

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Felipe Trevisan

**VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS DE UNIDADES  
GERADORAS USANDO DADOS DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA  
DE FASORES**

Florianópolis

2011



Felipe Trevisan

**VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS DE UNIDADES  
GERADORAS USANDO DADOS DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA  
DE FASORES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ildemar Cassana Decker, D.Sc.  
Coorientador: Marcelo Neujahr Agostini, D.Eng.

Florianópolis

2011



Felipe Trevisan

**VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS DE UNIDADES  
GERADORAS USANDO DADOS DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA  
DE FASORES**

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Florianópolis, 14 de Fevereiro de 2011.

---

Ildemar Cassana Decker, D.Sc.  
Orientador

---

Marcelo Neujahr Agostini, D.Eng.  
Coorientador

---

Roberto de Souza Salgado, Ph.D.  
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

---

Ildemar Cassana Decker, D.Sc.

---

Francisco Damasceno Freitas, D.Eng.

---

Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

---

Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.



Aos meus pais, por me ensinarem a ter esforço e dedicação na vida.



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Altenir e Naides e meu irmão Alexandre, pela formação sólida e justa que me proporcionaram, além do apoio incondicional nos momentos de dificuldades.

Ao Professor Ildemar Cassana Decker, pelo direcionamento e visão do trabalho como um todo. Sua metodologia e discernimento foram imprescindíveis para a conclusão deste projeto.

A Marcelo Neujahr Agostini, por sua disponibilidade e comprometimento na discussão dos detalhes técnicos mais diversos no decorrer do trabalho.

Aos colegas de LabPlan, George Gaviolli, André Queiroz, Marcelo Benetti, Ritchie Guder, Gelson Brigatto, Vanessa Araújo, Flávia Sá e Alisson Fernandes, pelas experiências compartilhadas durante as disciplinas da pós-graduação.

A José Chiaradia Siqueira (Itaipu Binacional) e Luiz Colman (LASSE/ITAI) pela viabilização do acesso ao Simulador Digital de Tempo Real (RTDS).

Aos colegas do LASSE, Jorge Luiz Jacopetti e Silva e Suzana Mensch de Carvalho pela disponibilidade e ajuda na realização das simulações usando o RTDS.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de realizar este Mestrado.

À Itaipu Binacional, pelo apoio institucional.



## RESUMO

Ferramentas de simulação dinâmica de sistemas de potência são a base para realização de estudos elétricos relacionados à operação de sistemas em tempo real. Dessa forma, a confiança nos resultados desses estudos está diretamente ligada à qualidade dos modelos utilizados. Neste contexto, o presente trabalho investiga a validação de modelos dinâmicos de unidades geradoras utilizando dados de perturbações em sistemas de potência obtidos por Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS - *Synchronized Phasor Measurement Systems*). Para tanto, é empregada a técnica de simulação dinâmica híbrida, que permite o *playback* de medições no processo de simulação. São discutidos aspectos da formulação matemática da técnica, bem como detalhes da implementação de um protótipo para validação dos conceitos envolvidos. Utilizando o protótipo desenvolvido, foram realizados estudos de sensibilidade, avaliando-se características quantitativas e qualitativas de sinais associados à unidades geradoras (potência ativa e reativa) frente à desvios individuais nos parâmetros dinâmicos dos modelos. Com base nesses resultados, foi proposta uma metodologia baseada em regras para ajuste manual de parâmetros de unidades geradoras. Utilizou-se uma plataforma de simulação em tempo real (RTDS - *Real Time Digital Simulator*) para se obter dados fasoriais de terminais de unidades geradoras com objetivo de testar a validade da metodologia de ajuste proposta. Os resultados obtidos demonstraram o potencial da técnica de simulação híbrida, que, aliada aos sistemas de medição fasorial, se mostrou promissora em estudos de validação de modelos dinâmicos.

**Palavras-chave:** Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, Validação de Modelos de Unidades Geradoras, Simulação Dinâmica Híbrida.



## ABSTRACT

Power systems dynamic simulation tools are used to perform electrical studies related to real time power systems operation. Therefore, the confidence in the results from this studies are directly associated to the models quality. In this sense, this work investigates generation unit model validation using power system perturbation data obtained by Synchronized Phasor Measurement Systems (SPMS). Hybrid Dynamic Simulation technique is employed to inject measurements into dynamic simulation process. Mathematical formulation as well implementation aspects of a hybrid simulation computational prototype are discussed. Using the prototype developed, sensitivity studies were run to investigate quantitative and qualitative aspects of power signals (active and reactive) related to generation units against individual deviation in dynamic parameters. According to this results, a manual rule based generation unit parameter adjust/calibration methodology was proposed. A real time simulation tool (RTDS - Real Time Digital Simulator) was used to obtain phasor data from generation unit terminals aiming to test the validity of the proposed methodology. The results obtained demonstrated that hybrid simulation technique combined to synchrophasor data has a promising potential in dynamic model validation studies.

**Keywords:** Synchronized Phasor Measurement Systems, Generating Unit Model Validation, Hybrid Dynamic Simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modelo de simulação dinâmica .....	29
Figura 2	Interação entre equações do modelo matemático para estudos de estabilidade transitória .....	30
Figura 3	Esquemas ilustrativos para apresentação do conceito de simulação híbrida. ....	32
Figura 4	Esquema ilustrativo da estrutura de um SPMS .....	33
Figura 5	Situação dos SPMS no sistema norte-americano e canadense (09/2009) .....	34
Figura 6	Tela do portal do projeto MedFasee Baixa Tensão .....	36
Figura 7	Blocos funcionais de uma PMU .....	37
Figura 8	Evento de 10 de Agosto de 1996 no WSCC .....	44
Figura 9	Resultados antes e após a validação de modelos de reguladores de velocidade para turbinas Kaplan .....	46
Figura 10	Validação sistêmica do Sistema Interligado Nacional Brasileiro .....	48
Figura 11	Validação de componentes/subsistemas .....	52
Figura 12	Representação ilustrativa da simulação de subsistemas .....	57
Figura 13	Representação ilustrativa da simulação híbrida - exemplo .....	57
Figura 14	Simulação híbrida - subsistemas isolados .....	58
Figura 15	Método do Transformador Defasador .....	60
Figura 16	Método do Gerador de Resposta Rápida .....	61
Figura 17	Método da Impedância Variável .....	61
Figura 18	Fluxograma da simulação convencional no SIMSP .....	64
Figura 19	Fluxograma da simulação híbrida no SIMSP .....	65
Figura 20	Simulação convencional vs. híbrida .....	66
Figura 21	Simulação convencional vs. híbrida - frequência fora da nominal .....	67
Figura 22	Esquema ilustrativo da unidade geradora para algoritmo de simulação híbrida .....	68
Figura 23	Esquema de validação de modelos .....	69
Figura 24	Sistema máquina-barras infinita utilizado nos testes .....	73
Figura 25	Simulação convencional vs. híbrida - ABCI .....	75
Figura 26	Simulação convencional vs. híbrida - TRGT .....	75

Figura 27	Simulação convencional vs. híbrida - TRGV .....	75
Figura 28	Simulação convencional vs. híbrida - APCB .....	76
Figura 29	Sensibilidade de Trajetória - ABCI .....	78
Figura 30	Sensibilidade de Trajetória - TRGT .....	79
Figura 31	Sensibilidade de Trajetória - TRGV .....	80
Figura 32	Sensibilidade de Trajetória - APCB .....	81
Figura 33	Matriz de Sensibilidade - ABCI .....	83
Figura 34	Sensibilidade de $P$ vs. Sensibilidade de $Q$ .....	84
Figura 35	Representação gráfica dos valores de <i>fitness</i> .....	87
Figura 36	Índices de similaridade .....	88
Figura 37	Índices de similaridade (continuação) .....	89
Figura 38	Alteração em $X_d$ - ABCI .....	91
Figura 39	Alteração em $Ka$ - ABCI .....	91
Figura 40	Aumento de 30% em $X_d$ e 20% em $Ka$ .....	92
Figura 41	Alteração em $T'_{d0}$ - ABCI .....	93
Figura 42	Alteração em $X'_d$ - ABCI .....	93
Figura 43	$X'_d$ vs. $T'_{d0}$ - APCB .....	93
Figura 44	Alteração em $X''_d$ .....	94
Figura 45	Alteração em $H$ - ABCI .....	95
Figura 46	Alteração em $H$ - TRGT .....	95
Figura 47	Alteração em $X_q$ - ABCI .....	95
Figura 48	Alteração em $X_q$ - TRGT .....	96
Figura 49	Alteração em $X_q$ - APCB .....	96
Figura 50	Procedimento para ajuste de parâmetros .....	98
Figura 51	Cubículos dos Racks do RTDS .....	105
Figura 52	Cubículos dos Amplificadores do RTDS .....	106
Figura 53	Módulos do RSCAD .....	107
Figura 54	Interação entre os módulos do RSCAD e os racks do RTDS ..	108
Figura 55	Modelo de Máquina Síncrona (RTDS) .....	109
Figura 56	Modelagem do Sistema-Teste (RSCAD) .....	111
Figura 57	Abertura de Circuito - ABCI (RTDS) .....	111
Figura 58	Degrau no Regulador de Tensão - TRGT (RTDS) .....	112
Figura 59	Degrau na Referência de Potência Mecânica - TRGV (RTDS)	112
Figura 60	Sensibilidade de Trajetória - Pot. Ativa (RTDS) .....	112

Figura 61	Sensibilidade de Trajetória - Pot. Reativa (RTDS).....	113
Figura 62	Fitness - Simulação Híbrida com Parâmetros Originais (RTDS)	113
Figura 63	Sistema Hipotético.....	116
Figura 64	Sistema Hipotético: Representação no RSCAD.....	116
Figura 65	Sistema Hipotético: Abertura de Circuito - ABCI (RTDS) ...	117
Figura 66	Sistema Hipotético: Degrau no sist. excitação - TRGT (RTDS)	117
Figura 67	Sistema Hipotético: Degrau de pot. mecânica - TRGV (RTDS).	117
Figura 68	Sistema Hipotético: Corte de Geração - CTMQ (RTDS).....	118
Figura 69	Caso A: Condição Inicial.....	119
Figura 70	Caso A: Tentativa 1.....	119
Figura 71	Caso A: Tentativa 2.....	120
Figura 72	Caso A: Tentativa 3.....	121
Figura 73	Caso A - Evolução dos Indicadores de Similaridade.....	121
Figura 74	Caso A: Validação do Ajuste.....	122
Figura 75	Caso B: Condição Inicial.....	122
Figura 76	Caso B: Tentativa 1.....	123
Figura 77	Caso B: Tentativa 2.....	123
Figura 78	Caso B: Tentativa 3.....	124
Figura 79	Caso B: Tentativa 4.....	124
Figura 80	Caso B: Tentativa 6.....	125
Figura 81	Caso B - Evolução dos Indicadores de Similaridade.....	125
Figura 82	Caso B: Validação do Ajuste.....	126
Figura 83	Caso C: Condição Inicial.....	127
Figura 84	Caso C: Tentativa 2.....	127
Figura 85	Caso C: Tentativa 5.....	128
Figura 86	Caso C: Tentativa 6.....	129
Figura 87	Caso C: Tentativa 9.....	130
Figura 88	Caso C - Evolução dos Indicadores de Similaridade.....	130
Figura 89	Caso C: Validação do Ajuste.....	131



