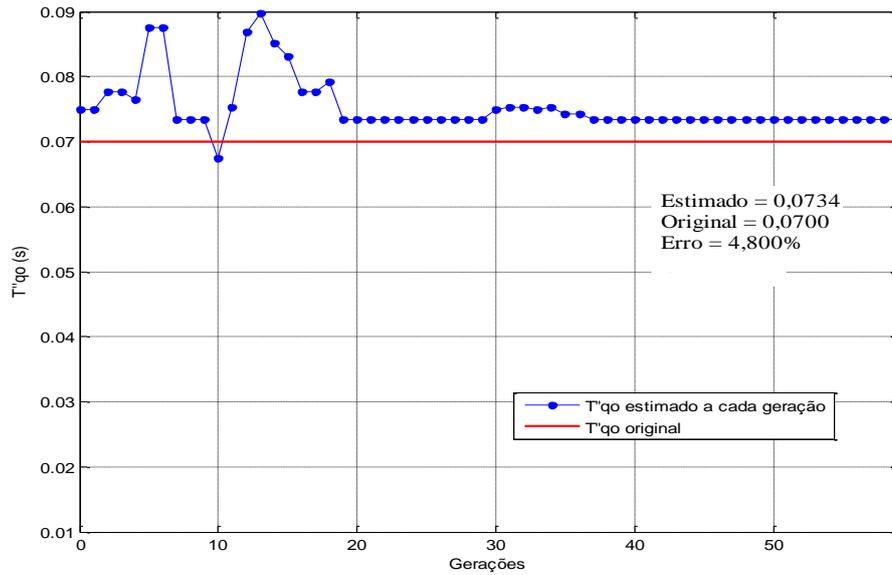


Figura 67: T'_{q0} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

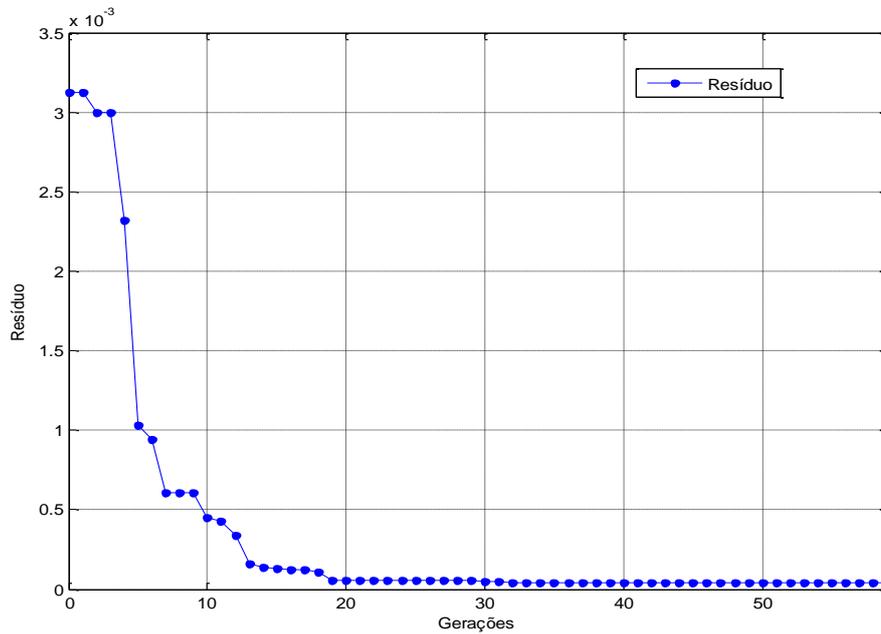


Figura 68: Resíduo associado ao melhor indivíduo de cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC.

A Tabela 22 apresenta a melhor solução encontrada pelo AG, que corresponde ao indivíduo de maior adequabilidade da última geração processada. Juntamente com o

valor identificado de cada parâmetro, são mostrados seus valores verdadeiros e o erro percentual de identificação.

Tabela 22: Parâmetros do rotor do Gerador #01 do sistema WSCC identificados pelo AG

	Identificado	Valor Real	Erro (%)
X'_d	0,2082	0,2000	4,0000
X''_d	0,1523	0,1505	1,1960
T'_{do}	8,8643	8,9600	1,0680
T''_{do}	0,0303	0,0300	1,0000
T''_{qo}	0,0734	0,0700	4,8000

O programa foi executado em um netbook com processador AMD Dual Core E-350 1,60 GHz e 2 GB de memória RAM. O tempo de processamento obtido para cada geração é apresentado na Tabela 19. Ademais, vale ressaltar que todos os tempos de processamento citados ao longo deste trabalho foram obtidos com a máquina anteriormente especificada.

Para validação dos parâmetros identificados foram realizadas simulações de um curto-circuito trifásico franco na Barra 05 no instante $t=0,5s$, com eliminação no instante $t=0,6s$, para o sistema WSCC representado por todos os seus parâmetros originais (curvas em azul) e para o caso em que os parâmetros identificados são utilizados no modelo do Gerador #01 (curvas em vermelho). As Figuras 69 a 72 apresentam a comparação das respostas das simulações para os mesmos sinais utilizados no processo de identificação coletados no modelo do Gerador #01.

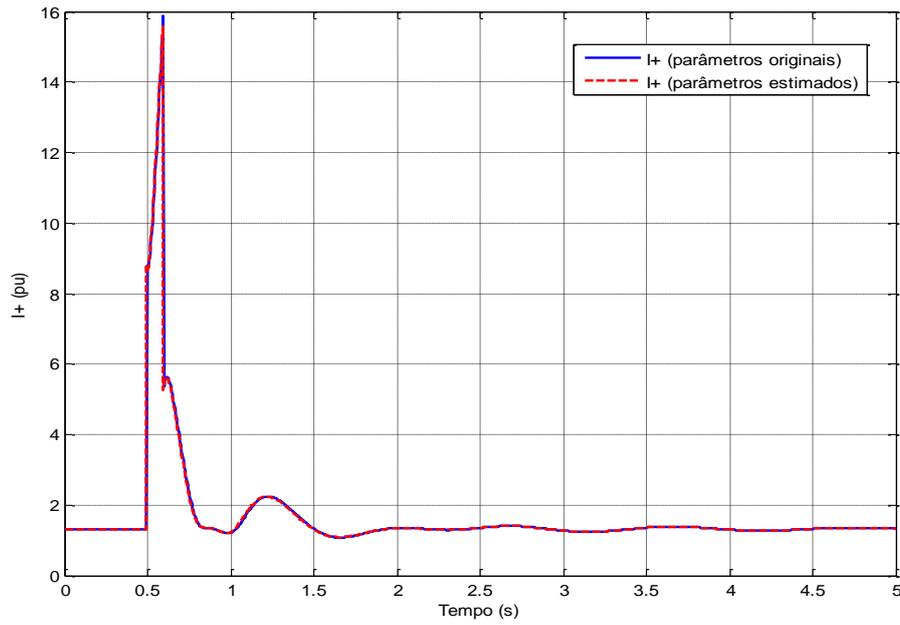


Figura 69: Comparação das respostas de I_+ do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto-circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC

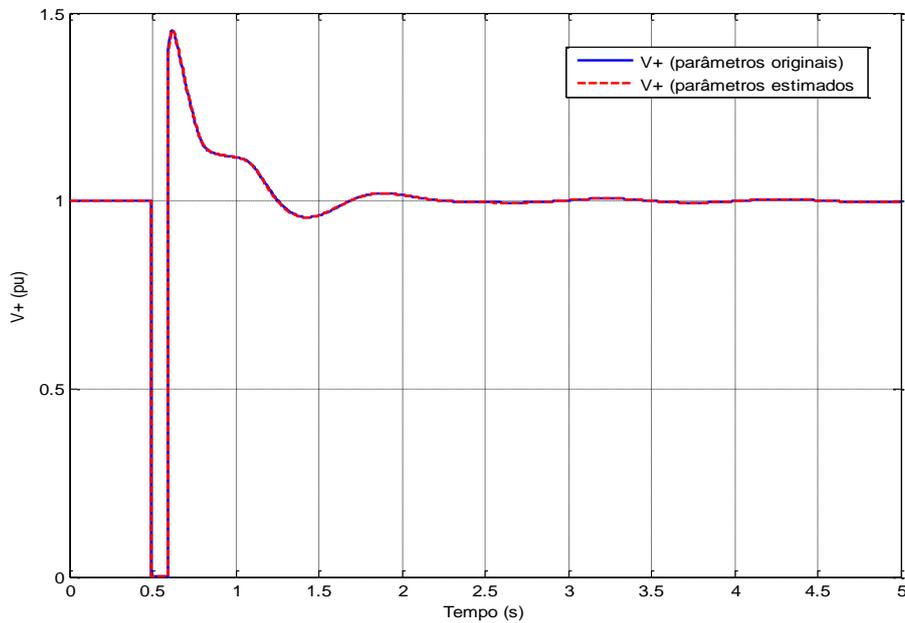


Figura 70: Comparação das respostas de V_+ do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto-circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC

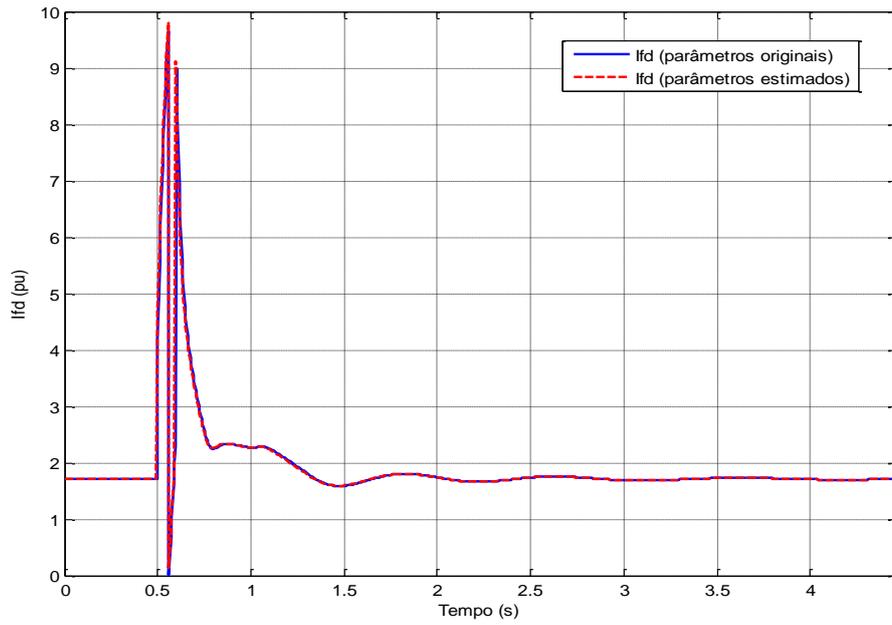


Figura 71: Comparação das respostas de I_{fd} do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto-circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC

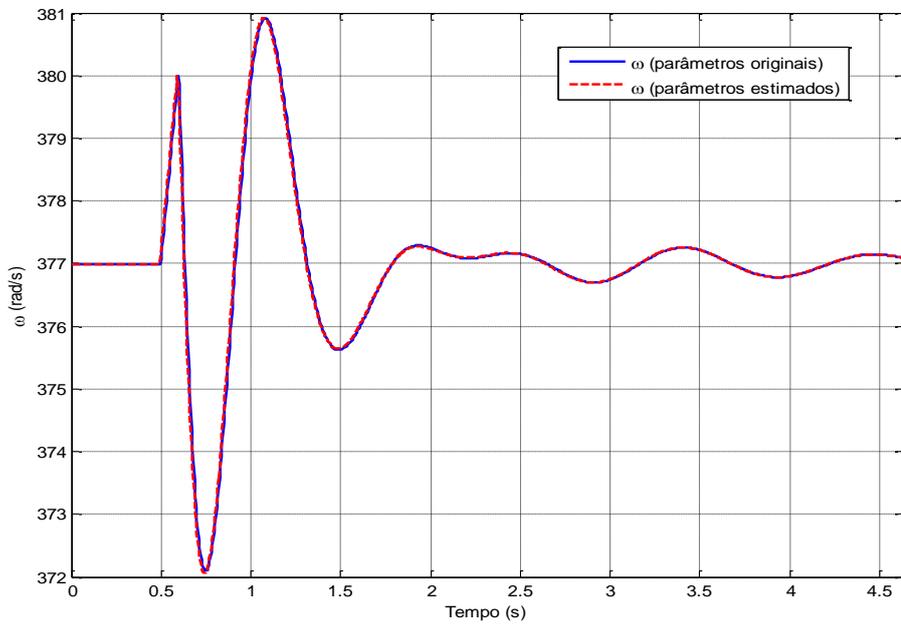


Figura 72: Comparação das respostas de ω do sistema original (azul) e do sistema identificado (vermelho) ao curto-circuito trifásico na Barra #05 do sistema WSCC

5.1.4. Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto

O sistema UHE Luiz Carlos Barreto, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 29, foi simulado para uma condição de curto-circuito trifásico visando à identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 através da metodologia apresentada no item 4.3. Adotaram-se, como premissa, os parâmetros da armadura do gerador conhecidos e identificados através do método VMR, cujos resultados foram apresentados na seção 5.1.2.

A Tabela 23 ilustra o ponto de operação do sistema na condição pré-distúrbio, enquanto na Tabela 24 estão listados os parâmetros de controle do AG e o tempo de processamento obtido para cada geração. O espaço de busca definido para cada parâmetro é apresentado na Tabela 25, sendo escolhido de acordo com os valores típicos de parâmetros de hidrogeradores [8].

Tabela 23: Ponto de operação do sistema UHE Luiz Carlos Barreto na condição pré-distúrbio durante identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 através de dados de simulação.

Barra	Tensão (Módulo)	Tensão (Ângulo)	Geração (MW)	Geração (MVar)	Carga (MW)	Carga (MVar)
1	1,0000	0,00	130,0000	23,7545	0,0000	0,0000
2	1,0000	0,00	130,0000	23,7545	0,0000	0,0000
3	1,0000	0,00	130,0000	23,7545	0,0000	0,0000
4	1,0000	0,00	130,0000	23,7545	0,0000	0,0000
5	1,0000	0,00	130,0000	23,7545	0,0000	0,0000
6	1,0000	0,00	130,0000	23,7545	0,0000	0,0000
7	0,9760	6,62	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8	0,9850	18,15	0,0000	0,0000	90,0000	30,0000
9	1,0000	0,00	14,6703	357,2728	780,0000	150,0000

Tabela 24: Parâmetros de controle do AG utilizados na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados de simulação.

Parâmetros de controle do AG	
Numero máximo de gerações	61
Numero de indivíduos	1500
Método de seleção	Torneio (3)
Probabilidade de cruzamento	0,6
Probabilidade de mutação	0,01
Tipo de cruzamento	Cruzamento em dois pontos
Outras técnicas	Escalonamento linear Elitismo de 4 indivíduos
Tempo de processamento para cada geração	
37 minutos e 40 segundos	

Tabela 25: Espaço de busca do AG utilizado na identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados de simulação

Espaço de Busca do AG		
	Mínimo	Máximo
X'_d (pu)	0,2	0,5
X''_d (pu)	0,15	0,35
T'_{do} (s)	1,5	9,0
T''_{do} (s)	0,01	0,05
T''_{qo} (s)	0,01	0,09

O curto-circuito trifásico foi aplicado na barra terminal do Gerador #01 no instante $t=0,3s$ da simulação, com tempo de eliminação de $0,1s$. Os vetores \mathbf{Y} e $\tilde{\mathbf{Y}}$ utilizados na definição da função adequabilidade, conforme as equações (40) e (41), foram compostos pelos seguintes dados de simulação coletados no modelo do Gerador #01:

- Corrente de armadura de sequência positiva (I_+), em p.u.
- Tensão de armadura de sequência positiva (V_+), em p.u.
- Corrente de campo (I_{fd}), em p.u.
- Velocidade angular (ω), em rad/s

As Figuras 73 a 77 apresentam a evolução de cada parâmetro ao longo do processo de identificação. Os valores dos parâmetros plotados a cada geração correspondem ao indivíduo de maior adequabilidade, ou seja, a melhor solução encontrada pelo AG até o momento. A Figura 78 apresenta o comportamento decrescente do resíduo associado ao melhor indivíduo de cada geração.