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros dos modelos dinâmicos . . . . .	74
Tabela 2	Sensibilidade de trajetória - influência dos parâmetros . . . . .	84
Tabela 3	Influência dos parâmetros nas trajetórias do sistema . . . . .	90
Tabela 4	Caso A: parâmetros alterados . . . . .	118
Tabela 5	Caso A - Condição Inicial ( <i>fitness</i> ) . . . . .	119
Tabela 6	Caso A - Tentativa 1 ( <i>fitness</i> ) . . . . .	120
Tabela 7	Caso A - Tentativa 2 ( <i>fitness</i> ) . . . . .	120
Tabela 8	Caso A - Tentativa 3 ( <i>fitness</i> ) . . . . .	121
Tabela 9	Caso B: parâmetros alterados . . . . .	122
Tabela 10	Caso B - Condição Inicial ( <i>fitness</i> ) . . . . .	123
Tabela 11	Caso B: parâmetros ajustados . . . . .	125
Tabela 12	Caso C: parâmetros alterados . . . . .	126
Tabela 13	Caso C - Condição Inicial ( <i>fitness</i> ) . . . . .	127
Tabela 14	Caso C - Tentativa 2 ( <i>fitness</i> ) . . . . .	128
Tabela 15	Caso C - Tentativa 5 ( <i>fitness</i> ) . . . . .	129
Tabela 16	Caso C - Tentativa 9 ( <i>fitness</i> ) . . . . .	130
Tabela 17	Caso C: parâmetros ajustados . . . . .	130



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i> .....	23
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i> .....	23
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i> .....	23
SPMS	<i>Synchronized Phasor Measurement System</i> .....	24
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i> .....	24
GPS	<i>Global Positioning System</i> .....	24
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i> .....	32
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i> .....	33
DoE	<i>Department of Energy (USA)</i> .....	33
WAMS	<i>Wide Area Measurement System</i> .....	33
WECC	<i>Western Electric Coordinating Council</i> .....	33
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i> .....	33
SCE	<i>Southern California Edison</i> .....	33
NASPI	<i>North American SynchroPhasor Initiative</i> .....	33
PSS	<i>Power System Stabilizer</i> .....	34
FINEP	<i>Financiadora de Estudos e Projetos</i> .....	35
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i> .....	35
CTEEP	<i>Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista</i> .....	35
LT	<i>Linha de Transmissão</i> .....	35
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> .....	37
IRIG-B	<i>Inter-Range Instrumentation Group Time Code B</i> .....	37
TVA	<i>Tennessee Valley Authority</i> .....	38
EIPP	<i>Eastern Interconnection Phasor Project</i> .....	38
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> .....	39
TVE	<i>Total Vector Error</i> .....	39
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> .....	39
FE	<i>Frequency Error</i> .....	39
RFE	<i>Rate of Change of Frequency Error</i> .....	39
ARMA	<i>Autoregressive Moving Average</i> .....	41
SIME	<i>Single Infinite-Machine Equivalent</i> .....	42
COI	<i>California-Oregon Intertie</i> .....	43
WSCC	<i>Western Systems Coordinating Council</i> .....	44

AGC	Automatic Generation Control . . . . .	44
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> . . . . .	45
FIDVR	<i>Fault-Induced Delayed Voltage Recovery</i> . . . . .	47
ECE	Esquema de Controle de Emergência . . . . .	48
TC	Transformador de Corrente . . . . .	49
TP	Transformador de Potencial . . . . .	49
PPPD	<i>Power Plant Parameter Derivation</i> . . . . .	50
GE	<i>General Electric</i> . . . . .	53
PSLF	<i>Positive Sequence Load Flow</i> . . . . .	53
PSDS	<i>Positive Sequence Dynamic Simulator</i> . . . . .	53
EPCL	<i>Engineering Program Control Language</i> . . . . .	59
BOSL	<i>Block Oriented Simulation Language</i> . . . . .	59
PSS/E	<i>Power System Simulation for Engineering</i> . . . . .	59
DSL	<i>DigSILENT Simulation Language</i> . . . . .	59
UDM	<i>User-Defined Model Editor</i> . . . . .	59
GOV	Governor (Regulador de Velocidade) . . . . .	60
ONS	Operador Nacional do Sistema . . . . .	62
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica . . . . .	62
ANATEM	Análise de Transitórios Eletromecânicos . . . . .	62
CDU	Controlador Definido pelo Usuário . . . . .	62
ABCI	Abertura de Circuito . . . . .	74
APCB	Aplicação de Curto-Circuito em Barra . . . . .	74
TRGT	Degrau na Referência do Regulador de Tensão . . . . .	74
TRGV	Degrau na Referência de Potência Mecânica . . . . .	74
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i> . . . . .	84
ITAI	Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação . . . . .	101
ATP	<i>Alternative Transient Program</i> . . . . .	103
GPC	<i>Giga Processor Card</i> . . . . .	105
GTIO	<i>Giga Transceiver Input/Output</i> . . . . .	105
GTNET	<i>Giga Transceiver Network Communication Card</i> . . . . .	105
CTMQ	Corte de Geração . . . . .	116

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 OBJETIVOS .....	25
1.2 ESTRUTURA DO TEXTO .....	25
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
2.1 SIMULAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA ....	27
<b>2.1.1 Formulação Matemática</b> .....	28
<b>2.1.2 Simulação Dinâmica Híbrida</b> .....	31
2.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA ....	32
<b>2.2.1 Estrutura dos SPMS</b> .....	36
2.2.1.1 Unidade de Medição Fasorial (PMU) .....	36
2.2.1.2 Fonte de Sincronismo Temporal (GPS) .....	37
2.2.1.3 Concentrador de Dados (PDC) .....	38
2.2.1.4 Sistemas de Comunicação .....	38
2.2.1.5 Norma IEEE C37.118 .....	39
<b>2.2.2 Aplicações de SPMS</b> .....	40
2.2.2.1 Aplicações de Visualização e Monitoramento .....	40
2.2.2.2 Aplicações de Controle e Proteção .....	41
2.2.2.3 Aplicações em Estudos Off-line .....	42
2.3 VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO .....	43
<b>2.3.1 Histórico</b> .....	43
2.3.1.1 Julho/Agosto de 1996 - Interrupções na Interconexão Oeste ...	43
2.3.1.2 Agosto de 2000 - Oscilações pouco amortecidas no COI ....	45
2.3.1.3 2001 - Registros de sub-frequência na Interconexão Oeste ...	45
2.3.1.4 Agosto de 2003 - Blecaute no Nordeste dos EUA e Canadá ...	46
2.3.1.5 Março de 2004 - Perturbações artificiais na China .....	47
2.3.1.6 Junho de 2004 - Corte de geração em Palo Verde .....	47
2.3.1.7 Eventos de Recuperação de Tensão Retardada por Faltas - FIDVR .....	47
2.3.1.8 Julho de 2009 - Validação Sistêmica do Sistema Interligado Nacional (Brasil) .....	48
<b>2.3.2 Modelos Estáticos vs. Modelos Dinâmicos</b> .....	49
<b>2.3.3 Validação Sistêmica vs. Validação de Componentes</b> .....	50
<b>2.3.4 Política de Validação de Modelos de Unidades Geradoras do WSCC</b> .....	52
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	54
<b>3 SIMULAÇÃO DINÂMICA HÍBRIDA</b> .....	55
3.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	55

3.2	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	58
3.2.1	Métodos Indiretos	58
3.2.1.1	Método do Transformador Defasador	59
3.2.1.2	Método do Gerador de Resposta Rápida	60
3.2.1.3	Método da Impedância Variável	61
3.2.2	Método Direto	62
3.2.2.1	Simulação Convencional no SIMSP	63
3.2.2.2	Simulação Híbrida no SIMSP	64
3.3	VALIDAÇÃO DE MODELOS USANDO SIMULAÇÃO HÍBRIDA	68
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	73
4.1	TIPOS DE TESTES	73
4.2	ANÁLISE QUANTITATIVA	75
4.2.1	Sensibilidade de Trajetórias	76
4.2.2	Índices de Similaridade	85
4.3	ANÁLISE QUALITATIVA	90
4.3.1	Parâmetro $X_d$ vs. $Ka$	90
4.3.2	Parâmetro $X'_d$ vs. $T'_{d0}$	92
4.3.3	Parâmetro $X''_d$	94
4.3.4	Parâmetro $H$ vs. $X_q$	94
4.4	METODOLOGIA PARA AJUSTE MANUAL DE PARÂMETROS	96
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
5	SIMULADOR DIGITAL PARA ANÁLISE EM TEMPO REAL	101
5.1	DESCRIÇÃO E APLICAÇÕES	101
5.2	SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	102
5.3	HARDWARE	103
5.4	SOFTWARE	106
5.5	SETUP DE SIMULAÇÕES	108
5.6	MODELAGEM DE COMPONENTES	108
5.6.1	Máquina Síncrona	108
5.6.2	Linhas de Transmissão	110
5.6.3	Obtenção de Fasores	110
5.7	ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS	110
5.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
6	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	115
6.1	ESTUDO DE CASO: SISTEMA HIPOTÉTICO	115
6.1.1	Tipos de Perturbação	115
6.2	AJUSTE DE PARÂMETROS DE MODELOS	118
6.2.1	Caso A: Alteração em $X_d$ e $X'_d$	118
6.2.2	Caso B: Alteração em $X_q$ , $Ka$ e $H$	122
6.2.3	Caso C: Alteração em $X_d$ , $X'_d$ , $Ka$ , $H$ e $T'_{d0}$	126

6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	131
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>133</b>
7.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	136
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	137
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>139</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A crescente evolução dos sistemas elétricos de potência nas últimas décadas vem sendo impulsionada, principalmente, pelo processo de desverticalização do setor, responsável por introduzir um ambiente competitivo entre os agentes e caracterizar a separação entre *commodity* (energia elétrica) e o serviço de entrega (sistema de transmissão). Nesse contexto, a busca pelo menor preço conduz, naturalmente, à um melhor aproveitamento da infraestrutura dos sistemas elétricos com foco na otimização da operação. Como resultado, verifica-se um aumento nos investimentos em tecnologia para o setor e, conseqüentemente, maior complexidade no planejamento e operação dos sistemas de potência (SILVA, 2001).

O crescimento de parques de geração distribuída, bem como o incentivo ao uso de fontes alternativas de energia permite vislumbrar um novo panorama na relação gerador/consumidor. O emprego de pequenos grupos geradores junto aos pontos de carga resulta em diversas vantagens relacionadas à disponibilidade do suprimento de energia, entretanto, implica em mudanças conceituais da filosofia de operação interligada de sistemas.

Com relação às novas tecnologias empregadas em sistemas elétricos, destaca-se o uso de equipamentos de controle baseados em eletrônica de potência (dispositivos FACTS - *Flexible AC Transmission Systems*), links de HVDC (*High Voltage Direct Current*), Redes Inteligentes (*Smart Grids*) e sistemas de automação, controle e proteção baseados em dispositivos microprocessados denominados IEDs (*Intelligent Electronic Devices*). Em função da complexidade inerente aos avanços tecnológicos, fica evidente a necessidade de se conhecer em detalhes o sistema sob operação, tanto do ponto de vista da operação em tempo real como em relação aos modelos de simulação utilizados em estudos *off-line*.

Softwares de simulação de sistemas de potência permitem avaliar o comportamento do sistema tendo em vista a estabilidade frente à ocorrência de perturbações. Estudos dessa natureza possibilitam a obtenção de diversos resultados, como a caracterização de restrições operativas de equipamentos e linhas de transmissão, a avaliação do desempenho dinâmico do sistema e propostas de ajustes para sistemas de controle e proteção. Dessa forma, a confiança nos resultados obtidos por meio de simulações está diretamente ligada à qualidade dos modelos utilizados (HUANG et al., 2006).

Modelos com respostas otimistas superestimam os limites técnicos dos equipamentos levando o sistema a ser operado em condições inseguras. Modelos cujas respostas são pessimistas, por sua vez, subestimam a capacidade do sistema em manter a estabilidade fornecendo respostas demasiadamente

conservadoras, provocando, por consequência, uma sub-utilização do sistema (operação não-otimizada) e sinalizando investimentos desnecessários ao setor (NERC, 2010a).

Tradicionalmente, a determinação e verificação de parâmetros de modelos de simulação é feita mediante a realização de ensaios específicos (IEEE, 1993). No caso de unidades geradoras, a execução de ensaios implica em paradas programadas restritas às condições do sistema, redução da disponibilidade da unidade, além de expor as máquinas a condições extremas de funcionamento, como no caso de ensaios de curto-circuito franco (ITAIPIU, 1993). Ensaios dessa natureza exigem ainda, na maioria das vezes, instalação de instrumentação especial para captura de sinais da máquina, além de demandar um considerável efetivo que envolve diversas áreas da empresa.

Além da preocupação com a modelagem de unidades geradoras, uma correta representação do comportamento das cargas é importante para a avaliação da dinâmica de sistemas elétricos. Nas últimas décadas, houve um aumento na proporção de cargas especiais, como sistemas de condicionamento de ar (compressores) e cargas eletrônicas, em detrimento às cargas resistivas. Apesar de ineficientes energeticamente, as cargas resistivas possuem características favoráveis à estabilidade de tensão, já que a potência absorvida é reduzida com o quadrado da tensão. Compressores e cargas eletrônicas, por sua vez, se comportam como injeções de potência constante em relação à tensão, ou seja, mantêm a demanda de potência mesmo quando o sistema está com perfil baixo de tensão (próximo ao colapso). Além disso, a composição das cargas pode variar sazonalmente, fato que deve ser levado em conta quando da seleção dos modelos adotados para simulação (NERC, 2010a).

Neste contexto, a tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS - *Synchronized Phasor Measurement Systems*) vem ao encontro das necessidades relativas à monitoração em tempo real de sistemas de potência e validação de modelos de simulação dinâmica. As unidades de medição fasorial (PMUs - *Phasor Measurement Units*) permitem aquisição de grandezas elétricas distantes geograficamente, à elevadas taxas de amostragem e referenciadas à uma mesma base de tempo, por meio de sincronização via GPS (*Global Positioning System*) (DECKER et al., 2006a). Registros fasoriais de perturbações, portanto, podem ser usados como cenários de *benchmark* para avaliação da qualidade dos modelos de simulação a partir da comparação entre sinais medidos e simulados.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo e implementação computacional da técnica de Simulação Dinâmica Híbrida, bem como a avaliação de sua aplicabilidade na validação de modelos de unidades geradoras, usando, como base, dados fasoriais obtidos nos terminais das unidades geradoras durante a ocorrência de perturbações naturais de sistemas de potência.

## 1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos envolvidos no desenvolvimento do trabalho, quais sejam: simulação dinâmica de sistemas de potência, Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada e validação de modelos de simulação.

No Capítulo 3, por sua vez, discute-se a formulação matemática utilizada na técnica de Simulação Dinâmica Híbrida e detalhes de implementação do protótipo desenvolvido.

No Capítulo 4, estudos de sensibilidade à variações nos parâmetros de unidades geradoras são apresentados, servindo de subsídio para proposição de uma metodologia baseada em regras para o ajuste manual de parâmetros.

No Capítulo 5 apresenta-se a plataforma de simulação digital de sistemas de potência em tempo real (RTDS - *Real Time Digital Simulator*), descrevendo-se o conjunto hardware/software do equipamento, aspectos da modelagem dos componentes de sistemas de potência e contextualização do uso da ferramenta na obtenção de dados fasoriais para simulação híbrida.

No Capítulo 6, são descritos estudos de caso realizados com base em experimentos utilizando o RTDS para validação da metodologia de ajuste de parâmetros proposta. Ensaios foram conduzidos utilizando um sistema hipotético, a partir do qual foram obtidos registros de perturbações usados como dados de entrada para simulação híbrida.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros, seguidas das referências que serviram de base para elaboração do trabalho.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados, em termos gerais, três grandes temas que formam a base para o desenvolvimento do trabalho, quais sejam: simulação dinâmica de sistemas de potência, Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada e validação de modelos dinâmicos de simulação.

### 2.1 SIMULAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Ferramentas de simulação dinâmica de sistemas de potência são aplicativos computacionais capazes de fornecer respostas dinâmicas de sistemas elétricos frente à ocorrência de perturbações. Por meio da solução passo-a-passo das equações diferenciais e algébricas que descrevem o comportamento dos elementos do sistema, é possível determinar, para o intervalo de tempo simulado, se o sistema irá alcançar condições estáveis ou instáveis (MANZONI, 1996).

Dentre as atividades realizadas com base nos resultados obtidos de aplicativos de simulação dinâmica podem ser citados diversos estudos elétricos, quais sejam:

- Avaliação da estabilidade de sistemas de potência;
- Verificação do desempenho e ajuste de controladores (reguladores de tensão e velocidade, estabilizadores de potência, controle automático de geração e controle automático de tensão);
- Parametrização de sistemas de proteção e esquemas de controle de emergência;
- Definição de restrições operativas;
- Identificação de elementos críticos do sistema (critério N-1);
- Reprodução e análise de perturbações;
- Elaboração de procedimentos de operação.

Na sequência, tem-se uma descrição sucinta do equacionamento matemático envolvido no processo de simulação dinâmica de sistemas de potência, destacando-se a interação entre os diversos modelos representados: máquinas síncronas, controladores, cargas e rede de transmissão.

### 2.1.1 Formulação Matemática

Formalmente, o problema de simulação dinâmica de sistemas de potência pode ser representado por um conjunto de equações diferenciais ordinárias não-lineares, responsável pela modelagem da dinâmica de máquinas síncronas e seus controladores; e um conjunto de equações algébricas não-lineares, associado ao sistema de transmissão, estatores dos geradores e modelos de carga (DECKER; SILVA, 2006). De maneira genérica, o equacionamento pode ser expresso da seguinte forma:

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x,y) \\ 0 &= g(x,y) \end{cases} \quad (2.1)$$

onde:

- $f$  : vetor de equações diferenciais;
- $g$  : vetor de equações algébricas;
- $x$  : vetor de variáveis de estado;
- $y$  : vetor de variáveis algébricas.

Tradicionalmente, o equacionamento da dinâmica de máquinas síncronas é feito mediante a aplicação da transformação  $dq0$ , ou transformação de Park, por meio da qual as grandezas da máquina são transferidas do estator para o rotor, ou seja, as equações têm por base uma referência que gira à mesma velocidade do rotor da máquina. Este artifício permite que as indutâncias próprias do rotor e mútuas do estator sejam representadas de forma independente da posição angular do rotor ( $\theta^1$ ) e, conseqüentemente, do tempo, simplificando sobremaneira a formulação matemática (KUNDUR, 1994).

Para a simulação dinâmica de sistemas multi-máquinas, no entanto, utiliza-se uma referência independente para a rede elétrica, que gira à velocidade síncrona, porém, adotada com base nas condições iniciais de regime permanente (*load flow*) da barra de folga do sistema. Para cada máquina do sistema é feita então uma conversão entre os sistemas de referência na interface da unidade geradora com o sistema (barras terminais) (ARRILLAGA; ARNOLD; HARKER, 1983).

A representação do sistema de transmissão e acoplamento de máquinas síncronas e cargas é feito por meio da matriz de admitâncias nodais do sistema ( $Y_{bus}$ ). A Figura 1 ilustra, de maneira simplificada, os elementos contemplados na simulação de sistemas de potência:

---

<sup>1</sup>  $\theta$  é definido como o ângulo entre o eixo direto e a linha central do enrolamento da fase  $a$ . O ângulo  $\theta$  aumenta continuamente com o tempo em função da velocidade angular da máquina ( $w_r$ ).

- Unidades geradoras e controles associados (reguladores de tensão e velocidade e estabilizadores), representados por equações diferenciais;
- Sistema de transmissão, representado pela matriz de admitâncias nodais;
- Cargas estáticas, representadas por injeções de corrente e admitâncias (equivalente Norton);
- Demais elementos dinâmicos (dispositivos FACTS, controles de links HVDC e modelos de cargas dinâmicas), também representados por equações diferenciais.

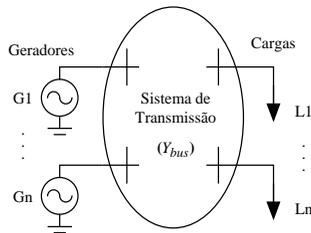


Figura 1 – Modelo de simulação dinâmica (HUANG; XU, 2004).

A Figura 2, por sua vez, detalha a estrutura do modelo matemático utilizado para representação de uma unidade geradora conectada ao sistema de potência. O diagrama de blocos evidencia os vários grupos de equações e as variáveis de interface utilizadas no processo de solução do sistema.

Os significados das variáveis citadas no diagrama da Figura 2 são descritos na sequência.

- $P_m$  : potência mecânica aplicada ao eixo do gerador;
- $w$  : velocidade angular do eixo do gerador;
- $V_E$  : tensão na saída do estabilizador;
- $P_e$  : potência elétrica do entreferro;
- $\delta$  : posição angular do rotor em relação à uma referência síncrona;
- $E_{fd}$  : tensão na saída do sistema de excitação aplicada ao enrolamento de campo do gerador;
- $V_d, V_q$  : componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal do gerador;
- $E'_d, E'_q$  : componentes de eixo direto e quadratura da tensão transitória interna do gerador;
- $E''_d, E''_q$  : componentes de eixo direto e quadratura da tensão subtransitória interna do gerador;

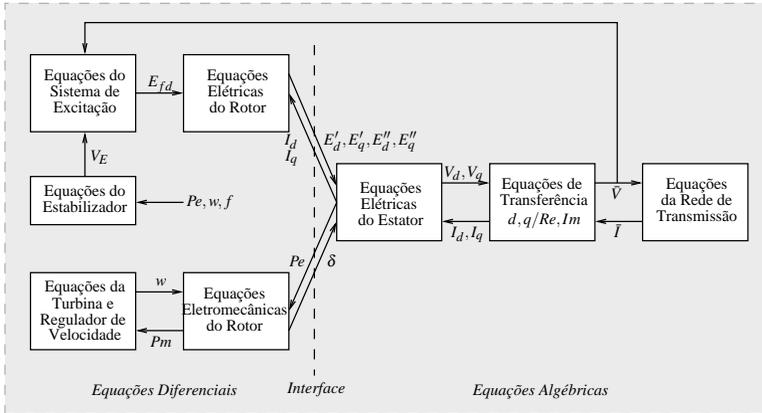


Figura 2 – Interação entre equações do modelo matemático para estudos de estabilidade transitória (DECKER; SILVA, 2006).

$I_d, I_q$  : componentes de eixo direto e quadratura da corrente de estator do gerador;

$\bar{I}$  : corrente complexa do estator do gerador;

$\bar{V}$  : tensão complexa terminal do gerador.

São destacados dois conjuntos de variáveis comuns às equações algébricas e diferenciais. Essas variáveis são denominadas variáveis de interface e são listadas a seguir.