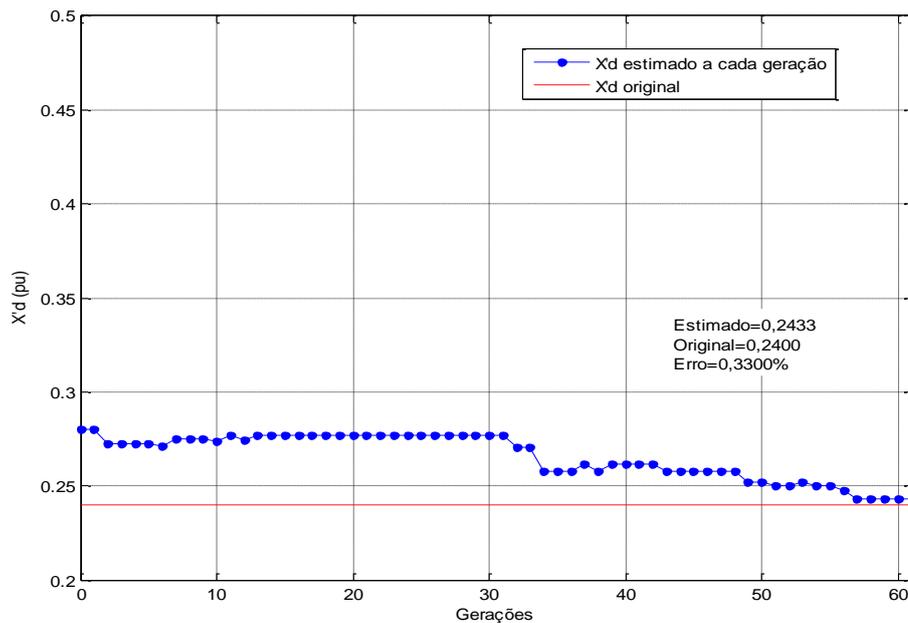


Figura 73: X'_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação

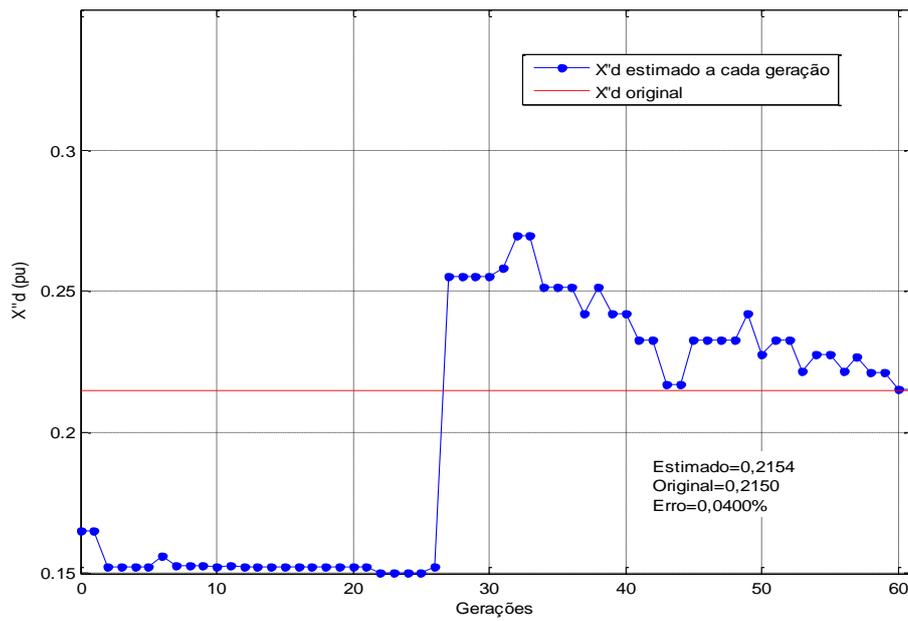


Figura 74: X''_d identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação

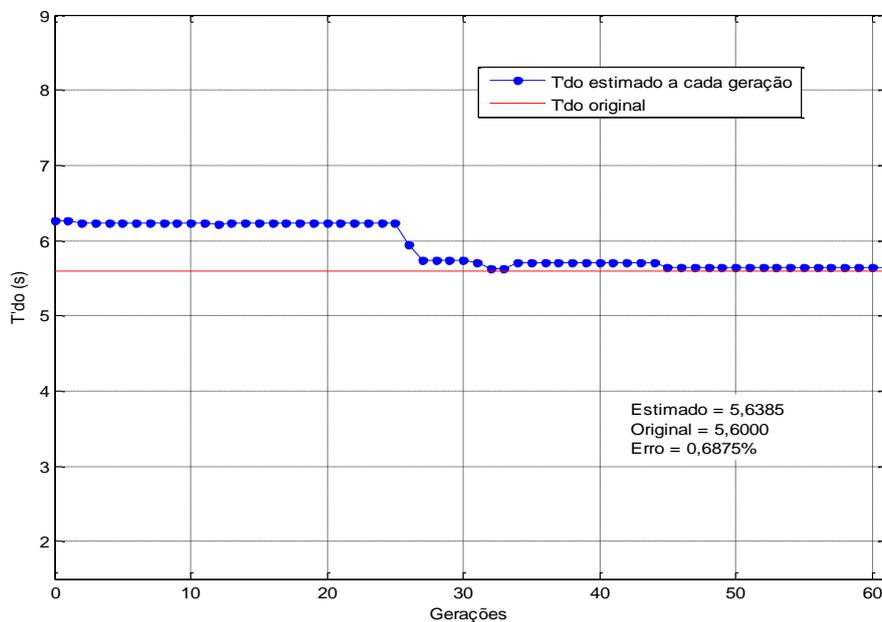


Figura 75: T'_{do} identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação

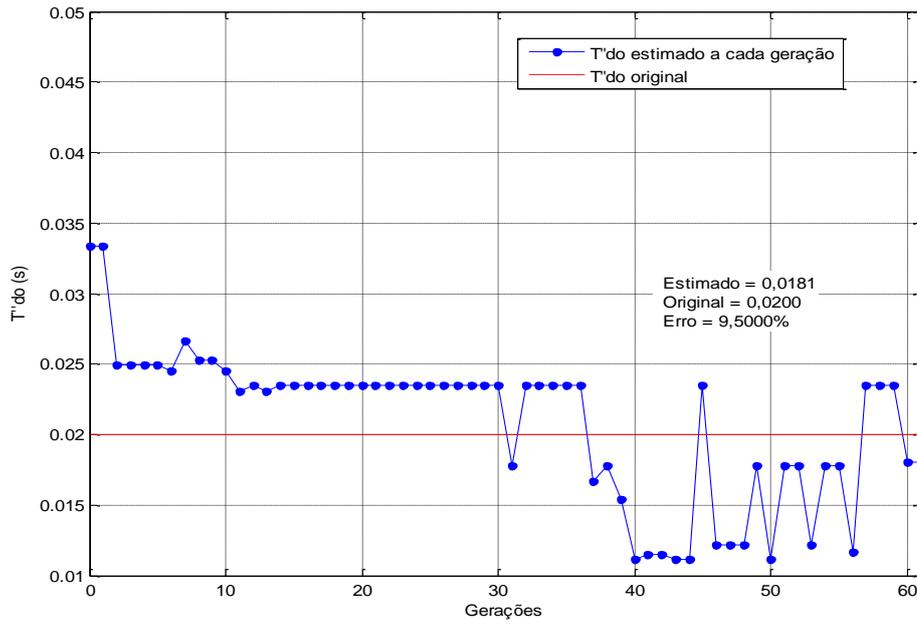


Figura 76: T''do identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação

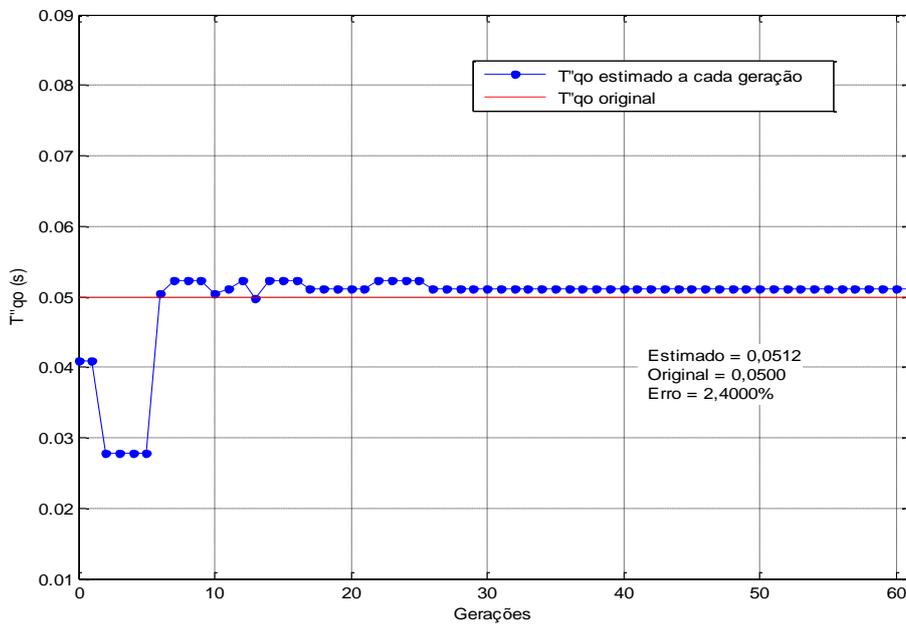


Figura 77: T''qo identificado a cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação

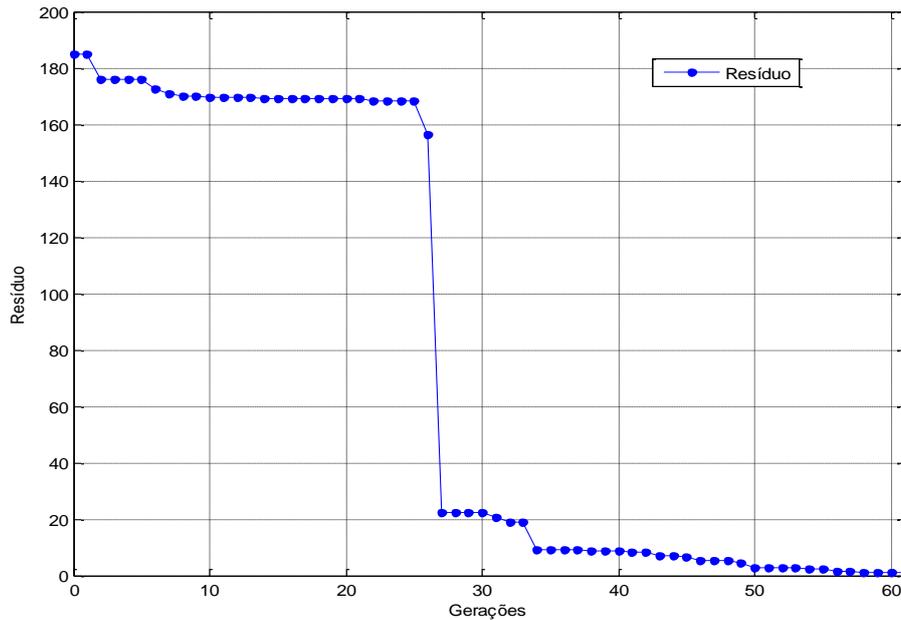


Figura 78: Resíduo associado ao melhor indivíduo de cada geração – Identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação

A Tabela 26 apresenta a melhor solução encontrada pelo AG, que corresponde ao indivíduo de maior adequabilidade da última geração processada. Juntamente com o valor identificado de cada parâmetro, são mostrados seus valores originais e o erro percentual de identificação.

Tabela 26: Resultado da identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luz Carlos Barreto através de dados de simulação

	Identificado	Valor Original	Erro (%)
X'd	0,2433	0,2400	1,3563
X''d	0,2154	0,2150	0,1857
T'do	5,6385	5,6000	0,6828
T''do	0,0181	0,0200	10,4972
T''qo	0,0512	0,0500	2,3437

Para validação dos parâmetros identificados, foi simulado o mesmo curto-circuito trifásico utilizado no método de identificação. Nas Figuras 79 a 82, a resposta do sistema representado por seus parâmetros originais é apresentada em azul, em contraparte à resposta do sistema com os parâmetros estimados, representada em

vermelho, para os mesmos sinais coletados no modelo do Gerador #01 e utilizados no cálculo da função adequabilidade.

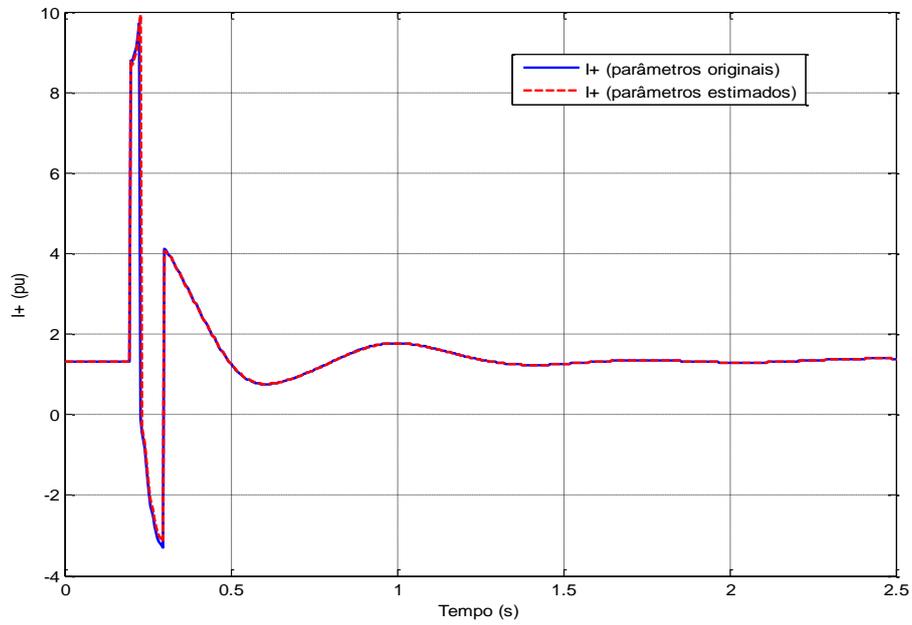


Figura 79: Comparação das respostas de I_+ ao curto-circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE
Luiz Carlos Barreto.

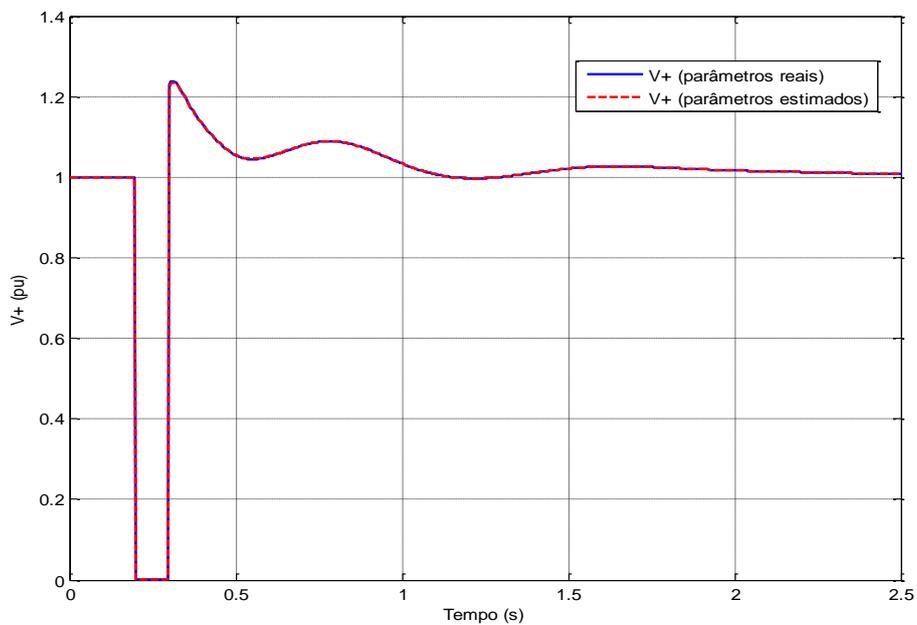


Figura 80: Comparação das respostas de V_+ ao curto-circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE
Luiz Carlos Barreto.