$u$  : variáveis algébricas presentes nas equações diferenciais  
( $I_d, I_q, P_e, V$ );

$E$  : variáveis de estado presentes nas equações algébricas  
( $E'_d, E'_q, E''_d, E''_q, \delta$ ).

Dois esquemas básicos têm sido utilizados na resolução do conjunto de equações resultantes, quais sejam (MANZONI, 1996):

- **Método Alternado:** resolução das equações algébricas e diferenciais de maneira separada, alternando-se as soluções dentro de um passo de integração;
- **Método Simultâneo:** as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas a diferenças, agrupadas com as equações algébricas originais e resolvidas de maneira simultânea por métodos do tipo Newton.

Os métodos de solução podem ser categorizados ainda quanto ao tipo de integração numérica utilizada: *explícita* ou *implícita*. Nesse contexto o método de integração trapezoidal implícito tem sido um dos mais utilizados por

conta de suas características de estabilidade e precisão (DECKER; SILVA, 2006).

### 2.1.2 Simulação Dinâmica Híbrida

O conceito de simulação híbrida trata da injeção de grandezas elétricas, obtidas via medição/monitoramento de sistemas reais, em softwares de simulação dinâmica de sistemas de potência (HUANG; XU, 2004). A Figura 3 ilustra didaticamente o conceito envolvido no processo de simulação híbrida, pelo qual são injetados no modelo de simulação, dados fasoriais previamente conhecidos de tensão em uma barra monitorada, com o objetivo de reproduzir o comportamento do sistema externo conectado a uma unidade geradora (subsistema sob simulação).

Na Figura 3a, apresenta-se o modelo de um sistema completo utilizado para realização de simulações convencionais. Em 3b mostra-se o sistema reduzido (gerador G1 e sua barra terminal), destacando-se o subsistema isolado a ser simulado de maneira híbrida.

A técnica de simulação dinâmica híbrida pode ser interpretada como uma interface entre sistemas reais e simulações computacionais. Assim, traz-se para o ambiente de simulação, eventos verificados na prática por medições em campo (HUANG; XU, 2004).

O maior ganho com a utilização da técnica, sem dúvida, refere-se à comparação entre sinais medidos em campo e respostas obtidas via simulação híbrida numa base comum, fato que implica na possibilidade de validação de modelos dinâmicos. A rigor, se o modelo encontra-se ajustado, respostas obtidas via simulação híbrida devem ser similares àquelas coletadas por sistemas de aquisição de dados.

A seguir são apresentadas as potenciais aplicações e vantagens da ferramenta de simulação dinâmica híbrida:

- Validação de modelos de máquinas síncronas, sistemas de controle e cargas dinâmicas;
- Reprodução de cenários reais com fidelidade (*playback* de eventos);
- Representação de sistemas externos por meio das condições das barras de fronteira, evitando a necessidade de se utilizar sistemas equivalentes;
- Restrição do número de componentes a serem analisados no caso de validação de modelos;
- Possibilidade de comparação entre medições e simulações nas mesmas condições de operação (cenários de perturbação).

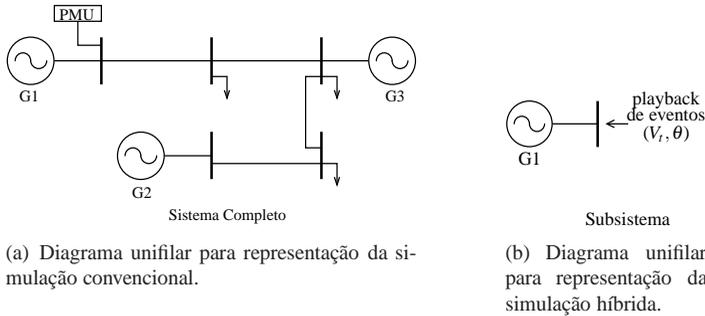


Figura 3 – Esquemas ilustrativos para apresentação do conceito de simulação híbrida.

Detalhes da formulação matemática e implementação computacional da técnica de simulação híbrida são abordados no Capítulo 3.

## 2.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada são sistemas distribuídos de aquisição de dados em pontos geograficamente distantes, com base em uma mesma referência de tempo, utilizados para obtenção de grandezas elétricas associadas aos sistemas de potência (sincrofasores de tensão e corrente) (PHADKE, 2006).

A tecnologia empregada utiliza sinais do sistema de posicionamento global (GPS) para prover sincronismo entre os equipamentos de medição nos sistemas de potência, possibilitando o cálculo de ângulos associados a tensões e correntes. Tradicionalmente, esse tipo de informação é obtida por Estimadores Estáticos de Estado em intervalos da ordem de segundos. Os SPMS, por sua vez, operam mediante o uso de fasores que são gerados a taxas de 10 a 60 fasores/segundo. Registros dessa natureza, em geral, permitem capturar fenômenos dinâmicos associados a perturbações e oscilações eletromecânicas de baixa frequência, entre outros (DECKER et al., 2006a).

Os SPMS são compostos por Unidades de Medição Fasorial (PMUs - *Phasor Measurement Units*), Concentradores de Dados Fasoriais (PDC - *Phasor Data Concentrator*), sistemas de comunicação de dados e por receptores GPS conectados às PMUs (DECKER et al., 2006b). A Figura 4 apresenta um esquema que ilustra uma visão geral dos componentes integrantes dos SPMS.

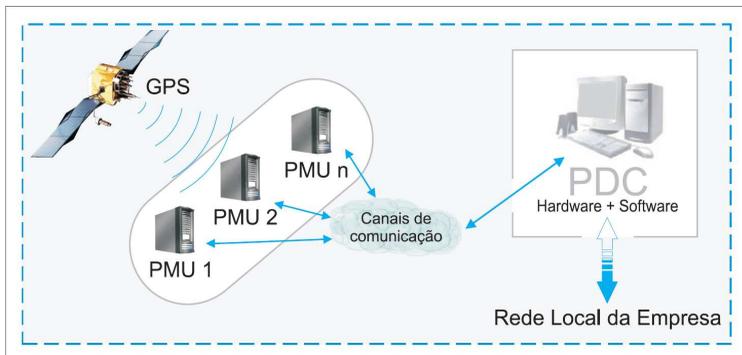


Figura 4 – Esquema ilustrativo da estrutura de um SPMS.

As unidades de medição fasorial sincronizada (PMUs) foram inicialmente desenvolvidas no final da década de 80 por pesquisadores do *Virginia Tech Institute* (EUA) financiados pelo DoE (*US Department of Energy*), EPRI (*US Electric Power Research Institute*) e pelo NSF (*US National Science Foundation*). A necessidade de melhoria nas ferramentas de monitoramento em tempo real de sistemas de potência foi a principal motivação para estudos relacionados à tecnologia (PHADKE, 2006).

Os primeiros protótipos de SPMS foram instalados em 1989 no âmbito do projeto WAMS (*Wide Area Measurement System*). Foram monitorados os sistemas elétricos das empresas BPA (*Bonneville Power Administration*) e SCE (*Southern California Edison*), pertencentes ao WECC (*Western Electric Coordinating Council*) localizados no oeste dos Estados Unidos (PHADKE, 2006).

Atualmente, o gerenciamento dos Sistemas de Medição Fasorial nos EUA está sob a responsabilidade do NASPI (*North American SynchroPhasor Initiative*), fundada em 2007 pelo DoE e NERC, em conjunto com empresas do setor elétrico, fornecedores de equipamentos, consultores e pesquisadores da tecnologia. A organização está estruturada em diversos grupos de trabalho com foco na melhoria da confiabilidade de sistemas elétricos, por meio do monitoramento e controle sistêmico em tempo real. A Figura 5 ilustra a localização das cerca de 200 PMUs instaladas no sistema elétrico norte-americano e canadense, até setembro de 2009, além da localização de futuras instalações de equipamentos previstas para o sistema (DAGLE, 2009).

A China, atualmente, é o país que conta com o maior número de PMUs em operação. Até julho de 2010, mais de 1000 unidades já haviam sido integradas ao sistema elétrico chinês. De acordo com Tianshu (2010), todas as

subestações de 500 kV ou tensão superior, além de plantas de geração com potência instalada maior que 100 MW, possuem PMUs instaladas. As unidades de medição fasorial instaladas em plantas de geração, além do ângulo do rotor, permitem a medição de outros sinais de controle relacionados à unidade geradora, como tensão e corrente de excitação, sinais de PSS e reguladores de velocidade. Estas medições possibilitam aplicações de monitoramento da operação de geradores e utilização de técnicas de validação e identificação de parâmetros de modelos de máquinas síncronas (XIE et al., 2006; ZHAO et al., 1995; CHEN et al., 2000).

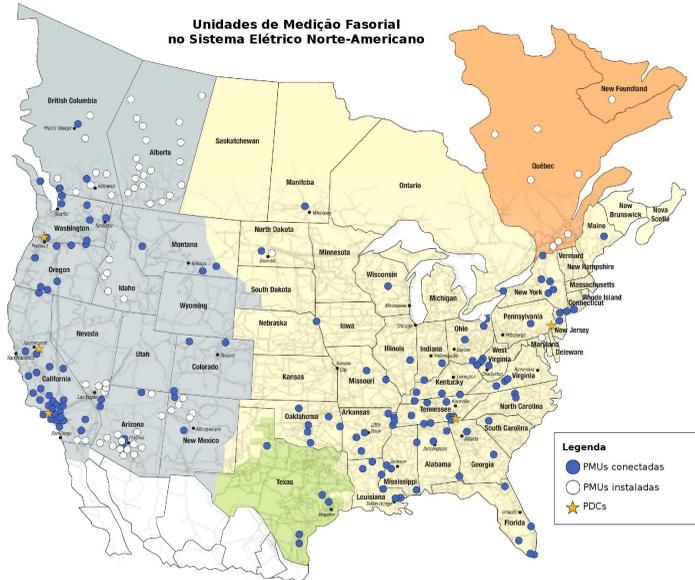


Figura 5 – Situação dos SPMS no sistema norte-americano e canadense (09/2009) (<http://www.naspi.org>)

Recentemente, os SPMS têm recebido atenção nos mais diversos centros de pesquisas no mundo, de modo que vários protótipos encontram-se em operação em países como Japão (SAITOH, 2002), Coreia do Sul (YI; CHOO; YOON, 2001), Taiwan (LIU, 2002), México (MARTÍNEZ; JUÁREZ; GUZMÁN, 2006), Suécia (LIRBUKT; BREIDABLIK; GJERDE, 2008), Dinamarca (RASMUSSEN; JORGENSEN, 2006), Croácia (SKOK; IVANKOVIC; CERINA, 2007), Áustria, Austrália, Tailândia, Hungria (BENETTI, 2009), entre outros.

No Brasil, pode-se citar como iniciativa pioneira o desenvolvimento do projeto MedFasee, iniciado em 2003, resultado da parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a empresa Reason Tecnologia S.A. e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). No âmbito do projeto foi implementado, inicialmente, um protótipo de SPMS composto de três PMUs instaladas nas capitais dos estados da região sul do país. As unidades de medição fasorial foram conectadas à rede de baixa tensão e enviavam sincrofasores através da Internet (MEDFASEE, 2006).

O projeto serviu de base para o desenvolvimento de outros projetos subsequentes, quais sejam:

- **MedFasee Baixa Tensão:** ampliação do projeto MedFasee, contemplando a instalação de PMUs em universidades cobrindo assim todas as regiões do país. Atualmente, o projeto conta com 14 PMUs instaladas, permitindo a monitoração do desempenho dinâmico do Sistema Interligado Nacional (SIN) a partir da rede de distribuição em baixa tensão;
- **MedFasee Eletrosul:** resultado da parceria entre UFSC, as empresas Reason Tecnologia S.A. e Eletrosul Centrais Elétricas. No âmbito desse projeto foi contemplada a implementação de um protótipo de SPMS com 4 PMUs instaladas no sistema de transmissão da Eletrosul (LTs de 525 kV). Por este sistema são monitorados fasores de tensão e corrente de 8 terminais, subsidiando aplicações de monitoramento e localização de faltas em linhas de transmissão;
- **MedFasee CTEEP:** parceria entre UFSC, Reason e a Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista que prevê a instalação de PMUs no sistema de extra-alta tensão da CTEEP. O protótipo ainda encontra-se em fase de desenvolvimento e objetiva fornecer dados para aplicações de monitoramento das condições operativas de sistemas de proteção, monitoramento de aberturas angulares, identificação de oscilações e localização de faltas.

A Figura 6 apresenta a tela do portal do projeto MedFasee Baixa Tensão, no qual fasores das PMUs instaladas na rede de baixa tensão são disponibilizados para visualização em tempo real.

Dentre os resultados obtidos com base na experiência adquirida com o desenvolvimento dos protótipos, podem ser destacados estudos envolvendo as seguintes aplicações usando dados de sistemas de medição fasorial sincronizada: análise de oscilações de baixa frequência (SANTOS; DECKER; AGOSTINI, 2010), localização de faltas em linhas de transmissão (BENETTI, 2009), esquemas de controle emergencial (PESENTE; DECKER; SILVA,

2010) e melhoria da estabilidade à pequenos sinais (DOTTA; SILVA; DECKER, 2009).

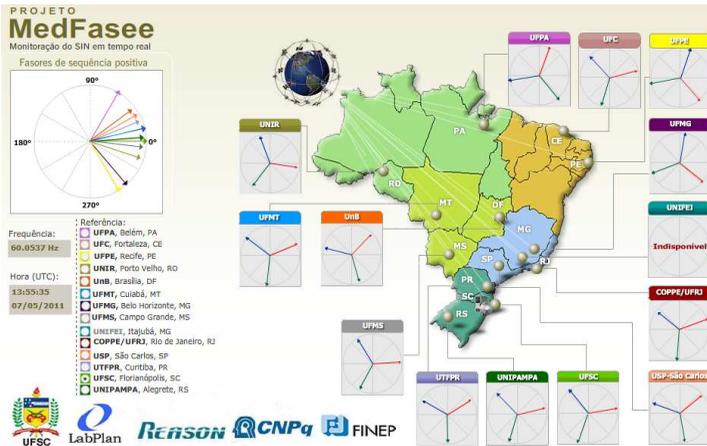


Figura 6 – Tela do portal do projeto MedFasee Baixa Tensão - fasores em tempo real (<http://www.medfasee.ufsc.br/temporeal>).

## 2.2.1 Estrutura dos SPMS

Na sequência são apresentados detalhes do funcionamento e o papel desempenhado pelos componentes envolvidos nos sistemas de medição fasorial sincronizada.

### 2.2.1.1 Unidade de Medição Fasorial (PMU)

As PMUs são as unidades básicas dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada. Esses equipamentos são responsáveis pela aquisição e processamento dos sinais elétricos, além de enviar os fasores calculados ao concentrador de dados. Um diagrama de blocos funcionais de uma PMU é apresentado na Figura 7.

Os sinais elétricos analógicos provenientes dos transformadores de instrumentação passam por filtros *anti-aliasing* limitando a banda dos sinais. A transdução é realizada por conversores analógico-digital cuja frequência de amostragem é corrigida por um oscilador do tipo *phase-locked* por meio de sinais de referência temporal provenientes do receptor GPS. Este mecanismo

garante que a amostragem seja feita simultaneamente em todos os equipamentos da rede de medição (PHADKE et al., 1994).

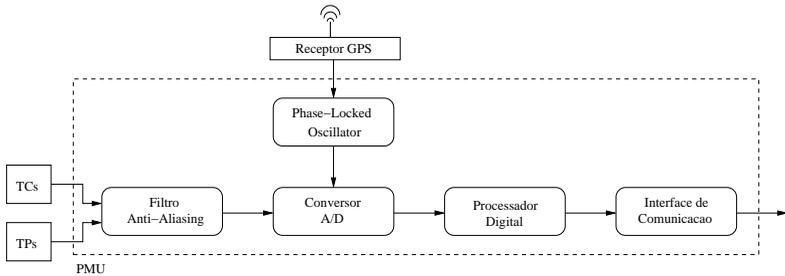


Figura 7 – Blocos funcionais de uma PMU.

Após realizada a aquisição dos sinais em forma digital, podem ser utilizadas diversas ferramentas de processamento de sinais, como a Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*) para a estimação dos fasores referentes às formas de onda obtidas. Geralmente são empregadas implementações recursivas do algoritmo da DFT para otimização do processamento (EHRENSPERGER, 2002).

#### 2.2.1.2 Fonte de Sincronismo Temporal (GPS)

A sincronização entre a amostragem das diversas PMUs é feita pelo Sistema de Posicionamento Global. O sistema GPS é composto por um conjunto de 24 satélites que fornecem coordenadas espaciais juntamente com informações de tempo com precisão da ordem de 100 nanosegundos (SANTOS, 2008). Os receptores de GPS captam informações de sincronismo dos satélites por meio de antenas e distribuem para as Unidades de Medição Fasorial via protocolos específicos, por exemplo, IRIG-B (*Inter-Range Instrumentation Group Time Code B*). Os dados de sincronismo são então utilizados para a correção dos relógios internos das PMUs, garantindo a amostragem dos sinais de maneira sincronizada.

Sistemas de navegação similares ao GPS estão em desenvolvimento na Rússia (sistema GLONASS), na Europa (sistema GALILEO) e na China (sistema COMPASS) e que poderão ser utilizados como alternativas ao sistema GPS, desenvolvido nos EUA (SANTOS, 2008).

### 2.2.1.3 Concentrador de Dados (PDC)

Os concentradores de dados fásoriais são responsáveis pela coleta e armazenamento dos dados. Assim que um novo *frame* de dados é recebido, o PDC ordena o pacote de acordo com sua etiqueta de tempo e faz o armazenamento das informações em bancos de dados. Eventualmente, o PDC pode executar cálculos e verificações adicionais disparando *triggers* quando perturbações forem detectadas (AGOSTINI, 2006).

Os PDCs também são responsáveis por disponibilizar interfaces de comunicação para aplicações de visualização, monitoramento, controle e proteção. Devido ao número de PMUs que podem estar conectadas a um PDC e pela criticidade das tarefas que devem ser realizadas pelo concentrador, geralmente empregam-se sistemas operacionais e gerenciadores de banco de dados de tempo real, garantindo a execução das tarefas em tempo determinístico (*hard real time*).

Recentemente, meados de 2010, foi disponibilizada a primeira versão estável da ferramenta *openPDC*<sup>2</sup>. Trata-se de um conjunto de aplicativos usados para processamento, armazenamento, e retransmissão de sincrofases, além de servir para o *setup* e testes de comunicação entre PMU-PDC e PDC-PDC. O desenvolvimento da ferramenta foi baseado nas experiências da empresa TVA (*Tennessee Valley Authority*) na implementação do *SuperPDC*, iniciada em 2004 como suporte para o projeto EIPP - *Eastern Interconnection Phasor Project* (atualmente NASPI).

O produto foi disponibilizado publicamente como plataforma livre sob a responsabilidade da *Grid Power Alliance*, entidade sem fins lucrativos para suporte e desenvolvimento de ferramentas de apoio ao setor elétrico. Atualmente, o projeto *openPDC* conta com o apoio de vários fabricantes responsáveis por viabilizar a integração da ferramenta com produtos comerciais (GPA, 2010).

### 2.2.1.4 Sistemas de Comunicação

A função básica dos sistemas de comunicação em SPMSs é prover a transferência de dados entre PMUs e PDCs e entre PDCs de diferentes níveis hierárquicos ou áreas distintas. Os aspectos mais importantes com relação à escolha do meio de comunicação utilizado são a disponibilidade do canal e os atrasos inerentes à transmissão. De fato, dependendo do tipo de aplicação pretendida, os requisitos de atraso e disponibilidade podem ser críticos. Por

---

<sup>2</sup>disponível em <http://openpdc.codeplex.com/>

exemplo, aplicações de controle e proteção exigem canais extremamente confiáveis, requisito dispensado para aplicações de monitoramento/visualização (EHRENSPERGER, 2002).

Dentre as opções para a conexão entre PMUs e PDCs, podem ser citados os *links* de fibra óptica, canais de microondas e sistemas de comunicação SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). Até mesmo a Internet pode ser utilizada para aplicações não-críticas (AGOSTINI, 2006).

### 2.2.1.5 Norma IEEE C37.118

A norma IEEE C37.118 - *Standard for Synchrophasors for Power Systems* contempla a padronização de equipamentos de medição fasorial em sistemas de potência. O documento aborda a definição e cálculo de sincrofases, requisitos de sincronismo, limites de precisão dos equipamentos, além da especificação do formato de mensagens a serem trocadas entre PMUs e PDCs e mapeamento dos *frames* dados para protocolos seriais, TCP/IP e UDP/IP. A norma apresenta ainda o conceito de TVE (*Total Vector Error*) e requisitos de desempenho para equipamentos de medição fasorial (AGOSTINI, 2006; IEEE, 2005).

Recentemente (2010), foi publicado o *draft* da nova versão da norma IEEE C37.118. Dentre as principais modificações com relação à versão anterior podem ser destacados os seguintes aspectos (IEEE, 2010):

- Separação da norma em dois documentos: IEEE PC37.118.1 (*Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*), relativo à medição de sincrofases e requisitos técnicos; e IEEE PC37.118.2 (*Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems*), referente à aspectos de comunicação de dados fasoriais;
- Especificação de outras duas grandezas a serem estimadas pelas PMUs além do sincrofasor: frequência e taxa de variação de frequência;
- Definição de outros dois indicadores para avaliação da qualidade das medições, além do TVE, quais sejam: FE (*Frequency Error*) e RFE (*Rate of Change of Frequency Error*);
- Introdução de requisitos e testes para avaliação da resposta de PMUs frente à variações dinâmicas das grandezas monitoradas;
- Classificação de PMUs em equipamentos de monitoramento (tipo M) e de proteção (tipo P), de modo que requisitos diferenciados são exigidos de acordo com a utilização do equipamento.

## 2.2.2 Aplicações de SPMS

Na sequência, são discutidas, de maneira sucinta, diversas aplicações baseadas em dados de SPMS voltadas à melhoria da operação, controle, proteção e planejamento de sistemas elétricos. As aplicações foram classificadas em três categorias a depender de sua natureza: Aplicações de Visualização e Monitoramento, Aplicações de Controle e Proteção e Aplicações em Estudos Off-line.

### 2.2.2.1 Aplicações de Visualização e Monitoramento

Trata-se de ferramentas de monitoramento que proporcionam a obtenção de informações sistêmicas em tempo real.