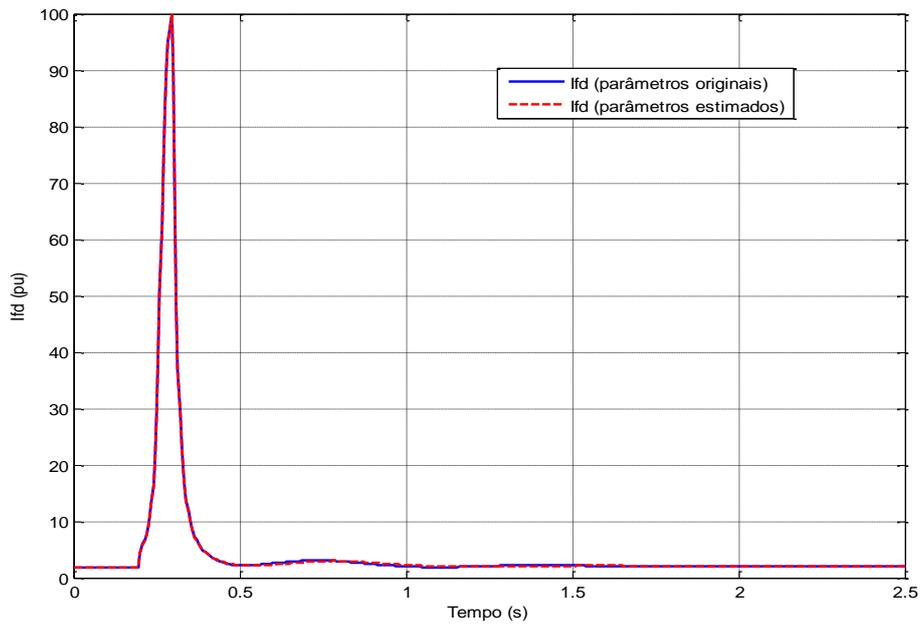


Figura 81: Comparação das respostas de I_{fd} ao curto-circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto.

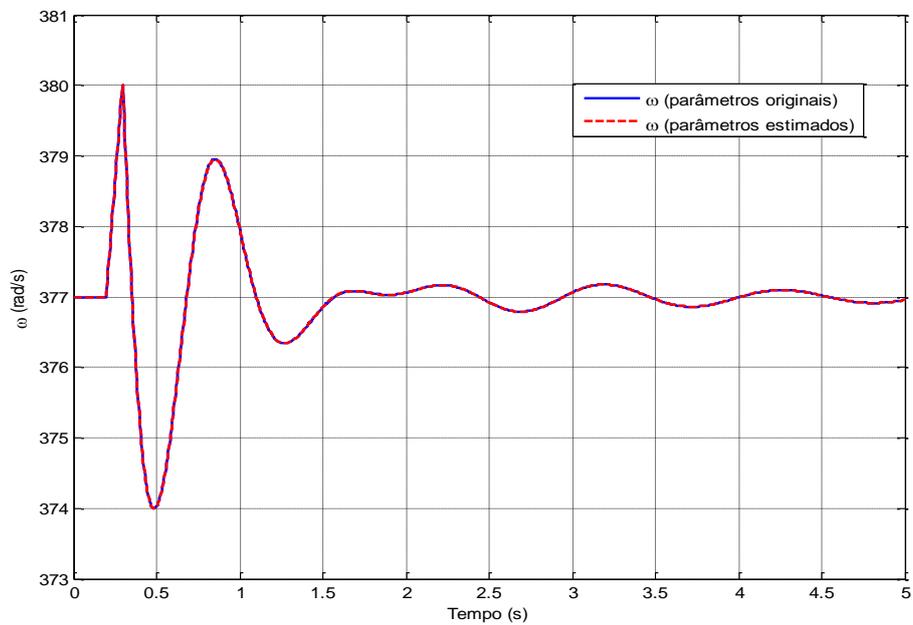


Figura 82: Comparação das respostas de ω ao curto-circuito trifásico na Barra# 01 do sistema UHE Luiz Carlos Barreto.

5.2. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZANDO DADOS DE MEDIÇÃO

Após os resultados obtidos com a metodologia de identificação utilizando dados provenientes de simulações eletromecânicas, procedeu-se à utilização de dados de medições obtidos de testes realizados em campo no Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto em operação normal e conectado ao sistema elétrico.

O sistema da UHE Luiz Carlos Barreto apresentado na Figura 29 foi devidamente reduzido de forma a contemplar apenas o gerador em estudo conectado a um barramento infinito, conforme apresentado no diagrama unifilar da Figura 83. O fluxo de potência foi executado de forma que a condição operativa do Gerador #01 na condição pré-distúrbio, apresentada na Tabela 27, fosse a mais próxima possível da observada nas medições realizada em campo.

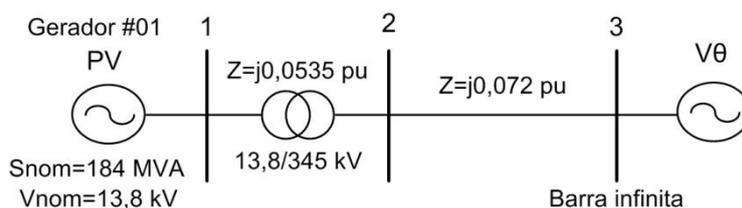


Figura 83: Diagrama unifilar do sistema reduzido da UHE Luiz Carlos Barreto

Tabela 27: Ponto de operação do sistema reduzido da UHE Luiz Carlos Barreto na condição pré-distúrbio

Barra	Tensão (Módulo)	Tensão (Ângulo)	Geração (MW)	Geração (MVar)	Carga (MW)	Carga (MVar)
1	1,0380	-5,10	132,8962	-3,3996	0,0000	0,0000
2	1,0420	-8,87	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	1,0423	-9,04	-132,8962	12,5850	0,0000	0,0000

Os dados de medição fornecidos por Furnas e utilizados no processo de identificação são compostos pela tensão de armadura, corrente de armadura e corrente

de campo coletados no Gerador #01 durante um evento caracterizado por um degrau negativo seguido de um degrau positivo, ambos de 0,025 pu de amplitude, aplicados ao sinal de referência do regulador de tensão da unidade geradora, conforme pode ser observado nas Figuras 84 a 86.

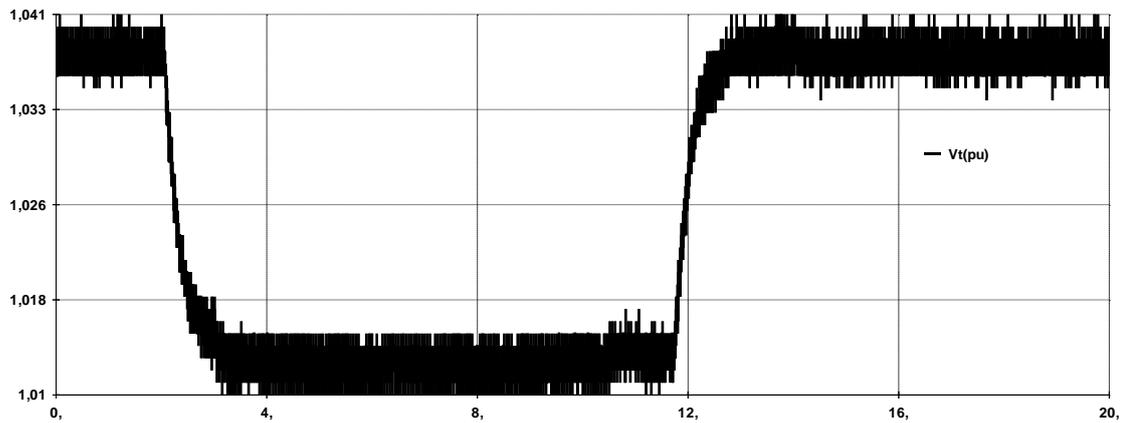


Figura 84: Sinal de medição da tensão de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto

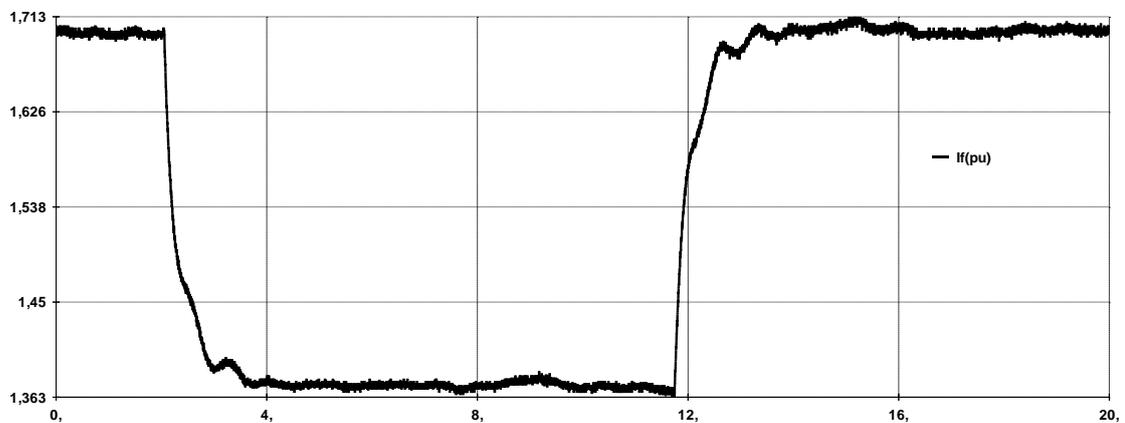


Figura 85: Sinal de medição da corrente de campo do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto

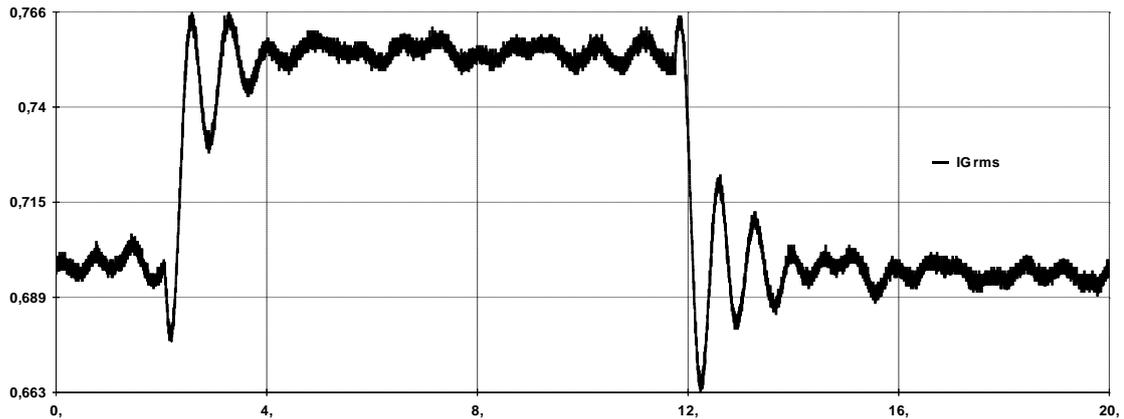


Figura 86: Sinal de medição da corrente de armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto

As medições foram realizadas com a máquina na região não linear da curva de saturação. Desta forma, fez-se necessária a representação da saturação magnética incorporada ao modelo matemático da máquina síncrona, feita através do modelo de curva de saturação apresentado no Anexo C. O modelo adotado, assim como os seus parâmetros, são os mesmos utilizados por Furnas em estudos de transitórios eletromecânicos.

No caso prático de identificação de parâmetros estudado nesta seção, a região destacada pela linha tracejada no esquema apresentado na Figura 13 é representada pelo sistema físico e o vetor Y é composto pelos dados de medições coletados em campo no Gerador #01. Esse vetor é comparado com o vetor \hat{Y} , o qual contém o resultado das simulações dinâmicas com as soluções potenciais, e a função adequabilidade é calculada conforme as equações (40) e (41). Os parâmetros do Gerador #01 fornecidos por Furnas e apresentados na Tabela 10 não são mais considerados como verdade absoluta, conforme assumido nos casos teóricos estudados, e são confrontados com os parâmetros identificados na tentativa de melhor reproduzir a dinâmica da máquina síncrona observada nos dados de medição.

O estudo do caso prático incorre em obstáculos a serem superados pelo método de identificação que não existiam nos estudos teóricos apresentados anteriormente, como é o caso do erro de medição e do erro de modelo. O processo de medição de grandezas físicas possui um erro intrínseco que está diretamente ligado a fatores como a

classe de exatidão e calibragem dos equipamentos, esquemas de ligações utilizados para medição do sinal desejado, interferência de sinais, entre outros. Além disso, os modelos matemáticos dos equipamentos e malhas de controle, por mais bem fundamentados que sejam, são apenas tentativas de se reproduzir a realidade e não podem ser considerados perfeitos simuladores da dinâmica dos sistemas físicos. A princípio, não se sabe como essas fontes de erro interferem no processo de identificação, no entanto, elas devem ser contornadas pelo método de forma que a resposta do sistema identificado seja a mais próxima possível da resposta do sistema físico.

As medições realizadas com o Gerador #01 na região não linear da curva de saturação impossibilitaram a utilização do método VMR para identificação dos parâmetros da armadura. Desta forma, a metodologia de identificação proposta na seção 4.3 foi utilizada apenas para a identificação dos parâmetros dos circuitos do rotor, assumindo os parâmetros da armadura conhecidos e iguais àqueles fornecidos por Furnas, sendo o resultado da identificação apresentado na seção 5.2.2.

Na seção 5.2.3 é mostrado o resultado da identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 utilizando o AG, conforme metodologia apresentada na seção 4.4.

Objetivando avaliar o impacto dos ruídos presentes nos dados de medições no processo de identificação utilizando o AG, na seção 5.2.1 foi investigado o desempenho do método utilizando dados provenientes de simulação dinâmica, corrompidos artificialmente com adição de ruídos.

5.2.1 Desempenho do AG perante ruídos acrescidos aos dados de medições

Conforme discutido no item anterior, existem algumas fontes de erros que influenciam o método de identificação de parâmetros quando são utilizados dados de medições, como por exemplo, o erro de modelo e o erro de medição. Além destes, também podemos destacar os ruídos inerentes ao processo de medição como um fator a ser contornado pelo método. Uma vez identificados os parâmetros, não é possível ponderar como cada um desses fatores contribui para formação do erro de identificação.

O objetivo do teste que será apresentado nesta seção foi eliminar a influência do erro de modelo e do erro de medição, avaliando a robustez do AG para identificação dos parâmetros da máquina síncrona perante a adição de ruídos aos dados obtidos de simulações dinâmicas, assim como foi feito com o método VMR. Para isso, os dados de simulação foram corrompidos pela adição de ruído branco de distribuição gaussiana com média zero e covariância determinada pelo SNR, expresso em dB. O sistema reduzido da UHE Luiz Carlos Barreto foi utilizado no ponto de operação descrito na Tabela 27 e um degrau negativo foi aplicado ao sinal de referência do regulador de tensão do Gerador #01, objetivando reproduzir da forma mais fiel possível o distúrbio aplicado em campo no momento da realização das medições. Os sinais da tensão e corrente de armadura e da corrente de campo, obtidos da simulação dinâmica, foram corrompidos por ruído branco gaussiano de SNR igual a 50 dB e utilizados como referência para identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 utilizando o AG.

Os parâmetros de controle do AG e o resultado do processo de identificação podem ser observados nas Tabelas 28 e 29, respectivamente. O espaço de busca do AG é o mesmo definido na Tabela 25. Nas Figuras 87 a 89 foram plotados os sinais de referência, em azul, e as repostas do sistema identificado, em vermelho.

Tabela 28: Parâmetros de controle do AG utilizados durante identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de simulação corrompidos com ruídos

Parâmetros de controle do AG	
Numero máximo de gerações	50
Numero de indivíduos	5000
Método de seleção	Torneio (3)
Probabilidade de cruzamento	0,6
Probabilidade de mutação	0,01
Tipo de cruzamento	Cruzamento em dois pontos
Outras técnicas	Escalonamento linear Elitismo de 4 indivíduos
Tempo de processamento para cada geração	
12 minutos e 10 segundos	

Tabela 29: Resultado da identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de simulação corrompidos com ruídos

	Identificado	Valor Original	Erro (%)
X'_d	0,2401	0,2400	0,0416
X''_d	0,2156	0,2150	0,2783
T'_{do}	5,6395	5,6000	0,7004
T''_{do}	0,0218	0,0200	8,2569
T''_{qo}	0,0498	0,0500	0,4016

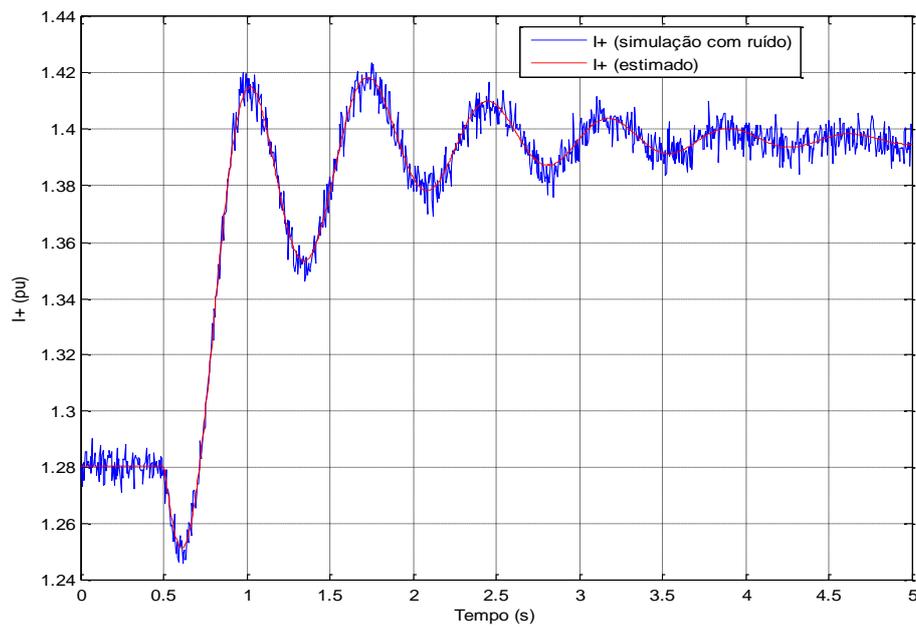


Figura 87: Comparação entre o sinal de referência da corrente de armadura com ruído (azul) e o sinal obtido com o modelo identificado (vermelho).