- **Visualização da Dinâmica em Tempo Real**

Disponibilização de dados coletados a partir de PMUs em consoles para operadores em centros de controle, possibilitando o acompanhamento sistêmico da dinâmica de sistemas elétricos. Fasores (módulo e ângulo) de grandezas elétricas podem ser plotados em função do tempo ou em gráficos polares. Sinais de frequência obtidos indiretamente dos fasores medidos também apresentam informações importantes para o acompanhamento das condições de estabilidade. Dentre as ferramentas de visualização sistêmica disponíveis comercialmente podem ser citadas: RTDMS (CERTS, 2005), SCE SMART (*Synchronized Measurement and Analysis in Real Time*) (BHARGAVA; A., 2008), E-Terravision e Power World Retriever (NERC, 2010b).

- **Monitoramento de Oscilações**

São ferramentas utilizadas para a caracterização de oscilações de baixa-frequência em sistemas elétricos em função de parâmetros como frequência e amortecimento, bem como para o cálculo de *mode shapes* e fatores de participação. Dentre as técnicas utilizadas podem ser citados métodos paramétricos como: métodos de Prony (HAUER, 1991; SANTOS, 2008), Transformada de Hilbert (LIU; MESSINA; VITTAL, 2004), Transformada de Wavelet (CIGRE, 2007) e Modelos AR/ARMA (SANTOS, 2008).

- **Estimação Estática de Estados Híbrida**

Inclusão de tensões e correntes complexas em algoritmos de estimação estática de estados, com objetivo de melhorar a precisão e o processo de solução, aumentar a observabilidade do sistema e elevar a sensibilidade

no tratamento de medidas com erros grosseiros (RICE; HEYDT, 2005; ZHAO, 2006; CIPRIANI; COSTA, 2010).

- **Monitoramento da Estabilidade de Tensão**

Colapsos de tensão estão diretamente relacionados à ausência de suporte de reativos ou limitações em sistemas de transmissão na entrega de potência para áreas em déficit. Medições fasoriais podem ser utilizadas para determinação da sensibilidade da tensão em relação à potência reativa, possibilitando, por exemplo, a determinação de margens de potência em corredores de transmissão (NIGLYE et al., 2006; WARLAND; HOLEN, 2001).

### 2.2.2.2 Aplicações de Controle e Proteção

As aplicações relacionadas ao controle e proteção de sistemas de potência têm por função promover ações discretas ou contínuas no sentido de manter a estabilidade do sistema atuando de maneira preventiva ou corretiva.

- **Sistemas Especiais de Proteção (SEP)**

São esquemas que implementam ações de carácter corretivo após a ocorrência de grandes perturbações para manutenção da estabilidade transitória. Tradicionalmente, os SEPs realizam a tomada de decisão baseada em eventos específicos, como abertura de linhas de transmissão. O uso de SPMS permite que o estado global do sistema seja levado em conta na implementação de regras de controle (SHI; XIE; HAN, 2005). Dados fasoriais também podem ser utilizados em métodos que realizam a construção de modelos SIME (*Single Machine Equivalent*) em tempo real para predição da estabilidade angular (PESENTE, 2009; ERNST et al., 1998).

- **Melhoria da Estabilidade à Pequenas Perturbações**

Sistemas de Medição Fasorial permitem que dados remotos sejam utilizados como sinais estabilizantes em estabilizadores de sistemas de potência (PSS - *Power System Stabilizers*). Informações sistêmicas provenientes dos SPMS possibilitam melhorias na observabilidade de modos de oscilação pouco amortecidos, servindo como realimentação para malhas de controle de plantas de geração e dispositivos FACTS (SNYDER et al., 1998; SAMUELSSON et al., 2002; DOTTA, 2010).

- **Controle Automático de Tensão**

A função desse tipo de aplicação é fazer a alocação de potência reativa

entre os diversos componentes da rede distribuídos geograficamente no sistema, como máquinas síncronas, reatores *shunt* e compensadores estáticos. A utilização de dados de SPMS é vantajosa pela visibilidade global do sistema, de modo que informações de barras mais sensíveis à variações de tensão sejam utilizadas para observar fenômenos de instabilidade iminentes. Esquemas centralizados de processamento de dados sistêmicos juntamente com sistemas de comunicação de alta velocidade e confiabilidade permitem que o suporte de reativos seja otimizado ao invés da utilização de ações de controle locais (TAYLOR; VENKATASUBRAMANIAN; CHEN, 2000; XIE et al., 2006).

- **Identificação de Perturbações em Tempo Real**

Aplicação para localização de faltas em linhas de transmissão em tempo real baseada em dados sincronizados de duas extremidades da linha. A utilização de dados fasoriais evita a necessidade de se conhecer previamente os parâmetros das linhas de transmissão, visto que esses parâmetros podem ser calculados em tempo real. As vantagens ainda incluem metodologias mais robustas e resultados mais precisos quando comparados a métodos que não utilizam sincronização (BENETTI, 2009).

### 2.2.2.3 Aplicações em Estudos Off-line

Dados fasoriais de perturbações podem ser utilizadas para subsidiar estudos elétricos, provendo melhores condições de análise de eventos e permitindo a verificação da qualidade dos modelos utilizados em ferramentas de simulação de sistemas de potência.

- **Análise de Perturbações**

A sincronização dos dados proveniente dos sistemas de medição fasorial facilita sobremaneira a reconstrução da sequência de eventos, particularmente em casos de perturbações complexas envolvendo a atuação de vários elementos de proteção e controle (NERC, 2010b).

- **Validação de Modelos**

Registros de perturbações reais podem ser comparados à simulações computacionais, permitindo a verificação e ajuste dos parâmetros de modelos dinâmicos utilizados na representação de sistemas de potência. Além da validação de modelos de unidades geradoras e seus sistemas de controle, dados fasoriais podem ser utilizados para estudos de caracterização da representação de cargas (HAUER; BESHIR; MITTELSTADT, 2000; DECKER et al., 2010).

## 2.3 VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO

A manutenção de modelos possui vital importância na garantia de bons resultados nos diversos estudos elétricos realizados a partir de ferramentas de simulação. No entanto, a real necessidade de estudos de validação de modelos foi somente evidenciada por meio de análises de grandes perturbações, as quais revelaram a ausência de modelos confiáveis para predição do comportamento dinâmico de sistemas elétricos sob na ocorrência de faltas (KOSTEREV; TAYLOR; MITTELSTADT, 1999).

Na sequência, apresenta-se uma revisão histórica de estudos de validação de modelos baseados em dados de perturbações reais, principalmente nos sistemas norte-americanos. Esta seção ainda contempla discussões a respeito da classificação de modelos quanto à natureza de seu comportamento (modelos dinâmicos e estáticos). Além disso, são listadas as principais dificuldades encontradas no processo de validação sistêmica de modelos e as vantagens relacionadas à técnica de validação de subsistemas (ou componentes) por meio da utilização da técnica de simulação dinâmica híbrida.

### 2.3.1 Histórico

#### 2.3.1.1 Julho/Agosto de 1996 - Interrupções na Interconexão Oeste

No verão de 1996, duas grandes perturbações ocorreram na interconexão California-Oregon (*COI - California-Oregon Intertie*): uma delas em 2 de julho e outra no dia 10 de agosto. A análise dessas perturbações, do ponto de vista de modelagem, foi um dos esforços pioneiros com relação à validação de modelos dinâmicos. Estudos iniciais mostraram grandes divergências entre resultados de simulações e dados de medições (Figura 8), identificando potenciais problemas de modelagem e sinalizando a necessidade de uma força tarefa com foco na validação dos modelos utilizados até então (KOSTEREV; DAVIES, 2010).

Dentre os principais resultados do estudo podem ser destacados:

- Por determinação do WSCC (*Western Systems Coordinating Council*), após a perturbação, todos os geradores com capacidade maior que 10 MW foram submetidos a testes para validação de modelos, de acordo com o Programa de Testes e Validação de Modelos de Geradores (*Generator Testing and Model Validation Program*), resultando em uma revisão geral dos modelos dinâmicos de unidades geradoras do WSCC (WSCC, 1997);

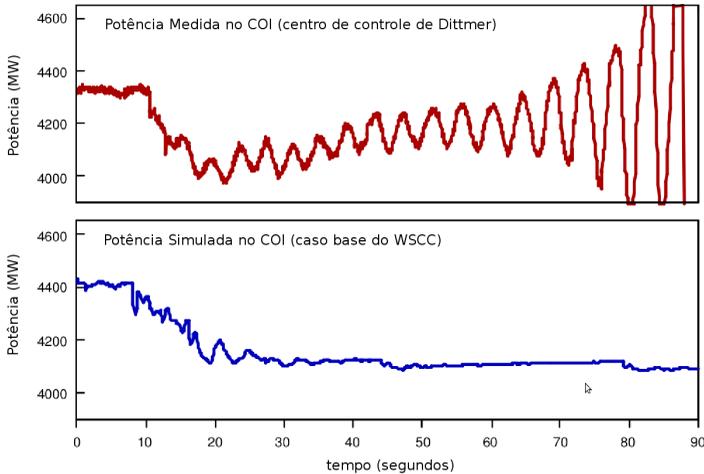


Figura 8 – Evento de 10 de Agosto de 1996 no WSCC (KOSTEREV; TAYLOR; MITTELSTADT, 1999).

- Melhoria da representação da capacidade reativa das unidades geradoras a partir de testes específicos para determinação de parâmetros de limitadores de sobre-excitação;
- Foi verificado que os modelos utilizados para representar reguladores de velocidade, para plantas de geração térmica, possuíam comportamento otimista com relação aos registros (KOSTEREV; TAYLOR; MITTELSTADT, 1999);
- Novos modelos para o link HVDC do Pacífico (*PDCI - Pacific Direct Current Intertie*) foram desenvolvidos, além de implementadas modificações no sistema de controle do link para melhoria do desempenho dinâmico (KOSTEREV; TAYLOR; MITTELSTADT, 1999);
- Foi reconhecida a necessidade de se considerar os efeitos do Controle Automático de Geração (AGC - *Automatic Generation Control*) em estudos de médio prazo (WSCC, 1997);
- Verificou-se a necessidade de representar a componente dinâmica de cargas.

### 2.3.1.2 Agosto de 2000 - Oscilações pouco amortecidas no COI

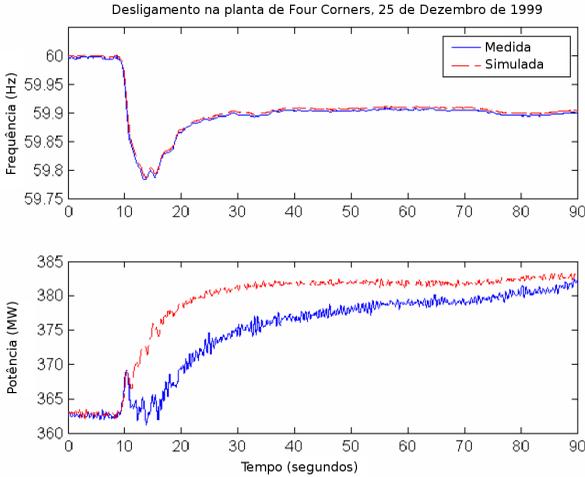
Oscilações pouco amortecidas foram observadas na interligação Califórnia-Oregon em 4 de agosto de 2000. O evento motivou a avaliação dos modelos dinâmicos utilizados, sendo que diversas alterações nos parâmetros dos modelos foram necessárias para replicar o evento via simulação. Devido à natureza do evento, as maiores contribuições foram relativas aos parâmetros de estabilizadores de sistemas de potência (PSS) (HAUER; BESHIR; MITTELSTADT, 2000). O estudo ainda sinalizou a necessidade de revisão dos modelos de carga derivados da análise das perturbações de 1996, resultando na criação de uma força tarefa para melhoria desses modelos (*Load Modeling Task Force - WECC*) (KOSTEREV; DAVIES, 2010).