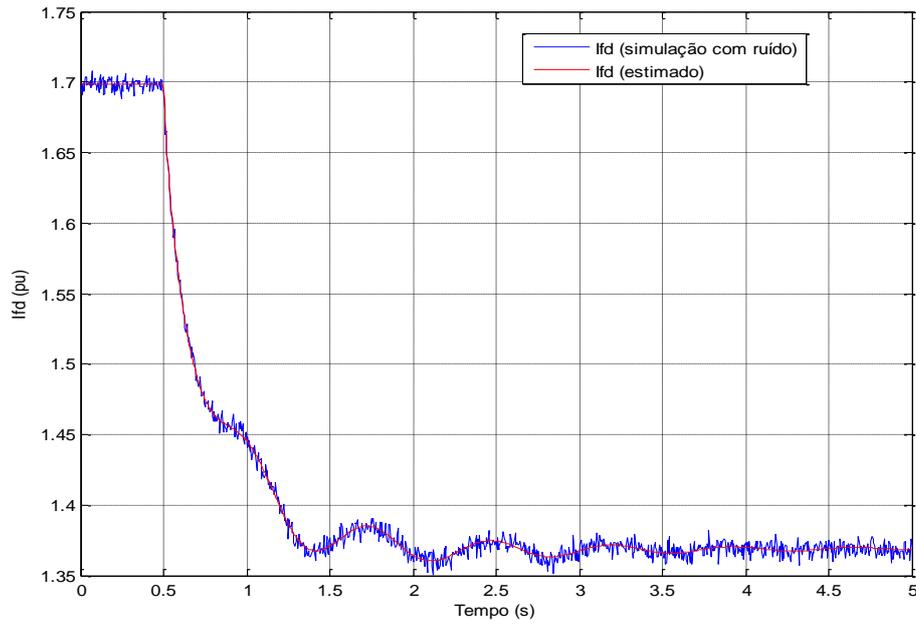


Figura 88: Comparação entre o sinal de referência da corrente de campo com ruído (azul) e o sinal obtido com o modelo identificado (vermelho).

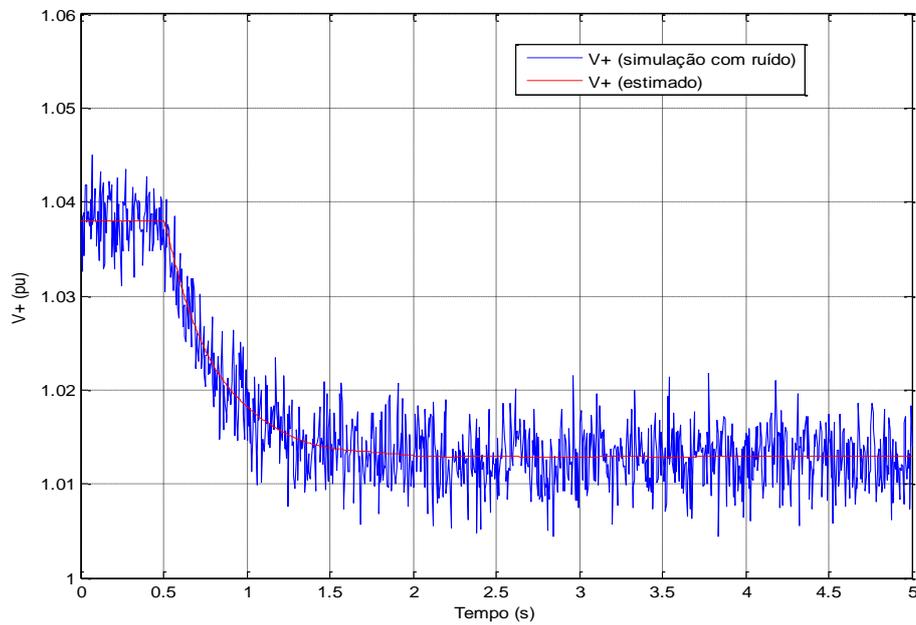


Figura 89: Comparação entre o sinal de referência da tensão de armadura com ruído (azul) e o sinal obtido com o modelo identificado (vermelho).

Os excelentes resultados obtidos comprovam a robustez da metodologia de identificação baseada em AG quando da presença de ruídos nos dados de entrada. Conseqüentemente, conclui-se que o erro de modelo e o erro de medição são as principais dificuldades a serem enfrentadas pela metodologia de identificação quando são utilizados dados de medições.

5.2.2. Identificação dos parâmetros de rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto

Devido às medições terem sido realizadas com a máquina na região não linear da curva de saturação, não foi possível a utilização do método VMR para identificação dos parâmetros da armadura. Assumindo os parâmetros da armadura conhecidos e iguais aos apresentados na Tabela 10, e incluindo o modelo de curva de saturação do gerador apresentado no Anexo C, a metodologia de identificação apresentada no item 4.3 foi utilizada para identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através dos dados de medição apresentados nas Figuras 84 a 86.

Com o propósito de deixar as simulações dinâmicas mais rápidas, foram utilizados apenas dados de medição correspondentes ao intervalo compreendendo os três segundos seguintes à aplicação do degrau negativo no sinal de referência do regulador de tensão do Gerador #01. O fluxo de potência e a simulação dinâmica do sistema reduzido da UHE Luiz Carlos Barreto foram executados de forma a se reproduzir da forma mais fiel possível o cenário observado nos dados de medição.

Na Tabela 30 são apresentados os parâmetros de controle do AG e o tempo de processamento obtido para cada geração. O intervalo de busca definido para cada parâmetro identificado é o mesmo apresentado na Tabela 25.

Tabela 30: Parâmetros do controle do AG durante a identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição

Parâmetros de controle do AG	
Numero máximo de gerações	50
Numero de indivíduos	5000
Método de seleção	Torneio (3)
Probabilidade de cruzamento	0,6
Probabilidade de mutação	0,01
Tipo de cruzamento	Cruzamento em dois pontos
Outras técnicas	Escalonamento linear Elitismo de 4 indivíduos
Tempo de processamento para cada geração	
9 minutos e 26 segundos	

Na Tabela 31 são exibidos os parâmetros do rotor fornecidos por Furnas e aqueles identificados pelo AG, assim como o valor do resíduo associado a cada um desses conjuntos de parâmetros. É importante enfatizar que os parâmetros fornecidos por Furnas não mais podem ser considerados como verdade absoluta e são utilizados apenas para comparação com os parâmetros identificados.

Tabela 31: Resultado da identificação dos parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição e comparação com os parâmetros fornecidos por Furnas

	Parâmetros de Furnas	Parâmetros identificados
X'd (pu)	0,2400	0,3324
X''d (pu)	0,2150	0,2417
T'do (s)	5,6000	4,7868
T''do(s)	0,0200	0,0163
T''qo (s)	0,0500	0,0854
Resíduo	0,05203932	0,0298652

Os resíduos apresentados na Tabela 31 foram calculados conforme (51):

$$RES = \frac{\alpha_{Vt} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (V_{Ti}^{IDE} - V_{Ti}^{MED})^2 \right] + \alpha_{Ia} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (I_{Ai}^{IDE} - I_{Ai}^{MED})^2 \right] + \alpha_{Ifd} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (I_{FDi}^{IDE} - I_{FDi}^{MED})^2 \right]}{\alpha_{Vt} + \alpha_{Ia} + \alpha_{Ifd}} \quad (51)$$

em que:

n : é o número de amostras dos dados de medição.

α_{V_t} , α_{I_a} e $\alpha_{I_{fd}}$: são pesos relacionados a cada grandeza medida utilizados no cálculo da média aritmética ponderada.

V_t^{IDE} , I_a^{IDE} e I_{fd}^{IDE} : são os resultados da simulação dinâmica com os parâmetros identificados para os sinais de tensão e corrente de armadura e corrente de campo, respectivamente.

V_t^{MED} , I_a^{MED} e I_{fd}^{MED} : são os dados de medição para os sinais de tensão e corrente de armadura e corrente de campo, respectivamente.

Os pesos da média ponderada na equação (51) podem ser utilizados nos casos em que se tem maior confiança em determinadas medições, de modo que estas tenham uma maior influência na formação do resíduo e, conseqüentemente, no processo de identificação. Além disso, os pesos podem ser utilizados para investigar a influência de cada medição na busca realizada pelo AG. Apesar dessas possibilidades, nas aplicações apresentadas neste trabalho todos os pesos foram considerados unitários.

O desempenho de cada grupo de parâmetros pode ser visualizado nas Figuras 90 a 92, onde são apresentados os resultados da simulação dinâmica com os parâmetros identificados (em vermelho) e com os parâmetros fornecidos por Furnas (em azul), juntamente com os dados de medição utilizados no processo de identificação (em preto).

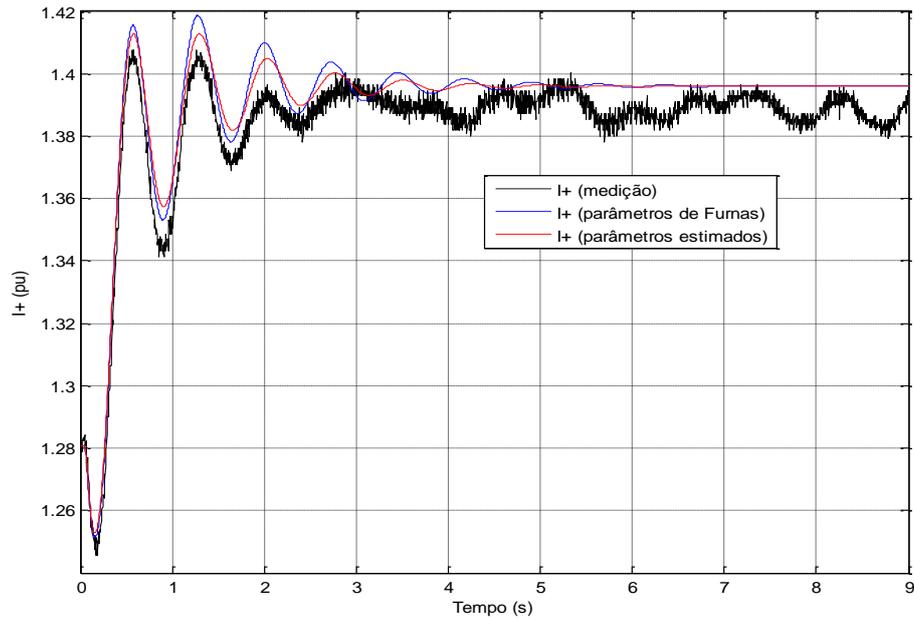


Figura 90: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de armadura - Identificação parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.

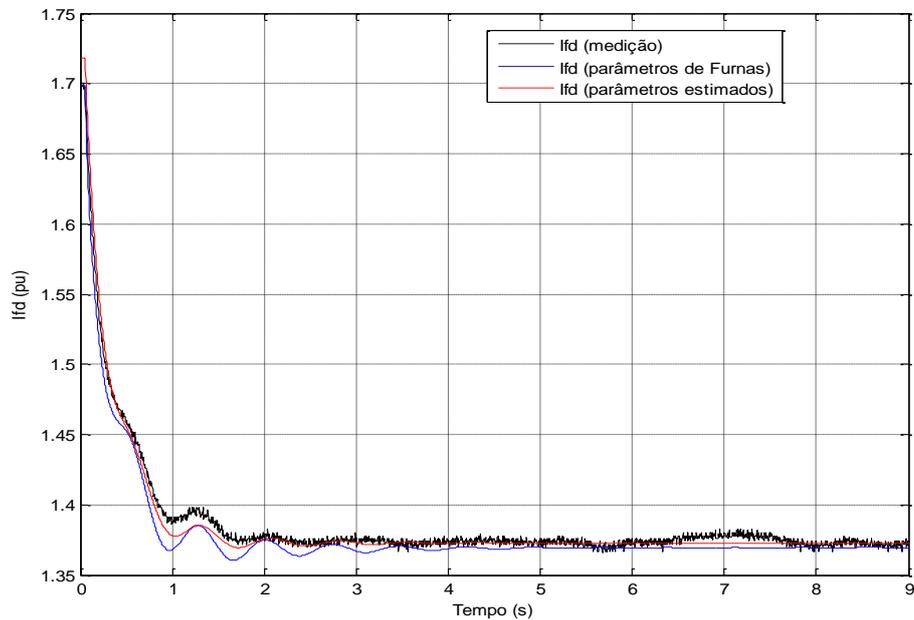


Figura 91: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de campo - Identificação parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.

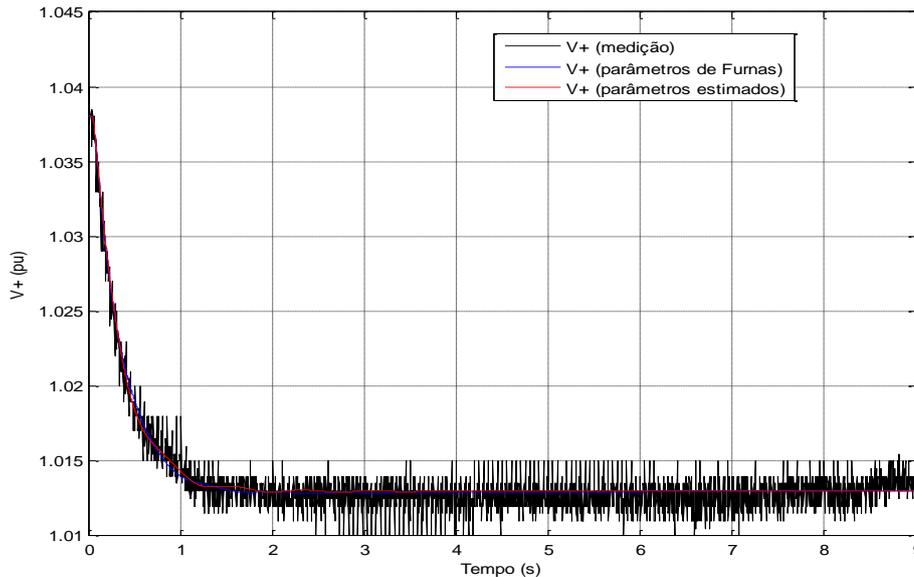


Figura 92: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da tensão de armadura - Identificação parâmetros do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.

Embora os valores dos parâmetros identificados sejam significativamente diferentes daqueles fornecidos por Furnas, o desempenho dos dois conjuntos de parâmetros observados nos gráficos das Figuras 89 a 91 é visualmente similar, com uma ligeira vantagem para os parâmetros identificados na tentativa de reprodução das dinâmicas dos dados de medição observadas nos sinais da corrente de campo e tensão terminal. Essa constatação é comprovada matematicamente pelo menor valor do resíduo associado ao conjunto de parâmetros identificados, indicando que, numericamente, a resposta do modelo da máquina com esses parâmetros aproxima-se melhor resposta do sistema físico para o caso estudado.

5.2.3. Identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto

Conforme a metodologia apresentada na seção 4.4, o AG foi utilizado para identificação de todos os parâmetros do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através dos dados de medição apresentados nas Figuras 84 a 86. Desta forma, cada

indivíduo é composto por um conjunto de oito valores que representam uma solução potencial para o conjunto de parâmetros a serem identificados, conforme (23) (a resistência da armadura não foi identificada), seguindo o processo de identificação apresentado na Figura 13.

Da mesma forma que na identificação dos parâmetros do rotor, foram utilizados apenas os dados de medição correspondentes ao intervalo compreendendo os três segundos seguintes à aplicação do degrau negativo no sinal de referência do regulador de tensão do Gerador #01.

Na Tabela 32 são mostrados os parâmetros de controle do AG e o tempo de processamento obtido para cada geração. A Tabela 33 apresenta o intervalo de busca de cada parâmetro a ser identificado, definido com base nos supostos valores “corretos” utilizados por Furnas (Tabela 10). O resultado da identificação é apresentado na Tabela 34 e os resíduos apresentados foram calculados conforme (51).