### 2.3.1.3 2001 - Registros de sub-frequência na Interconexão Oeste

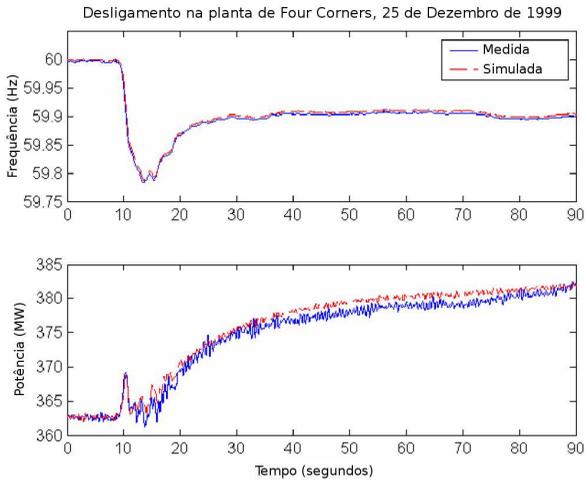
Divergências entre simulações e respostas reais de reguladores de velocidade preocuparam os agentes com relação à segurança de limites operativos de corredores de transmissão. Diversos testes sistêmicos foram conduzidos em maio de 2001, com o objetivo de melhorar a resposta da frequência dos modelos de simulação. O Controle Automático de Geração foi desabilitado em toda interconexão oeste durante os ensaios para que respostas puras dos reguladores de velocidade fossem registradas.

Dados históricos de sistemas SCADA e SPMS foram utilizados no processo de validação, o qual resultou em um grande impacto na capacidade de transferência dos principais corredores de transmissão do COI, além de levar ao desenvolvimento de novos modelos de reguladores de velocidade (KOSTEREV; DAVIES, 2010; PEREIRA et al., 2003).

A Figura 9 apresenta resultados de estudos de validação de modelos de reguladores de velocidade da planta *The Dalles*. Como resultado, foi desenvolvido um modelo para turbina Kaplan incluindo a resposta do controle das pás das turbinas. A técnica de simulação dinâmica híbrida foi utilizada com base em registros de PMUs instaladas em pontos de interconexão das unidades de geração (KOSTEREV, 2004).



(a) Registro/simulações antes da modificação dos modelos



(b) Registro/simulações após a modificação dos modelos

Figura 9 – Resultados antes e após a validação de modelos de reguladores de velocidade para turbinas Kaplan (KOSTEREV, 2004).

#### 2.3.1.4 Agosto de 2003 - Blecaute no Nordeste dos EUA e Canadá

Em 14 de agosto de 2003 verificou-se a ocorrência de um grande blecaute afetando 50 milhões de pessoas e cerca de 61.800 MW de carga no nor-

deste dos EUA e Ontário (Canadá). A reconstrução do evento utilizando simulações mostrou que os modelos utilizados até então subestimavam o comportamento da potência reativa das cargas (NERC, 2010a).

### 2.3.1.5 Março de 2004 - Perturbações artificiais na China

Nos dias 25 e 29 de março de 2004 foram aplicados curto-circuitos trifásicos propositais no sistema de transmissão de 500 kV do sistema elétrico da empresa *Northeast China Power Grid* para subsidiar estudos de validação de modelos de cargas. Sistemas SCADA/EMS foram utilizados para obter a estrutura topológica e dados de regime permanente, enquanto PMUs foram usadas para capturar registros dinâmicos (fasores de tensão e corrente) em barras específicas do sistema (YANHUI; RENMU; DONG, 2008).

### 2.3.1.6 Junho de 2004 - Corte de geração em Palo Verde

Um grande corte de geração foi observado no dia 14 de junho de 2004, resultado de diversas falhas em relés de proteção, o que provocou *trip* de três unidades da usina nuclear de Palo Verde nos EUA. Estudos de validação de modelos foram conduzidos no sentido de reproduzir o evento via simulação. Resultados satisfatórios foram obtidos com relação ao desempenho da frequência do sistema. Entretanto, a resposta de potência reativa nas unidades geradoras de Palo Verde apresentou discrepâncias quando comparada aos valores medidos.

As divergências foram atribuídas a problemas nos parâmetros do modelo de saturação e limitadores de sobre-excitação das máquinas síncronas, os quais passaram por ajustes para obtenção de valores de MVar próximos aos reais (AGRAWAL; KOSTEREV, 2007).

### 2.3.1.7 Eventos de Recuperação de Tensão Retardada por Faltas - FIDVR

O fenômeno de FIDVR (*Fault-Induced Delayed Voltage Recovery*) remete à situações em que o sistema de transmissão mantém níveis de tensão reduzidos (70% a 85% dos valores pré-falta) por vários segundos após a eliminação da falta. O efeito está associado ao fenômeno de *stall* de cargas motoras e sistemas de condicionamento de ar residenciais.

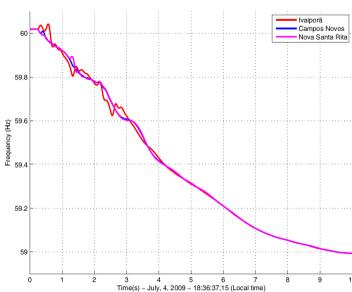
Diversas ocorrências de FIDVR foram registradas no sistema da Califórnia desde os anos 1980, todavia, modelos de motores trifásicos não são

capazes de reproduzir o fenômeno. Estudos de validação desses eventos sinalizaram a necessidade de desenvolvimento de modelos híbridos para este tipo de carga, possibilitando melhorias nos estudos de estabilidade de tensão (POURBEIK; AGRAWAL, 2008).

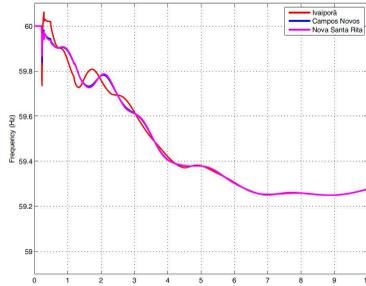
### 2.3.1.8 Julho de 2009 - Validação Sistêmica do Sistema Interligado Nacional (Brasil)

Em Decker et al. (2010) são apresentados resultados de estudos de validação sistêmica de modelos do Sistema Interligado Nacional brasileiro (SIN) com base em dados obtidos dos protótipos de sistemas de medição fasorial desenvolvidos no âmbito do projeto MedFasee citado previamente. O estudo utilizou registros de uma perturbação no sistema de transmissão de 765 kV em 4 de julho de 2009, responsável por um corte de geração de 2300 MW em Itaipu e 576 MW na usina de Tucuruí em função da atuação da lógica 14 do Esquema Controle de Emergência (ECE) do tronco de 765 kV (PESENTE, 2009).

A aderência dos modelos às medições foi analisada com enfoque qualitativo, por meio de comparação visual das características das curvas; e quantitativo, analisando-se indicadores sistêmicos dos modos de oscilação inter-área (frequência e amortecimento). Os gráficos da Figura 10 ilustram resultados das simulações e medições da perturbação observadas em três unidades de medição fasorial do protótipo MedFasee, revelando boa aderência entre simulações e medições.



(a) Medições da excursão de frequência.



(b) Simulação da excursão de frequência.

Figura 10 – Validação sistêmica do Sistema Interligado Nacional Brasileiro (DECKER et al., 2010).

### 2.3.2 Modelos Estáticos vs. Modelos Dinâmicos

Os modelos utilizados em simulações de sistemas de potência podem ser classificados de acordo com a representação utilizada na formulação matemática do problema de simulação. Modelos estáticos são representados por equações algébricas, por exemplo, linhas de transmissão, transformadores e cargas representadas por modelos ZIP (combinação de impedância constante, corrente constante e potência constante) (NERC, 2010a).

Modelos dinâmicos, por sua vez, utilizam equações diferenciais para representar a evolução de seu estado no tempo. Se enquadram nessa categoria, equipamentos como unidades geradoras e seus sistemas de controle (reguladores de tensão, reguladores de velocidade e estabilizadores de sistemas de potência), além de controladores associados à dispositivos FACTS e modelos para representação de cargas especiais.

Para o caso específico de linhas de transmissão, softwares de simulação dinâmica para estabilidade utilizam a representação do modelo  $\pi$ -equivalente. Em Benetti (2009) são destacados métodos diretos para determinação dos parâmetros desses modelos com base em grandezas fasoriais sincronizadas de tensão e corrente obtidas nos terminais de linhas de transmissão.

Além de serem utilizados em simulações dinâmicas, os modelos  $\pi$ -equivalente são usados também em outros aplicativos de análise de redes, por exemplo: fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, estimadores estáticos de estado e ferramentas de localização de faltas.

Considerando a existência de um elevado número de PMUs instaladas, dados fasoriais em condições de regime permanente aliados a informações topológicas do sistema obtidas de sistemas SCADA podem ser utilizados para verificação de modelos estáticos da rede por meio da comparação de tensões nodais e fluxos de potência em linhas de transmissão (ALLEN; KOSTEREV; POURBEIK, 2010).

Apesar dos erros introduzidos pela cadeia de medição (transformadores de instrumentação - TCs e TPs), a validação de modelos estáticos pode ser encarada como um processo simples, já que parâmetros podem ser derivados de maneira direta, inclusive em tempo real. No caso de modelos dinâmicos, no entanto, a metodologia de validação remete a uma abordagem bem mais complexa.

Para garantir a qualidade de modelos dinâmicos, é necessário realizar comparações entre registros reais de eventos e resultados de simulações computacionais. As taxas de amostragem utilizadas nos Sistemas de Medição Fasorial, além do sincronismo de tempo entre equipamentos de medição, permitem que esse tipo de comparação seja viabilizada, ao passo que os tradicionais sistemas SCADA não são capazes de capturar fenômenos dinâmicos.

Enquanto diversas metodologias tradicionais de validação e identificação de parâmetros utilizam perturbações provocadas artificialmente nos sistemas de potência em testes e ensaios padronizados (ZHAO et al., 1995) (CHEN et al., 1998) (TALEBI et al., 2007), o uso de SPMS permite que perturbações naturais (chaveamento de linhas de transmissão, fenômenos de rejeição de carga e curto-circuitos) sejam utilizadas como casos de *benchmark* para estudos de validação (HUANG; XU, 2004).

O desenvolvimento de ferramentas de apoio à validação de modelos dinâmicos, no entanto, encontra-se ainda em estado bastante incipiente. Análises de perturbações para validação de modelos são tratadas pelos agentes do setor como estudos específicos, exigindo grande experiência dos profissionais da área e constituindo um trabalho consideravelmente oneroso. Nesse contexto, ferramentas de apoio são necessárias para facilitar a análise de divergências entre medições e simulações e guiar o ajuste de parâmetros descalibrados (NERC, 2010a).

Como desenvolvimento pioneiro pode ser citada a ferramenta PPPD (*Power Plant Parameter Derivation*) desenvolvida pelo EPRI. O software, implementado sob a plataforma Matlab<sup>®</sup>, serve de apoio na obtenção de parâmetros de unidades geradoras e sistemas de controle a partir de testes e/ou dados de perturbações naturais do sistema (POURBEIK, 2010).