Tabela 32: Parâmetros de controle do AG utilizados na identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição

Parâmetros de controle do AG	
Numero máximo de gerações	100
Numero de indivíduos	6000
Método de seleção	Torneio (3)
Probabilidade de cruzamento	0,9
Probabilidade de mutação	0,2
Tipo de cruzamento	Cruzamento em dois pontos
Outras técnicas	Escalonamento linear Elitismo de 4 indivíduos
Tempo de processamento para cada geração	
11 minutos e 30 segundos	

Tabela 33: Espaço de busca do AG utilizado na identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição

Espaço de Busca do AG								
Parâmetros	X_d (pu)	X_q (pu)	X_l (pu)	X'_d (pu)	X''_d (pu)	T'_{do} (s)	T''_{do} (s)	T''_{qo} (s)
Máximo	1,3	1,0	0,2	0,5	0,4	9,0	0,05	0,09
Mínimo	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	2,0	0,01	0,02

Tabela 34: Resultado da identificação dos parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir dos dados de medição

	Parâmetros de Furnas	Parâmetros estimados
X_d (pu)	0,9359	0,9521
X_q (pu)	0,5900	0,6435
X_l (pu)	0,1850	0,1990
X'_d (pu)	0,2400	0,2864
X''_d (pu)	0,2150	0,2319
T'_{do} (s)	5,6000	5,2311
T''_{do}(s)	0,0200	0,0178
T''_{qo} (s)	0,0500	0,0894
Resíduo	0,05203932	0,02355331

Nas Figuras 93 a 95 são mostrados os resultados da simulação dinâmica com os parâmetros de Furnas (azul), com os parâmetros identificados (vermelho) e com os dados de medição (preto) para um período de nove segundos após a aplicação de um degrau negativo de 2,5% na tensão de referência do regulador de tensão do Gerador #01.

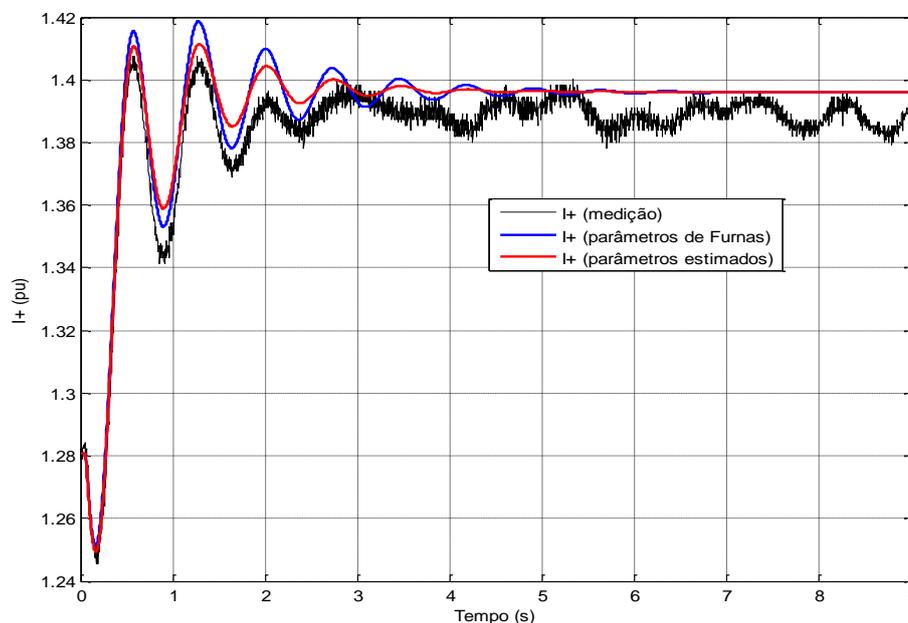


Figura 93: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de armadura - Identificação parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.

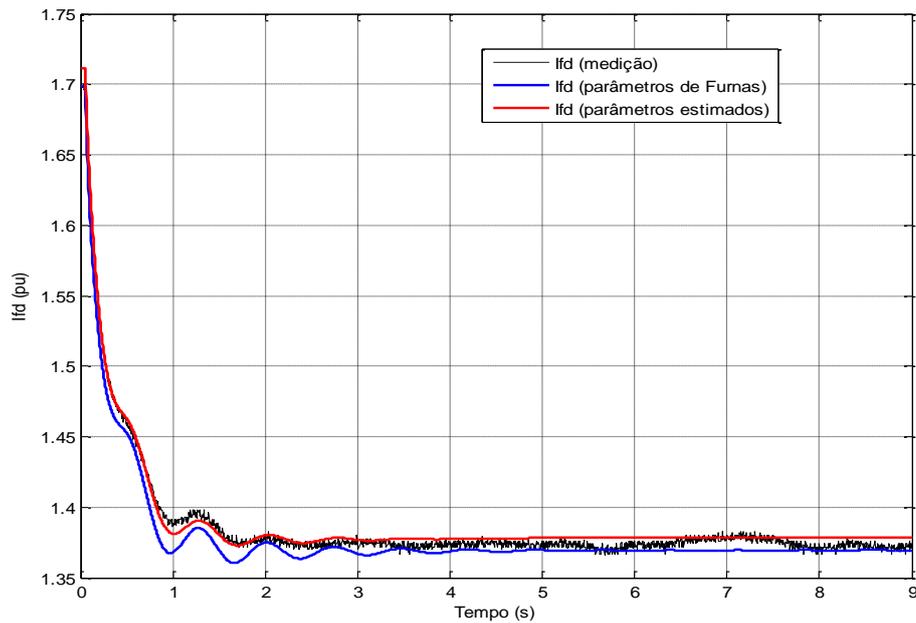


Figura 94: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da corrente de campo - Identificação parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.

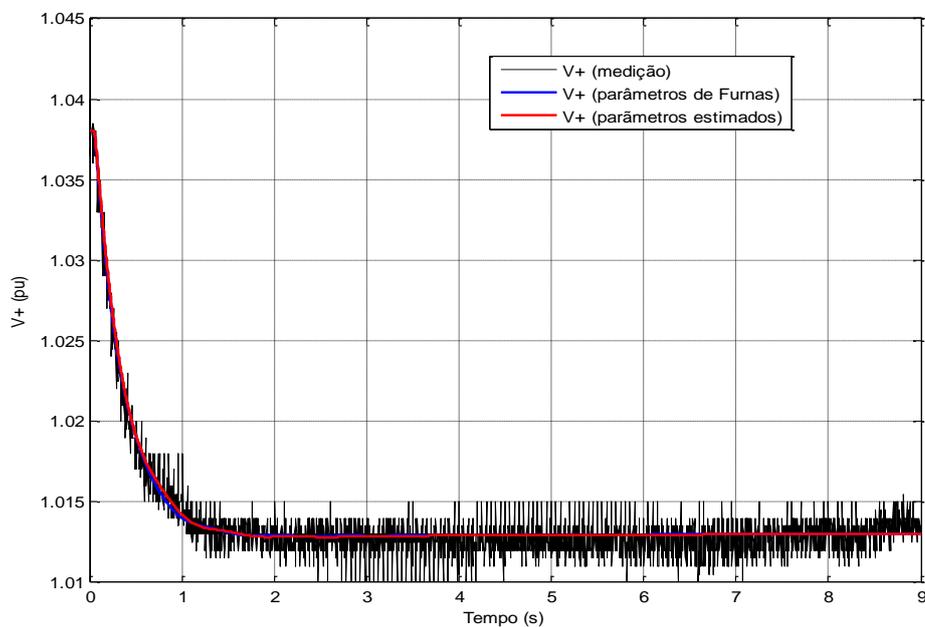


Figura 95: Comparação do desempenho dos parâmetros identificados e dos parâmetros fornecidos por Furnas para o sinal da tensão de armadura - Identificação parâmetros da armadura e do rotor do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto a partir de dados de medição.

Embora a diferença seja pequena, é possível observar, principalmente nos gráficos da corrente de campo e da tensão da armadura, que durante os três primeiros segundos de simulação o sistema com os parâmetros identificado possui um melhor desempenho quando confrontado com o resultado da simulação com os parâmetros fornecidos por Furnas, tomando como referência os dados de medição utilizados na identificação. Para comprovar essa conclusão, na Tabela 34 é mostrado que o resíduo do melhor indivíduo encontrado pelo AG é 45% do resíduo associado aos parâmetros fornecidos por Furnas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou uma metodologia de identificação de parâmetros de máquinas síncronas utilizando o método da Verossimilhança Máxima Recursiva (VMR) e Algoritmos Genéticos (AG), sem a necessidade de desconectar o equipamento do sistema elétrico.

O método VMR, apresentado na seção 4.1, foi utilizado para identificação dos parâmetros dos circuitos da armadura com a máquina operando na região linear da curva de saturação. Os testes realizados com os dados provenientes de simulações eletromecânicas, cujos resultados são apresentados no item 5.1, comprovam a excelente exatidão, rápida convergência e robustez do método VMR perante a adição de ruídos aos dados de simulação, apresentando bons resultados mesmo para níveis elevados de ruídos. Os distúrbios simulados para excitar as dinâmicas da máquina foram degraus de pequena amplitude no sinal de referência do regulador de tensão, não comprometendo a operação estável da máquina conectada ao sistema elétrico, sendo facilmente reproduzíveis em campo. O método exibiu melhor desempenho quando os dados do período transitório foram excluídos do processo recursivo de identificação, conforme a comparação apresentada na seção 5.1.1, exemplificando que é necessário apenas o processamento de duas condições de equilíbrio distintas para que sejam obtidas identificações consistentes. A utilização dos resultados de simulações trifásicas equilibradas e desequilibradas, cujos resultados são apresentados na seção 5.1.2.3, foi interessante para reproduzir melhor as condições encontradas em casos práticos, e o método VMR apresentou excelentes resultados, principalmente na simulação trifásica desequilibrada, na qual foi possível obter identificações com desejável exatidão para ruídos de até 50 dB de SNR acrescidos aos resultados da simulação.

Uma vantagem relevante do método VMR é que as incertezas na definição dos parâmetros nos modelos dos outros equipamentos do sistema não influenciam a

identificação dos parâmetros da máquina síncrona, uma vez que são utilizados apenas equações do modelo da máquina e dados de medições coletados neste equipamento.

Em relação às desvantagens e limitações do método VMR, podemos citar que ele se restringe a aplicações em que a máquina se encontra na região linear da curva de saturação. Além disso, é necessário, a princípio, o conhecimento do ângulo de carga da máquina para referenciar os sinais das tensões e correntes de fase da armadura ao sistema de eixo dq. A medição física do ângulo de carga não é trivial e neste trabalho essa grandeza foi calculada através da utilização do valor do parâmetro X_q (um dos parâmetros da armadura a ser identificado) fornecido pelo fabricante da máquina.

Para identificação dos parâmetros dos circuitos do rotor, o AG foi utilizado inicialmente a partir de dados provenientes de simulações eletromecânicas, de acordo com o esquema de identificação descrito na seção 4.2. Os testes realizados nos sistemas WSCC e UHE Luiz Carlos Barreto apresentaram excelentes resultados, conforme pode ser visto nas seções 5.1.3 e 5.1.4, respectivamente. Assim como o método VMR, o AG mostrou-se robusto perante a adição de ruído aos dados de simulação, como pode ser observado na seção 5.2.1, onde o AG foi utilizado para identificação dos parâmetros do rotor do gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto através de dados de simulação corrompidos com ruídos de 50 dB de SNR. As simulações realizadas para validação dos parâmetros identificados mostraram que o comportamento dinâmico do sistema original e do sistema identificado são praticamente idênticos mesmo para distúrbios severos, como a aplicação de curto-circuito trifásico.

Em todos os testes realizados, o AG foi utilizado com um amplo espaço de busca, definido de acordo com a faixa típica de valores de parâmetros de hidrogeradores encontrados na literatura especializada, o que viabiliza sua aplicação em situações em que não se tem idéia dos valores dos parâmetros a serem identificados. Além disso, uma característica interessante do método de identificação baseado em AG é a flexibilidade que se tem na escolha dos sinais para compor os vetores \mathbf{Y} e $\tilde{\mathbf{Y}}$ utilizados no cálculo da função adequabilidade, podendo ser definidos de acordo com a disponibilidade de informações (medições).

Diferentemente do método VMR, a identificação através do AG não requer a definição, a princípio, do ângulo de carga, uma vez que o mesmo é definido no próprio processo de identificação, durante a simulação dinâmica. Além disso, o método pode ser

utilizado para identificação de parâmetros de máquinas operando na região não linear da curva de saturação, desde que a saturação magnética esteja devidamente representada no modelo matemático da máquina.

Resumidamente, a metodologia híbrida de identificação proposta para o caso não saturado, composta pelo método VMR e pelo AG, apresentou resultados satisfatórios quando utilizada com dados de simulações dinâmicas.

Partindo para o caso prático de identificação utilizando os dados de medição fornecidos por Furnas, não foi possível a utilização do método VMR para identificação dos parâmetros da armadura do Gerador #01 da UHE Luiz Carlos Barreto, pois as medições foram realizadas com a máquina na região não linear da curva de saturação. Alternativamente, o AG foi utilizado para identificação de todos os parâmetros do gerador e os resultados foram confrontados com o conjunto de parâmetros utilizados por Furnas. O resíduo associado a cada grupo de parâmetros e os testes de validação, como pode ser observado na seção 5.2.3, comprovam matematicamente que o sistema representado com os parâmetros identificados apresenta melhor desempenho na reprodução da dinâmica observada nos dados de medição quando se comparado à simulação utilizando os parâmetros fornecidos por Furnas para o cenário específico estudado.

Portanto, diante de todos os resultados obtidos, o objetivo proposto para este trabalho foi atingido através do desenvolvimento de uma metodologia consistente para identificação de parâmetros de máquinas síncronas através da utilização de dados operacionais, com eficácia comprovada através de um estudo prático envolvendo um dos geradores da UHE Luiz Carlos Barreto.

Como possíveis trabalhos futuros, visa-se a utilização de dados de medições coletados em um gerador operando na região linear da curva de saturação para testar o desempenho do método VMR na identificação dos parâmetros da armadura. O AG também pode ser testado com a finalidade de identificar os parâmetros de modelo de saturação magnética da máquina, objetivando a validação de modelos existentes ou a determinação de novos modelos para este fenômeno. Adicionalmente, a parte teórica da metodologia final proposta pode ser melhorada com a inclusão de um refinamento da solução obtida pelo AG, através de uma otimização pelo método de Newton, conforme mostrado na Figura 96, ou pelo método de busca local *Climbing Hill*. Além disso, para que a metodologia proposta possa se tornar um padrão no setor elétrico é essencial que

sejam realizados mais testes com dados medidos em campo, explorando melhor o impacto dos ruídos no processo de identificação e desenvolvendo a parte de filtragem de sinais.

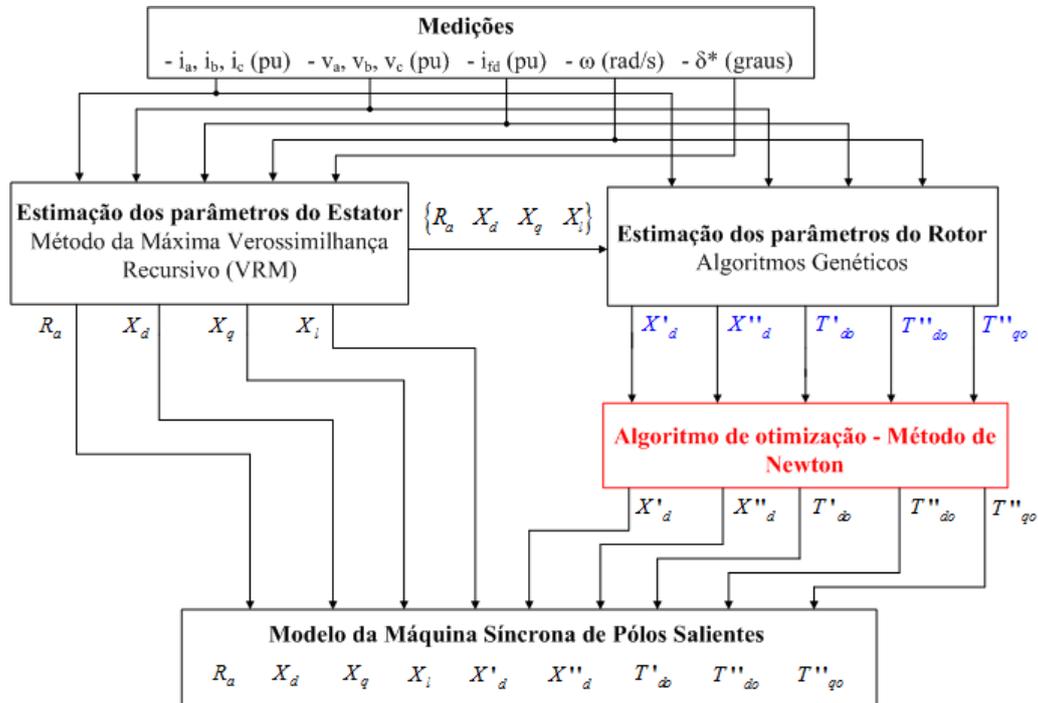


Figura 96: Possível refinamento da metodologia proposta

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] "IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines", *IEEE Std 115-1995*, vol., no., pp.i, 1995.

[2] ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A., **Power System Control and Stability**. Iowa State University Press, Ames, 1977.

[3] "IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses", IEEE Std 1110-2002 (Revision of IEEE Std 1110-1991), vol., no., pp.0_1-72, 2003.

[4] PARK R.H., "Two Reaction Theory of Synchronous Machines", *AIEE Trans. Part 1*, vol. 46, pp. 716-727, 1929.

[5] PARK R.H., "Two Reaction Theory of Synchronous Machines", *AIEE Trans. Part 2*, vol. 52, pp. 352-354, 1933.

[6] RANKIN, A. W., "Per-Unit Impedances of Synchronous Machines", *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol.64, no.8, pp.569-573, Aug. 1945.

[7] RANKIN, A. W., "Per-Unit Impedances of Synchronous Machines---II", *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol.64, no.12, pp.839-841, Dec. 1945.

[8] KUNDUR, P. S., **Power System Stability and Control**. 4 ed. New York, McGraw-Hill, 1994.

[9] SAADAT, H., **Power System Analysis**. 3 ed. McGraw-Hill Inc., Boston, 1999.

[10] ANDERSON, P. M.; AGRAWAL, B. L.; J. E. VAN NESS, J. E.; **Subsynchronous Resonance in Power System**. IEEE Press, New York, 1990.

[11] LJUNG, L., **System Identification, Theory for the User**. Prentice-Hall, 2 ed., Englewood Cliffs, NJ, 1999.

[12] WRIGHT, S. H., "Determination of Synchronous Machine Constants by Test", *AIEE Trans.*, v. 50, pp. 1331–1351, December 1931.

[13] COULTES, M.E.; WATSON, W.; "Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol.PAS-100, no.4, pp.1480-1489, April 1981.

[14] ESCARELA-PEREZ, R.; NIEWIEROWICZ, T.; CAMPERO-LITTLEWOOD, E.; "Synchronous machine parameters from frequency-response finite-element simulations and genetic algorithms", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.16, no.2, pp.198-203, Jun 2001.

[15] NIEWIEROWICZ, T.; ESCARELA-PEREZ, R.; CAMPERO-LITTLEWOOD, E.; "Frequency-dependent equivalent circuit for the representation of synchronous machines", *Electric Power Applications, IEE Proceedings -* , vol.152, no.3, pp. 723- 730, 6 May 2005

[16] DANDENO, P.L.; KARMAKER, H.C.; AZUAJE, C.; GLINKOWSKI, M.; KAMWA, I.; SALON, S.J.; SAUNDERS, R.M.; UMANS, S., "Experience with standstill frequency response (SSFR) testing and analysis of salient pole synchronous machines", *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.14, no.4, pp.1209-1217, Dec 1999.

[17] BORTONI, E. C., “*Modelagem de máquinas síncronas de polos salientes empregando técnicas de resposta em frequência*”. Tese de D.Sc. – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

[18] BORTONI, E. C.; JARDINI, J.A., "A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.19, no.4, pp. 687- 691, Dec. 2004.

[19] PILLUTLA, S.; KEYHANI, A., "Neural network based modeling of round rotor synchronous generator rotor body parameters from operating data", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.14, no.3, pp.321-327, Sep 1999.

[20] KARAYAKA, H.B.; KEYHANI, A.; AGRAWAL, B.; SELIN, D.; HEYDT, G.T., "Methodology development for estimation of armature circuit and field winding parameters of large utility generators", *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.14, no.4, pp.901-908, Dec 1999.

[21] VALVERDE, G.; KYRIAKIDES, E.; TERZIJA, V., “A non-linear approach for on-line parameter estimation of synchronous machines”, *17th Power Systems Computation Conference*, Stockholm, Sweden, paper no. 189, pp. 1-7, Aug. 2011.

[22] VALVERDE, G.; KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G.T.; TERZIJA, V., "Nonlinear Estimation of Synchronous Machine Parameters Using Operating Data", *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.26, no.3, pp.831-839, Sept. 2011.

[23] TSAI, H.; KEYHANI, A.; DEMCKO, J.; FARMER, R.G., "On-line synchronous machine parameter estimation from small disturbance operating data", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.10, no.1, pp.25-36, Mar 1995.

[24] KARAYAKA, H.B.; KEYHANI, A.; HEYDT, G.T.; AGRAWAL, B.L.; SELIN, D.A., "Synchronous generator model identification and parameter estimation from operating data", *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.18, no.1, pp. 121- 126, Mar 2003.

[25] GOODWIN, G. C., **Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis**. Academic Press, New York, 1977.

[26] NELLES, O., **Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models**. Springer, Berlin, 2001.

[27] NARENDRA, K.; GALLMAN, P., "An iterative method for the identification of nonlinear systems using a Hammerstein model", *Automatic Control, IEEE Transactions on* , vol.11, no.3, pp. 546- 550, Jul 1966.

[28] BILLINGS, S. A., " Identification of nonlinear systems – a survey", *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Part D, 127, pp: 272–285, 1980.

[29] DATTA, K. B., MOHAN, B. M., **Orthogonal Functions in Systems and Control**. World Scientific Publishing, Singapore, 1995.

[30] FARD, R.D.; KARRARI, M.; MALIK, O.P., "Synchronous generator model identification for control application using volterra series", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.20, no.4, pp. 852- 858, Dec. 2005.

[31] GOLDBERG, D. E., **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.

[32] MICHALEWICS, Z., **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**, 3 ed. Spring-Verlag, New York, 1992.

[33] L. DAVIS, (ed). **Handbook of Genetic Algorithms**. Van Nostrand Reinold, New York 1991.

[34] GEN, M.; CHENG, R., **Genetic Algorithms and Engineering Design**, John Wiley & Sons, New York. 1997.

[35] GOLDBERG, D.E.; MILMAN, K.; TIDD, C., "Genetic Algorithms: A Bibliography", *Report number: 92008 – july 1992 – University of Illinois at Urbana-Champaign – Departament of General Engeneering*.

[36] "Programa ANATEM - Análise de transitórios eletromecânicos – Manual do usuário" – V. 10.04.02, CEPTEL, Setembro de 2009.

[37] MACEDO, N. J. P.; ELLIS, M. F.; CERQUEIRA, G. D., "Testes de fábrica do sistema de excitação da UG01 da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho", *Nota Técnica DEE.O.002.2007*, Setembro 2007.

[38] MACEDO, N. J. P., CERQUEIRA, G. D., “Modelo do Novo Sistema de Excitação da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho para o Programa ANATEM”, *Nota Técnica DEE.O.003.2010*, Abril 2010.

[39] MACEDO, N. J. P.; ELLIS, M. F.; CERQUEIRA, G. D., “Testes de fábrica do sistema de excitação da UG02 da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho – Alterações no software do RAT”, *Nota Técnica DEE.O.007.2008*, Julho 2008.

[40] “Simulight - Simulador para redes elétricas com geração distribuída - Manual do usuário” - V.3.0, disponível em <http://www.coep.ufrj.br/~tarang/Simulight>.

[41] G. N. TARANTO, J. M. T. MARINHO, D. M. FALCÃO, T. M. L. ASSIS, S. L. ESCLANTE, J. I. R. RODRIGUEZ & C. E. V. PONTES, “Simulador de Redes de Distribuição Ativas com Modelagem Monofásica/Trifásica”, *Anais do XII SEPOPE*, Rio de Janeiro, RJ, Maio 2012.

[42] MARINHO, J.M.T.; TARANTO, G.N.; , "A Hybrid Three-Phase Single-Phase Power Flow Formulation," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.23, no.3, pp.1063-1070, Aug. 2008

[43] GOLDBERG, D. E., “Genetic and Evolutionary Algorithms Come of Age” – *Communication of ACM* – march 1994 – vol 37 number 3.

[44] LINDEN, R., **Algoritmos Genéticos – Uma Importante Ferramenta da Inteligência Computacional**. 2 ed. Brasport, Rio de Janeiro, 2008.

[45] TANOMARU, J. “Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos”. *Anais do II Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, Curitiba, 1995.

[46] GOLDBERG, D., KORB, B., DEB, K., “Messy genetic algorithms: motivation, analysis, and first results”. *Complex Systems*, vol. 3, pp. 493-530, 1989.

[47] WETZEL, A., “Evaluation of the effectiveness of genetic algorithms in combinatorial optimization”, *Technical Report*, University of Pittsburgh, 1983.

ANEXO A

ALGORITMOS GENÉTICOS

Neste anexo será feita uma introdução aos Algoritmos Genéticos (AG) na qual será apresentada a estrutura básica do AG e serão discutidas as principais características que diferenciam estes algoritmos dos demais métodos de otimização. Cada etapa do AG será brevemente descrita e, na parte final, serão apresentadas duas técnicas normalmente empregadas para melhorar o desempenho desses algoritmos e que foram utilizadas neste trabalho.

A.1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1960 tem sido crescente o interesse em imitar a evolução dos seres vivos para criar algoritmos poderosos a serem utilizados em problemas de otimização de difícil solução. O termo utilizado para dar nome a tais técnicas é denominado Computação Evolucionária (CE) e constitui o ramo da computação que tem por base os mecanismos evolutivos encontrados na natureza. As técnicas utilizadas na Computação Evolucionária usam modelos probabilísticos para simular os processos de evolução, observados por Darwin em seus estudos sobre seleção natural e evolução das espécies, para resolver problemas de otimização encontrando soluções ótimas e subótimas. Em todos os modelos computacionais desenvolvidos é simulada a evolução das espécies através dos operadores genéticos de seleção, reprodução e mutação nos indivíduos, fazendo com que o desempenho médio da população no problema proposto melhore com o passar das gerações.

Atualmente, a CE engloba um número crescente de técnicas, das quais as mais importantes são:

- Algoritmos Genéticos – AG (Holland, 1962)
- Programação Evolucionária – PE (Fogel, Owens, and Walsh, 1962)
- Estratégias Evolucionárias – EE (Rechenberg & Schwefel, 1962)
- Programação Genética – PG (Koza, 1990)
- “Particle Swarm Optimization” – PSO (Kennedy & Eberhart, 1995)

Os AGs são as mais conhecidas técnicas de Computação Evolucionária e foram desenvolvidas por Holland [31] na década de sessenta. Trata-se de técnicas estocásticas de busca e otimização global, ou seja, são algoritmos com nenhuma garantia da qualidade da solução encontrada, mas tendendo a encontrar a solução ótima ou subótima. Os AGs diferem de técnicas convencionais de otimização por utilizarem um conjunto de soluções codificadas de tamanho definido, denominada população, a qual geralmente é criada de forma pseudoaleatória. Cada solução ou indivíduo na população é submetido aos operadores genéticos de recombinação (cruzamento e mutação) e de evolução (seleção). Os operadores genéticos, a partir da análise da qualidade (adequabilidade) de cada indivíduo, calculada através da função adequabilidade, simulam um processo de evolução natural, como proposto por Darwin. Após a aplicação dos operadores é gerada uma nova população de indivíduos que substituirão os da geração anterior, com um maior valor médio de adequabilidade, caracterizando assim a evolução dos indivíduos. Após um número de gerações o algoritmo converge para uma solução, que representa a melhor solução encontrada pelo algoritmo, a qual tem grande chance de ser a solução ótima global. Esse procedimento é ilustrado na estrutura básica do AG mostrada a seguir:

```
[
  Inicie a população
  Avalie a população inicial
  Faça_enquanto critério_de_parada não é satisfeito
  [
    Selecione indivíduos da população
    Altere esses indivíduos para criar nova população
      - Combinação
      - Mutação
    Avalie nova população
  ]
]
```

Uma importante diferença dos AGs em relação às outras técnicas de otimização é que essas começam com um único candidato de solução e realizam uma procura iterativa em busca da solução ótima. Por outro lado, os AGs usam uma população de candidatos para encontrar a solução global, percorrendo as diversas áreas do espaço de busca. Assim, os AGs são comumente aplicados para resolver problemas de otimização combinatória que envolvem uma grande quantidade de possíveis soluções, assim como para resolver problemas de otimização em que não se tem muita informação sobre o comportamento da função objetivo ao longo do espaço de busca da solução.

Dentre outras diferenças que os AGs apresentam em relação aos métodos convencionais de otimização de busca, pode-se destacar [31,43,44]:

- Operam em um conjunto de soluções codificadas, não com as próprias soluções;
- Possuem característica paralela, pois mantém uma população de potenciais soluções que são avaliadas simultaneamente, sendo indicados para a solução de problemas com espaço de busca muito grande;
- Característica pseudoaleatória e probabilística (com a utilização de operadores genéticos), não utilizando apenas informação local, tendendo a não chegar a respostas de máximo local;
- Não são totalmente aleatórios, pois utilizam a informação dos indivíduos da população atual para gerar indivíduos provavelmente mais aptos para a próxima geração. Utilizam a seleção para alcançar áreas potencialmente promissoras e o cruzamento para combiná-las de forma a gerar soluções de melhor qualidade;
- Usam apenas a informação da função adequabilidade, não sendo necessário o cálculo de derivadas e não sendo afetados por funções descontínuas. Logo, são indicados para problemas com alta complexidade numérica;
- Os operadores genéticos possuem natureza estocástica, com certa probabilidade de ocorrer, diferente de outras técnicas que possuem natureza determinística.

A.2. TERMINOLOGIA EMPREGADA

A teoria dos AGs utiliza uma série de metáforas biológicas como analogia entre as técnicas e propriedades do algoritmo de otimização e os fenômenos naturais observados no processo de seleção natural e evolução dos seres vivos. Algumas dessas metáforas serão exemplificadas neste item, possibilitando um melhor entendimento da teoria dos AGs.

O primeiro passo para aplicação de AGs a um problema qualquer é representar cada possível solução x no espaço de busca como uma sequência de símbolos s gerados a partir de um dado alfabeto finito A . Tomando como exemplo o caso mais simples, em que o alfabeto binário $A = \{0,1\}$ é utilizado na representação das soluções, cada sequência s corresponde a um *cromossomo*, e cada elemento de s é equivalente a um *gene*. Como cada gene pode assumir qualquer valor do alfabeto A , cada elemento de A é equivalente a um *alelo*, ou seja, um valor possível para um dado gene. A posição de um gene num cromossomo, ou seja, o índice dentro da sequência, corresponde a um *locus gênico*.

Além disso, na maior parte dos AGs assume-se que cada indivíduo seja constituído de um único cromossomo, razão pela qual é comum usar os termos *indivíduo* e *cromossomo* indistintamente, além de usarem uma *população* de um número fixo de indivíduos, com cromossomos de tamanho constante [45]. Cada iteração de um AG é denominada *geração*, embora nem todos os indivíduos de uma população sejam necessariamente “filhos” de indivíduos da população na iteração anterior.

Como exemplo, a Figura 97 apresenta dois cromossomos criados a partir de uma representação binária, cada um deles com cinco genes, sendo que cada gene pode assumir dois valores distintos de alelo, 0 ou 1. Cada gene denota a presença (1) ou a ausência (0) de uma determinada característica, conhecida como *genótipo*. Nos AGs o genótipo representa a informação contida no cromossomo, e, na biologia, representa a composição genética do organismo. O *fenótipo* representa o objeto ou estrutura construída a partir das informações do genótipo, ou seja, é o cromossomo decodificado, representando uma possível solução do problema de otimização.

0	1	0	1	0
1	1	0	0	1

Figura 97: Dois exemplos de cromossomos

Em relação aos operadores genéticos, o mecanismo de *seleção* em AGs emula os processos de reprodução assexuada e seleção natural. O mecanismo de *recombinação* ou *cruzamento* é um processo sexuado – ou seja, envolve mais de um indivíduo – que emula o fenômeno de “crossover”, a troca de fragmentos entre partes de cromossomos. O processo de *mutação* em AG é equivalente à mutação genética observada na biologia, e corresponde a uma busca aleatória onde genes são selecionados e possuem seus valores aleatoriamente alterados para outro alelo possível.

Outras metáforas biológicas utilizadas na teoria dos AGs serão introduzidas nos itens a seguir, nos quais serão discutidos cada etapa desses algoritmos de otimização.

A.3. REPRESENTAÇÃO CROMOSSÔMICA

Os indivíduos são a unidade fundamental de um AG : eles codificam possíveis soluções para o problema a ser tratado; é através da manipulação deles (processo de evolução) que respostas são encontradas. Essas estruturas são manipuladas pelo AG e seus valores correspondentes no espaço de soluções reais são inseridos no modelo do sistema. Um valor, que representa o efeito das variáveis deste cromossomo no sistema, é retornado para o AG e avaliado.

A escolha de representação para os indivíduos é a etapa mais importante no desenvolvimento de um AG, visto que ela será a principal responsável pelo desempenho do programa.

A primeira representação cromossômica adotada nos AGs foi a representação binária, proposta por Holland [31]. Esta representação tem sido a mais utilizada pelos desenvolvedores por causa de sua praticidade e funcionalidade, sendo escolhida na implementação do AG desenvolvida neste trabalho. A representação em binário

transforma o intervalo contínuo em que está contida a variável real a ser codificada em um intervalo discreto. O tamanho do cromossomo depende da precisão que se deseja nos valores das variáveis, de forma que quanto maior for a precisão maior será o tamanho do cromossomo.

Alternativamente à representação binária, existem outros tipos de representações largamente utilizadas, como a real e a híbrida, esta última utilizando uma conjunção das representações binária e real.

A escolha entre essas representações depende da dimensão do cromossomo que está sendo representado. Se o número de elementos do cromossomo for muito grande, por exemplo da ordem de centenas de elementos, a representação em real será a mais adequada, por ser menor a quantidade de recombinações a serem executadas ao longo do processo de busca. Se o tamanho do cromossomo for pequeno, da ordem de dezenas de elementos, a representação binária também pode ser usada, porque o tempo gasto para recombinação ao longo de todo processamento será menor. Cabe ressaltar que o tamanho do cromossomo em quantidade de bits também depende da precisão desejada para as variáveis na representação em binário, o que não ocorre na representação em real.

A.4. INICIALIZAÇÃO

A inicialização básica de um AG clássico se resume à síntese de uma população inicial, sobre a qual serão aplicadas as ações dos passos subsequentes do processo.

Tipicamente se faz o uso de funções aleatórias para gerar os indivíduos da população inicial, sendo este um recurso simples que visa fornecer maior “biodiversidade”, fundamental para garantir uma boa abrangência do espaço de busca. Existem várias alternativas ao método randômico, destinadas a suprir as deficiências no que diz respeito a dificuldades existentes quanto à criação aleatória de indivíduos de representação mais complexa e, fator mais considerado, a uma melhora no desempenho. Podemos citar como exemplo o uso de algoritmos de busca heurística como geradores de populações iniciais, especialmente em casos que apresentam alto grau de restrição, em que o AG recebe uma população que ainda não possui indivíduos ótimos, mas que

apresentam pelo menos algumas das características desejadas. Os operadores de inicialização mais tradicionais são, segundo [31]:

- Inicialização randômica uniforme;
- Inicialização randômica não uniforme;
- Inicialização randômica com “dope”;
- Inicialização parcialmente enumerativa.

Em relação ao tamanho da população, não existe um número padrão de quantidade de indivíduos a serem utilizados. Além disso, grande parte dos AGs proposta na literatura utiliza uma população de número fixo de indivíduos [45]. É importante destacar que o número de indivíduos de uma população influencia diretamente na qualidade da resposta (poucos indivíduos tenderão a cobrir um espaço de busca pequeno se o indivíduo possuir muitos genes) e no tempo de processamento (números elevados de indivíduos com muitos genes levarão a um tempo de processamento alto).

A.5. AVALIAÇÃO E ADEQUABILIDADE

Nesta etapa, o primeiro passo da seleção em si é dado: cada indivíduo da população é avaliado para determinar o seu grau de adaptação. Este é, em conjunto com a escolha da representação cromossômica, o ponto do algoritmo mais dependente do problema em si – é necessário que o AG seja capaz de responder, quantitativamente, sobre quão boa uma resposta é para o problema proposto.

A função adequabilidade é o modo utilizado pelo AG para determinar a qualidade de um indivíduo da população como solução do problema proposto. Ela é de suma importância para o desenvolvimento do AG, pois é a única ligação do algoritmo com o problema real analisado. Essa função deve embutir em sua formulação os objetivos a serem alcançados no problema e deve ser capaz de avaliar todos os indivíduos da população indicando qual deles é a melhor solução. A avaliação de cada indivíduo resulta em um valor numérico denominado *adequabilidade*, o qual medirá a qualidade do indivíduo como possível solução. Desta forma, uma criteriosa escolha para

a função adequabilidade é o primeiro passo para o AG chegar a soluções globais ótimas, podendo ser considerado o ponto principal no desenvolvimento do problema.

A função adequabilidade é normalmente confundida com a função objetivo. Esta última representa a função que se deseja otimizar, enquanto que a função adequabilidade é usada para quantificar a qualidade de cada indivíduo como possível solução do processo de otimização. Portanto, a função adequabilidade deve guardar uma estreita relação com a função objetivo, podendo, em alguns casos, até mesmo ser a própria. Um caso clássico da diferença entre a função objetivo e a função adequabilidade, é que os AGs são definidos em termos de maximização, e muitas vezes o objetivo é minimizar. Logo, nesta situação, o valor da função adequabilidade será o inverso do valor encontrado na função objetivo.

A.6. OPERADORES GENÉTICOS E DE EVOLUÇÃO

Basicamente dois tipos de operadores são usados no AG:

- Operadores genéticos: cruzamento e mutação.
- Operadores de evolução: seleção.

Os operadores genéticos imitam o processo hereditário dos genes para criar novos indivíduos a cada geração. O operador de evolução imita o processo de evolução, onde somente indivíduos com melhor adequabilidade sobrevivem para participar de uma nova população a cada geração.

A.6.1. Operador de evolução

O mecanismo de seleção emula o processo de reprodução assexuada e seleção natural observados na natureza. É no estágio de seleção que os indivíduos são escolhidos para posterior cruzamento. Neste ponto, fazendo o uso do grau de adequação de cada um, é efetuado um sorteio onde os mais aptos possuem maior probabilidade de se reproduzirem. Este grau é calculado a partir da adequabilidade relativa de cada

indivíduo, de acordo com a equação (52), e determina o quão apto ele está para a sobrevivência em relação à população à que pertence:

$$a_{REL}(s_i) = \frac{a(s_i)}{\sum_{j=1}^N a(s_j)} \quad (52)$$

em que a é a função adequabilidade, $a_{rel}(s_i)$ é o valor de adequabilidade relativa do indivíduo s_i e N é o tamanho da população.

A seleção tem a função de guiar os AGs na direção de regiões promissoras no espaço de busca. Ela fornece a força necessária para direcionar o AG no seu exercício de busca. Esta força, denominada pressão seletiva, é exercida pela dominância de soluções de alta adequabilidade no início e ao longo de todo o processo de busca. Quando é elevada no início, pode ser crítica, dependendo do tipo de seleção utilizado, pois a busca poderá terminar prematuramente obtendo uma solução ótima local. Por outro lado, quando a pressão seletiva for pequena, a busca se realizará mais lentamente do que o necessário. Isso mostra que existirá um compromisso entre a menor pressão seletiva e o melhor desempenho do AG.

A.6.1.1 Método da roleta

O método mais simples de seleção é o método da roleta, proposto originalmente por Goldberg [31]. Primeiramente, os indivíduos são avaliados e através da sua adequabilidade relativa é definida a porcentagem da roleta que o indivíduo irá assumir, fornecendo uma medida de probabilidade de o indivíduo sobreviver ao processo de seleção. Feito isso, a roleta é “rodada” o número de vezes necessário para compor a próxima geração. Um exemplo de roleta é mostrado abaixo:

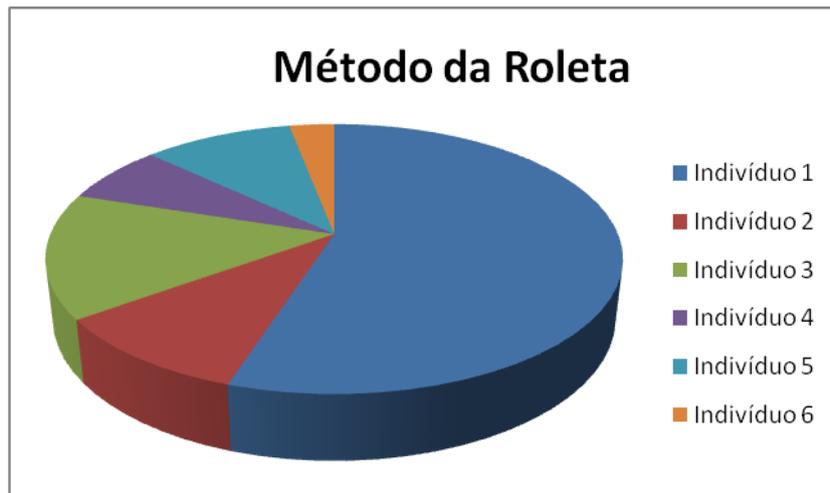


Figura 98: Método da roleta

É possível verificar, no exemplo da Figura 98, que indivíduos com alto valor de adequabilidade relativa (*Indivíduo 1*) irão ocupar uma grande parte da roleta e tenderão a ser muito mais selecionados que os outros indivíduos da população, bem como participantes da população com baixo grau de avaliação (*Indivíduo 6*) muito raramente participarão da próxima geração.

A.6.1.2 Método do torneio

O método do torneio possui propriedades estocásticas e determinísticas em sua essência. Este método, proposto em [46], consiste em selecionar, aleatoriamente, um conjunto de indivíduos da população, fazendo com que os mesmos compitam entre si, vencendo a disputa (sendo um dos possíveis participantes no processo de cruzamento e mutação) aquele que possuir a maior adequabilidade. Não existe um número padrão de participantes em um torneio; no entanto, é comum utilizar dois participantes, sendo esta configuração denominada *torneio binário*.

Um ponto interessante a respeito do número de participantes do torneio é a probabilidade de um indivíduo de baixa adequabilidade ser selecionado. Se, em hipótese, o torneio for de três indivíduos, um indivíduo de baixa adequabilidade só será selecionado se os outros dois indivíduos participantes possuírem adequabilidade menor ou igual à deste. Desta forma, quanto maior o número de participantes no torneio, maior

será a pressão seletiva, levando, conseqüentemente, à perda de diversidade genética nas futuras gerações.

No método do torneio não há prevalência de participação para os indivíduos de maior adequabilidade, pois o sorteio de participantes se dá de forma aleatória. Para que a melhor solução encontrada até o momento não se perca devido a não participação no torneio, é de grande importância a adoção da técnica de elitismo (que será apresentada no item A.9.2).

Uma variação do método do torneio, denominada *torneio estocástico*, foi sugerida por Wetzel [47]. Neste método, usa-se o modelo da roleta para extrair um par de indivíduos por vez, mas apenas o de maior adequabilidade de cada par é realmente selecionado.

Neste trabalho foi utilizado o torneio de três indivíduos como método de seleção, juntamente com uma estratégia elitista de quatro indivíduos.

A.6.1.3 Outros métodos de seleção

Além dos métodos da roleta e torneio, existem outros utilizados pelos desenvolvedores de AGs, sendo alguns deles apresentados abaixo:

- **Método do valor esperado:** Primeiramente para cada indivíduo calcula-se o número esperado de cópias a partir do valor de adequabilidade relativa. Em seguida, cada vez que um indivíduo é selecionado (pelo método da roleta, por exemplo), subtrai-se 1 do correspondente número de cópias. Se o número se tornar negativo ou nulo, o correspondente indivíduo fica proibido de ser selecionado novamente. Assim, garante-se que o número de cópias de cada indivíduo recebe não pode exceder o valor inteiro imediatamente superior ao número esperado de cópias.
- **Método da amostragem determinística:** Como no método anterior, primeiramente calcula-se o número esperado de cópias para cada indivíduo. De modo determinístico, alocam-se cópias correspondentes às partes inteiras dos valores esperados. As partes fracionárias são então colocadas em ordem decrescente, e as cópias restantes são extraídas a partir do topo dessa lista,

uma a uma. Ou seja, a seleção é totalmente determinística, sem depender da sorte.

- **Método do resto estocástico:** Igual ao caso anterior, mas as partes fracionárias dos números de cópias esperadas são usadas para compor uma roleta, a partir da qual as cópias restantes são selecionadas.
- **Ranking:** Seleciona indivíduos com base em um prévio ordenamento da população em relação aos valores de adequabilidade relativa. Neste caso, a probabilidade de seleção é linearmente relacionada com a posição na classificação dos indivíduos.

A.6.2. Operadores genéticos

A.6.2.1. Operador genético de cruzamento (crossover)

O operador genético de cruzamento atua sobre dois cromossomos selecionados aleatoriamente, gerando outros através da combinação das características de ambos. Contribui para propagar os blocos construtores, parte da solução ótima contida nesses cromossomos, para as gerações futuras. Mediante a uma taxa de cruzamento, controla-se o número de indivíduos que serão submetidos a um determinado tipo de cruzamento. Maior taxa de cruzamento permite uma maior exploração do espaço de busca e reduz a chance de obtenção de uma solução local. Se essa taxa for muito elevada, resultará em muitos indivíduos com um valor baixo de adequabilidade e um maior tempo computacional será despendido na exploração de regiões não promissoras do espaço de busca. Existirá assim, um valor de taxa de cruzamento que será um compromisso entre a melhor exploração da região de busca e o menor tempo para explorá-la.

Vários métodos de cruzamento foram desenvolvidos. Cada método possui uma característica peculiar, cuja intenção principal é direcionar o AG na busca da melhor solução, melhorando, assim, o desempenho do AG quanto à rapidez na busca da melhor solução.

- Cruzamento que utiliza um ponto

Após ser selecionado um par de cromossomos, um ponto na estrutura é escolhido pseudo-aleatoriamente. A partir deste ponto será feita a troca dos segmentos à esquerda ou à direita de ambos os cromossomos. O exemplo mostrado na Figura 99 ilustra esse efeito em cromossomos de representação binária.

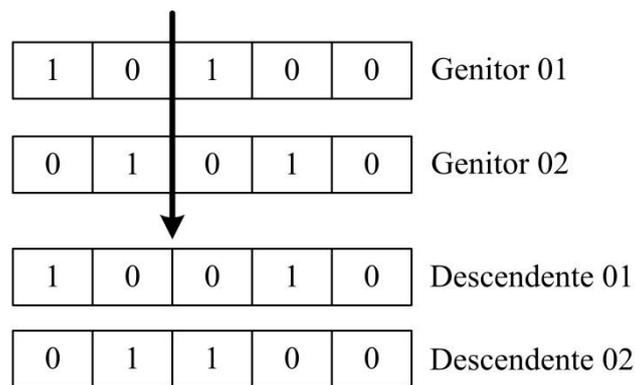


Figura 99: Cruzamento de 1 ponto

Pode ser observado que as extremidades do cromossomo sempre participarão do cruzamento, independente do ponto escolhido.

- Cruzamento que utiliza dois pontos

Após ser selecionado um par de cromossomos, dois pontos na estrutura são escolhidos pseudo-aleatoriamente. Os segmentos dos dois cromossomos entre estes dois pontos são trocados. O exemplo mostrado na Figura 100 ilustra o processo em cromossomos de representação binária.

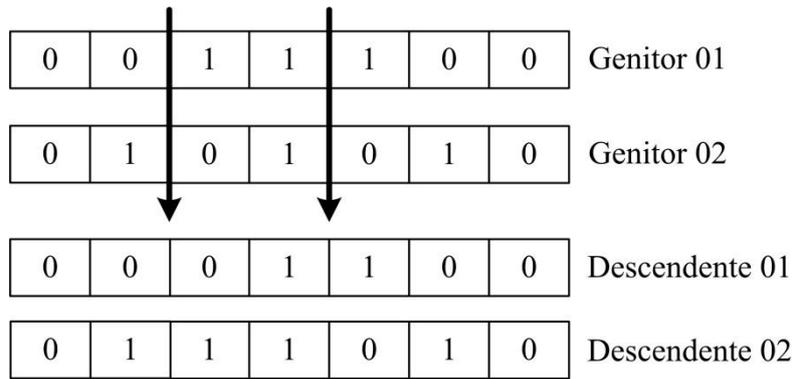


Figura 100: Cruzamento de dois pontos

Este tipo de cruzamento minimiza o problema do cruzamento de um ponto no que tange aos *bits* das extremidades da estrutura.

- Cruzamento uniforme

Após ser selecionado um par de cromossomos, as posições nas estruturas que terão os seus valores trocados são escolhidas através de uma máscara, que é um cromossomo gerado pseudo-aleatoriamente. A troca de valores é efetuada quando o bit da máscara for igual a um. O exemplo mostrado na Figura 101 ilustra o processo em cromossomos de representação binária.

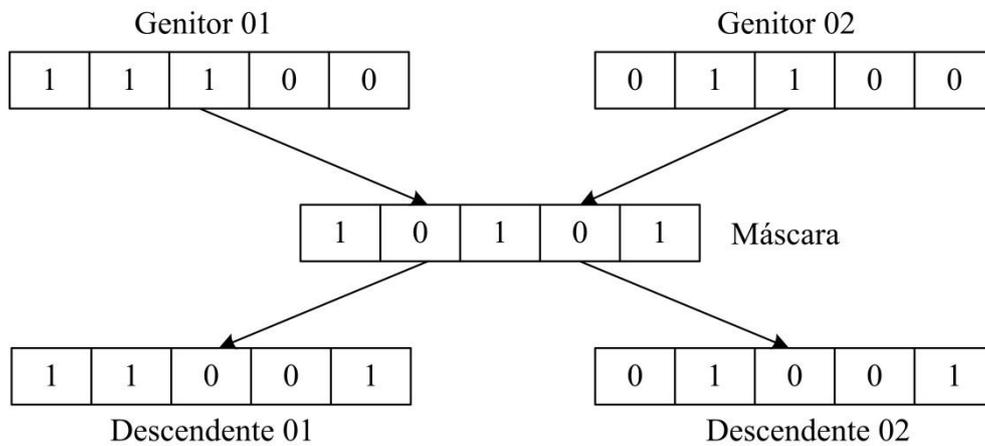


Figura 101: Cruzamento uniforme

Esse tipo de cruzamento tem capacidade disruptiva (quebra de blocos construtores) maior que dos os anteriores. Porém, é benéfico quando a população é pequena, para fornecer uma amostra mais precisa de um espaço de busca complexo.

Comparando os três tipos de cruzamento pode-se concluir que o cruzamento uniforme é mais disruptivo, porém, mais exploratório ao longo de todo o espaço de busca. Os cruzamentos de um ou dois pontos preservam o esquema, mas são menos exploratórios quando a população torna-se homogênea. Além disso, o cruzamento uniforme é mais adequado para populações pequenas, ajudando a sustentar uma busca altamente exploratória, ao passo que os cruzamentos de um ou dois pontos são mais indicados para populações maiores, nas quais a alta diversidade reduz a necessidade de exploração.

A.6.2.2. Operador genético de mutação

A principal função do operador de mutação é criar diversidade genética na população, alterando os valores dos genes de forma aleatória, inserindo novas características na população e restaurando material genético perdido nos processos de seleção, cruzamento e também na própria mutação. A taxa de mutação é definida como o percentual do número total de genes da população que irão mudar e controla a quantidade de novos genes que irão ser introduzidos na população.

O processo de mutação em cromossomos de codificação binária é ilustrado na Figura 102.

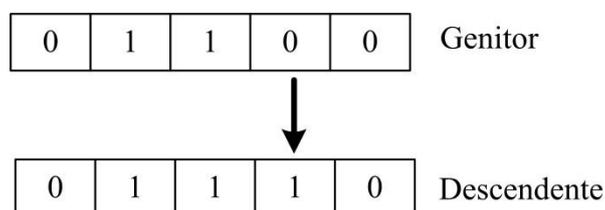


Figura 102: Mutação

A.7. TRANSIÇÃO ENTRE POPULAÇÕES

A formação de novas populações se dá através da aplicação dos operadores genéticos e de evolução. Suponhamos uma dada aplicação de AG em que as populações possuem tamanho fixo, contendo N indivíduos, sendo $P(k)$ a população representativa da k -ésima geração. O operador de evolução seleciona determinados indivíduos da população $P(k)$ e efetuam cópias destes indivíduos de forma a criar uma população intermediária $P'(k)$, também conhecida como *mating pool*, cujos indivíduos são conhecidos como *genitores*. Os genitores são selecionados para aplicação dos operadores de cruzamento e mutação, de acordo com as taxas definidas para cada operador genético, dando origem a indivíduos denominados *descendentes* que, juntamente com os genitores que não sofreram alteração, compõem a nova geração $P(k+1)$. Esse processo é exemplificado no fluxograma da Figura 103.

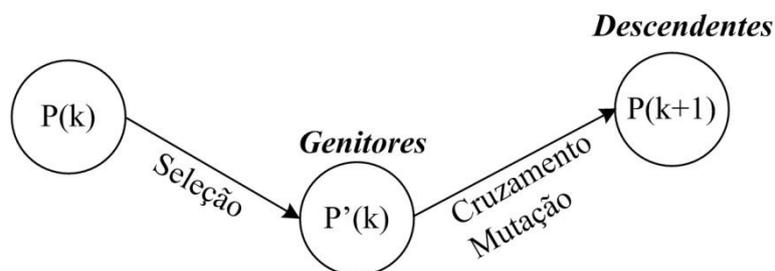


Figura 103: Processo de transição entre populações

A.8 CONDIÇÕES DE TÉRMINO

Quando se trata de problemas de otimização, o ideal seria que a execução do AG terminasse assim que o ponto ótimo fosse encontrado. No caso de funções multimodais, pode haver situações em que todos ou o maior número possível de pontos ótimos sejam desejados. O que se observa na prática é que, na maioria dos casos de interesse, não se pode afirmar com certeza se um dado ponto ótimo corresponde a um ótimo global. Como consequência, o número máximo de gerações e o tempo limite de processamento

são usados como critérios para interromper a execução de um AG. Outro critério plausível é parar o AG usando a ideia de estagnação, ou seja, quando não se observa melhoria na população após várias gerações consecutivas.

A.9. VARIAÇÕES DE AG

Dependendo dos problemas de otimização aos quais são aplicados, os AGs simples podem sofrer de vários problemas de convergência. Para aumentar a eficiência da busca genética, há grande quantidade de variações de AGs proposta na literatura técnica. Nesta seção serão apresentadas duas técnicas, de comprovada eficiência, que foram utilizadas para melhorar o desempenho do AG implementado neste trabalho.

A.9.1. Escalonamento linear da função adequabilidade

Nas primeiras gerações da execução de um AG, é interessante que a pressão seletiva seja baixa, de modo que mesmo indivíduos de baixa adequabilidade relativa tenham chance de sobreviver. Quando a população já está madura, depois de muitas gerações, os indivíduos tendem a ter valores de adequabilidade muito próximos, o que acaba dificultando com que os melhores indivíduos se destaquem na população. Nesta situação, é desejável ter uma alta pressão seletiva.

A pressão seletiva está implicitamente relacionada com a diversidade da população. Alta pressão seletiva tende a fazer a diversidade cair rapidamente, levando o AG a convergir prematuramente. Por outro lado, uma baixa pressão seletiva pode tornar o processo de busca proibitivamente lento.

Uma maneira fácil de controlar a pressão seletiva é o escalonamento da função adequabilidade. Goldberg propôs o seguinte mapeamento linear [31]:

$$f' = \alpha \cdot f + \beta \tag{53}$$

onde f e f' são as funções adequabilidade e adequabilidade modificada, respectivamente, e α e β são coeficientes calculados para cada geração de forma que a reta percorra os pontos $(f_{med}$ e f'_{med}) e $(f_{max}$ e f'_{max}), sendo f_{med} e f_{max} os valores médio e máximo da função adequabilidade. A Figura 104 exemplifica o escalonamento linear:

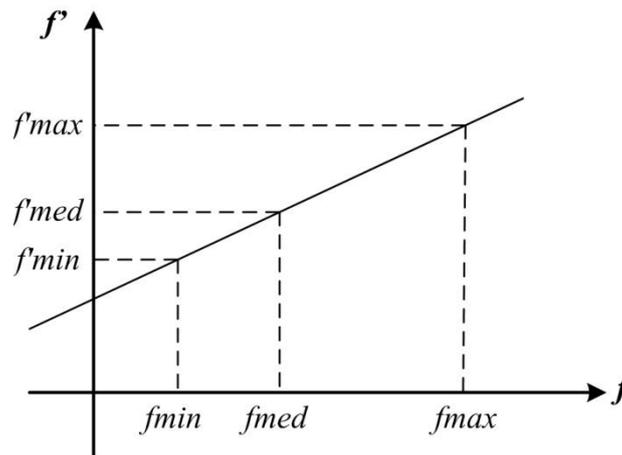


Figura 104: Estrutura do escalonamento linear

O ponto $(f_{med}$ e f'_{med}) tem a finalidade de garantir que os indivíduos de adequabilidade média continuem na média após o escalonamento, através da igualdade $f_{med} = f'_{med}$. O segundo ponto $(f_{max}$ e f'_{max}) tem a função de limitar o valor máximo de adequabilidade para a função adequabilidade modificada, restringindo o número de cópias para o melhor indivíduo. Este ponto é calculado de acordo com a equação (54), onde γ é uma constante normalmente entre 1,2 e 2,0.

$$f'_{\max} = \gamma \cdot f_{med} \quad (54)$$

O escalonamento linear evita que alguns *super-indivíduos* dominem a população no início da busca, e geralmente produzem melhores resultados na otimização de funções multimodais.

A.9.2 Estratégia elitista

Esta estratégia garante que os melhores indivíduos de uma geração estarão presentes na geração seguinte. Ou seja, se a elite da população corrente não estiver presente na próxima população em decorrência de alguma operação genética, então os elementos ausentes são inseridos artificialmente no lugar dos piores indivíduos. O método mais comum de elitismo supervisiona apenas o melhor indivíduo da população, mas para grandes populações pode ser interessante garantir que mais de um indivíduo esteja presente na próxima geração.

ANEXO B

MALHAS DE CONTROLE DO SISTEMA UHE

LUIZ CARLOS BARRETO

Simplificações foram adotadas para facilitar a representação das malhas de controle das unidades geradoras do sistema UHE Luiz Carlos Barreto x Barra Infinita no programa Simulight. A Figura 104 apresenta o tronco principal da malha de controle de tensão. Destacados em vermelho estão os sinais de controle dos limitadores que não foram modelados no Simulight. As simplificações foram motivadas pelo fato dos distúrbios aplicados nas simulações dinâmicas não serem suficientes para atuação dos limitadores não representados.

Resumidamente, não foi representado no Simulight:

- VHZ: Limitador volt/hertz;
- UEL: Limitador de subexcitação;
- OEL: Limitador de sobre-excitação;
- SCL: Limitador de corrente estatórica;
- RCC: Compensador de corrente reativa;

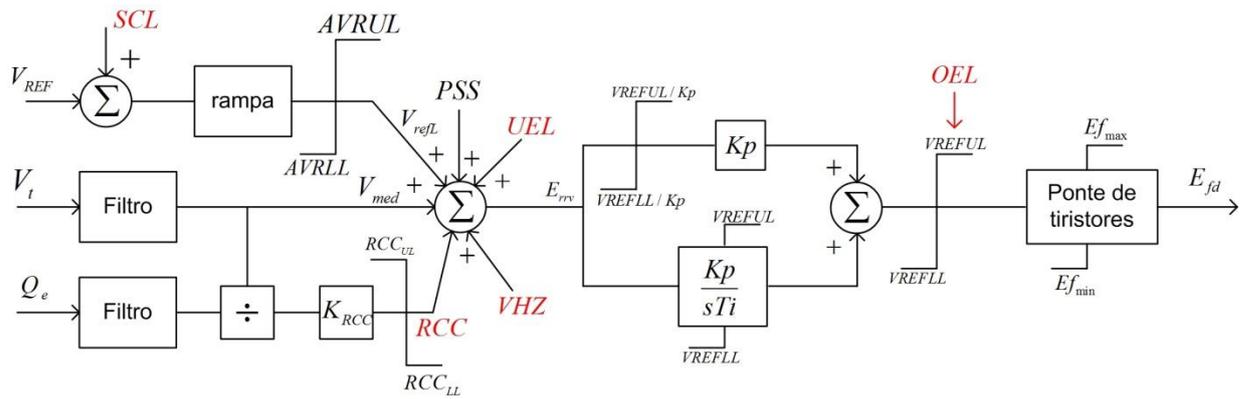


Figura 105: Modelo de regulador de tensão representado no Simulight

O regulador de velocidade (RV) e o estabilizador de sistema de potência (PSS, do inglês *Power System Stabilizer*) foram representados integralmente e seus diagramas são apresentados nas Figuras 106 e 107, respectivamente.

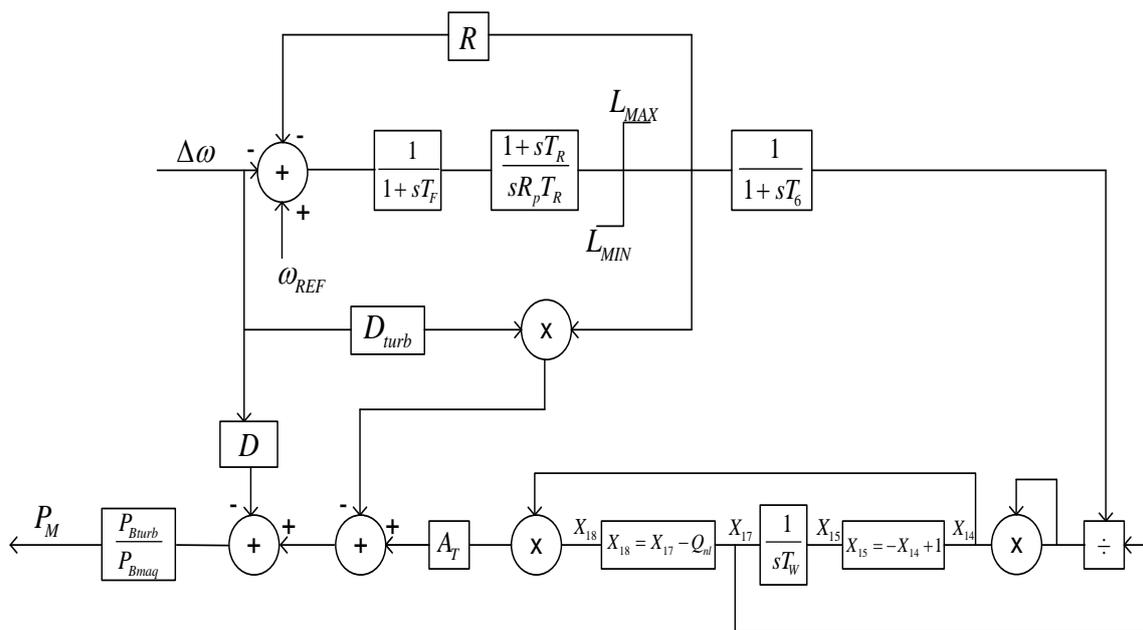


Figura 106: Modelo de regulador de velocidade representado no Simulight

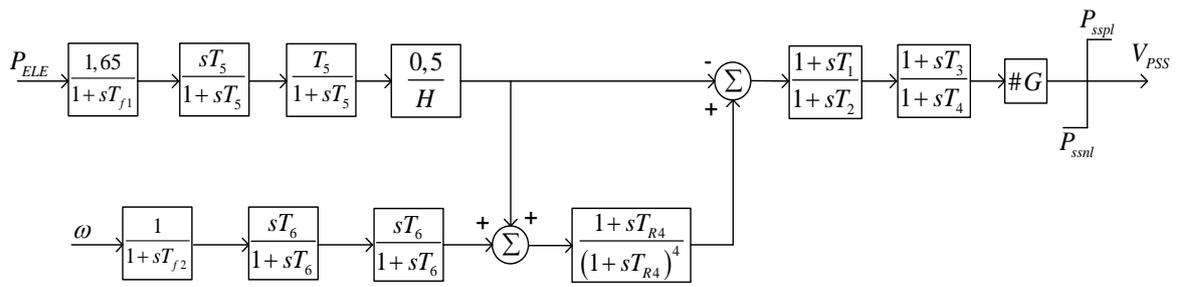


Figura 107: Modelo de estabilizador de sistema de potência representado no Simulight

ANEXO C

MODELO DE CURVA DE SATURAÇÃO DOS GERADORES DA UHE LUIZ CARLOS BARRETO

Para representar a saturação magnética dos geradores da UHE Luiz Carlos Barreto foi utilizado o modelo exponencial Tipo 02 do Anatem [36]. Os parâmetros do modelo foram fornecidos por Furnas e são apresentados na Tabela 35. Na Figura 109 é exibido o diagrama de blocos das equações de eixo direto do modelo da máquina, no qual o efeito da saturação é incorporado.

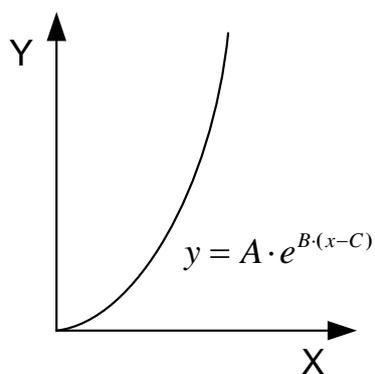


Figura 108: Modelo de saturação Tipo 02 do Anatem

Tabela 35: Parâmetros da curva de saturação fornecidos por Furnas

A	B	C
0,0168	7,3113	0,8