### 2.3.3 Validação Sistêmica vs. Validação de Componentes

Com relação à abrangência dos modelos avaliados, o processo de validação pode ser sistêmico (*System-Wide Model Validation*) ou com foco em componentes específicos de um subsistema. No primeiro caso, são realizadas simulações considerando o sistema completo, comparando-se resultados com registros de medições em pontos selecionados do sistema (HUANG; YANG; KOSTEREV, 2009). Como exemplos desse tipo de estudo podem ser citados os casos de validação do evento de 10 de Agosto de 1996 (KOSTEREV; TAYLOR; MITTELSTADT, 1999) e do evento de 14 de junho de 2004, ambos no sistema norte-americano WECC (AGRAWAL; KOSTEREV, 2007).

De fato, por incluir uma grande quantidade de equipamentos e modelos distintos, esse tipo de abordagem envolve um trabalho considerável para o *setup* dos casos de simulação. A construção de casos base de fluxo de potência para representar as condições pré-falta do sistema é requisito para qualquer estudo de validação sistêmica (NERC, 2010a). Entretanto, a literatura revela que o tempo despendido para o desenvolvimento desses cenários para sistemas de grande porte é consideravelmente elevado. A título de exemplo, um ano de trabalho foi necessário para o desenvolvimento do caso base

do evento de junho de 2004 (AGRAWAL; KOSTEREV, 2007).

Informações como a topologia da rede, despacho de unidades geradoras, demanda das cargas e modo de controle de unidades geradoras são de grande importância na construção do cenário pré-falta. Dispositivos manobráveis como reatores e capacitores influenciam consideravelmente o desempenho dos sistemas de potência, porém, o status desses elementos em condições pré-falta nem sempre são disponíveis (DECKER et al., 2010).

O levantamento sequencial dos eventos ocorridos durante grandes perturbações (faltas envolvidas e atuações dos sistemas de proteção) também remete a um processo laborioso, visto que devem ser consideradas informações de diversos dispositivos de registro (listas de alarmes, sequenciadores de eventos, registradores de perturbações), que, muitas vezes, não dispõem de mecanismos de sincronização de tempo (HUANG; YANG; KOSTEREV, 2009).

Além disso, a existência de um número elevado de modelos a serem analisados requer grande experiência no sentido de identificar os modelos problemáticos quando são observadas discrepâncias entre simulações e medições (HUANG et al., 2006).

É importante salientar que, apesar das dificuldades envolvidas no processo de validação sistêmica, esse tipo de estudo permite obter informações globais, tais como frequência e taxa de amortecimento de modos de oscilação inter-área. Além disso, em se tratando de análises de desempenho sistêmico, semelhanças qualitativas são, na maioria das vezes, mais importantes que diferenças numéricas entre curvas simuladas e medidas (DECKER et al., 2010). Questões que podem ser utilizadas para avaliação qualitativa da confiabilidade de modelos sistêmicos são:

- O modelo prevê corretamente condições de estabilidade ou instabilidade do sistema?
- O modelo prevê o comportamento da resposta do sistema, como a existência de oscilações, oscilações pouco amortecidas e oscilações fortemente amortecidas?
- O modelo prevê excursões máximas e mínimas de variáveis em intervalos de tempo comparáveis aos registros de medições reais?

A validação de modelos dinâmicos de componentes (ou subsistemas), por sua vez, tem por objetivo minimizar os problemas inerentes à validação de sistemas de grande porte. Essa abordagem faz uso do conceito de simulação dinâmica híbrida (HUANG; XU, 2004) para isolar componentes de sistemas externos, cuja modelagem não é levada em conta na simulação. A técnica consiste na injeção de grandezas elétricas medidas em barras de fronteira no

processo de simulação dinâmica, possibilitando o *playback* de perturbações reais do sistema.

A Figura 11 ilustra um subsistema (unidade geradora e barra terminal) submetido ao processo de simulação híbrida. Sinais terminais são injetados no modelo (*playback* de medições) e, com base nos resultados das simulações, é possível avaliar a qualidade dos modelos. Por meio da comparação entre respostas simuladas e registros fasoriais, viabiliza-se então o ajuste de parâmetros problemáticos.

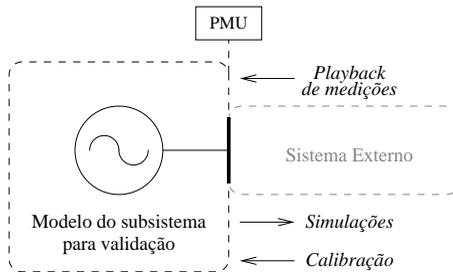


Figura 11 – Validação de componentes/subsistemas.

É importante ressaltar que as duas abordagens (validação sistêmica e validação de componentes) são complementares e necessárias para a manutenção de modelos de sistemas de potência. A validação de componentes, por meio de simulação híbrida, permite uma análise isolada e detalhada de elementos específicos dos sistemas elétricos, como unidades geradoras, cargas e dispositivos FACTS. Já os métodos de validação sistêmica, permitem avaliar de maneira geral a aderência do modelo completo ao comportamento real do sistema (ALLEN; KOSTEREV; POURBEIK, 2010).

### 2.3.4 Política de Validação de Modelos de Unidades Geradoras do WSCC

Após os eventos no verão de 1996, o WSCC publicou um guia para testes e validação de modelos de máquinas síncronas (*Test Guidelines for Synchronous Dynamic Testing and Model Validation*) solicitando que todas as unidades geradoras com potência instalada maior que 10 MW fossem testadas a cada 5 anos a fim de confirmar parâmetros utilizados em modelos de simulação dinâmica (WSCC, 1997).

Além de uma melhora significativa nos dados, principalmente relacionados a modelos de sistemas de excitação e estabilizadores de potência, o programa de testes proporcionou uma grande oportunidade para levantar o

estado de componentes e equipamentos de controle em plantas de geração. Os ensaios realizados ainda permitiram o ajuste de controladores em diversas unidades geradoras, resultando em melhorias no desempenho geral do sistema (PEREIRA et al., 2009).

Verificou-se, todavia, que mesmo após a realização de testes em inúmeras unidades geradoras, os dados obtidos ainda eram insuficientes para a representação correta de eventos específicos, principalmente aqueles relacionados a desvios de frequência associados a respostas de reguladores de velocidade modelados inadequadamente (PEREIRA et al., 2009). No sentido de mitigar os problemas supracitados, grandes esforços foram iniciados em 2001 para a melhoria dos modelos de reguladores de velocidade utilizados até então.

Nessa mesma época, foi lançada a versão 14 do pacote de softwares análise de sistemas de potência da GE (PSLF/PSDS), na qual foi apresentada uma ferramenta para *playback* de sinais de tensão e frequência aplicando o conceito de Simulação Dinâmica Híbrida. A nova funcionalidade apresentou bons resultados e foi adotada pela BPA para verificar modelos dinâmicos utilizando dados de perturbações obtidos em várias plantas de geração. Atualmente, a BPA possui cerca de 24.000 MW de geração equipados com sistema de monitoramento dinâmico para fins de validação de modelos (PEREIRA et al., 2009).

Em 2006, com a publicação da “Política de Validação de Modelos de Unidades Geradoras” pela WECC, a metodologia de validação utilizando ferramentas de *playback* de eventos (Simulação Híbrida) foi adotada como um dos métodos aceitáveis. Essa mesma abordagem está sendo considerada válida em padrões de validação de modelos do NERC (WSCC, 2009). Devido a boa aceitação e às potenciais aplicações da técnica, atualmente diversos outros programas de simulação dinâmica também oferecem a funcionalidade de *playback* de eventos.

A experiência da WECC mostrou a importância de se fazer um trabalho contínuo de validação de modelos, contudo, reconheceu que a realização de ensaios periódicos se faz necessária apenas em casos de modificações em equipamentos ou nova parametrização de controladores. O objetivo principal defendido na nova política de validação de modelos de unidades geradoras (2006) é ter modelos que representem razoavelmente o comportamento de plantas de geração frente à perturbações no sistema elétrico (PEREIRA et al., 2009).

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram discutidos os principais assuntos que formam a base para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente apresentou-se, de maneira genérica, o problema de simulação dinâmica de sistemas de potência. Foram destacados aspectos da formulação matemática, as principais aplicações da ferramenta, bem como uma discussão inicial a respeito do conceito de simulação dinâmica híbrida.

Na sequência, foram introduzidos os sistemas de medição fasorial sincronizada, abordando seus elementos constituintes, evidenciando as potenciais aplicações e apresentando um breve histórico do desenvolvimento da tecnologia.

Por fim, foi abordado o problema de validação de modelos dinâmicos, expondo a importância da manutenção de modelos confiáveis na operação e planejamento de sistemas de potência. Foram elencados diversos eventos, principalmente no sistema norte-americano, utilizados como base para estudos de validação e ajuste de modelos dinâmicos. Além disso, destacou-se a importância da realização de estudos periódicos de validação sistêmica e de componentes para garantir a qualidade de modelos de simulação.

### 3 SIMULAÇÃO DINÂMICA HÍBRIDA

Neste capítulo são abordadas a formulação matemática e a implementação computacional da técnica de Simulação Dinâmica Híbrida. Apresentam-se detalhes do desenvolvimento de um protótipo para estudo da ferramenta de simulação híbrida além de uma discussão a respeito da validação de modelos dinâmicos utilizando dados de sistemas de medição fasorial sincronizada.

#### 3.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Sistemas de potência podem ser representados, de maneira genérica, para fins de simulação dinâmica, pelo conjunto de equações algébricas e diferenciais definido em (3.1):

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{cases} \quad (3.1)$$

onde  $x^T = [x_1 \dots x_M]$  são variáveis de estado,  $y^T = [y_1 \dots y_N]$  são variáveis algébricas e  $f$  e  $g$  são vetores de funções com  $M$  e  $N$  variáveis, respectivamente.

Considerando que algumas variáveis sejam conhecidas previamente, ou seja, obtidas via sistemas de monitoramento, por exemplo,  $y_i = y^*(t)$ , a Equação 3.1 poderia ser reescrita como:

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x, y', y^*) \\ 0 &= g'(x, y', y^*) \end{cases} \quad (3.2)$$

sendo que  $y' = [y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, y_N]$ , e  $g'$  seja o novo conjunto de equações algébricas excluindo-se a equação relacionada à  $y_i$ , a qual não precisa ser resolvida pois trata-se de uma variável monitorada. Nota-se que  $g'$  passa então a ser solucionado com  $(N - 1)$  equações. Assim, a cada passo de integração, um novo valor de  $y^*$  é inserido em (3.2) a fim de contemplar as variações na barra monitorada (HUANG; GUTTROMSON; HAUER, 2004).

O pseudo-código apresentado abaixo resume os passos para execução da simulação híbrida (HUANG; GUTTROMSON; HAUER, 2004).

---

**Algoritmo 1** Simulação Dinâmica Híbrida
 

---

```

1:  $K = NumSteps$  {núm. de passos de integração total};
2:  $j = 0$ ;
3: while  $j \leq K$  do
4:   Calcular  $\dot{x} = f(x, y', y^*)$  para  $t = t_j$  com valores conhecidos de
      $x(j), y'(j), y^*(j)$ ;
5:    $x(j+1) \leftarrow x(j) + \dot{x}\Delta t$  {integração numérica};
6:    $y_j \leftarrow y^*(j+1)$  {inclusão de novo registro};
7:   Resolver  $0 = g'(x(j+1), y'(j+1), y^*(j+1))$  {determinação de  $y'(j+1)$ };
8:    $t_{j+1} \leftarrow t_j + \Delta t$ ;
9:    $x(j) \leftarrow x(j+1)$ ;
10:   $y'(j) \leftarrow y'(j+1)$ ;
11:   $y^*(j) \leftarrow y^*(j+1)$ ;
12:   $j = j + 1$ ;
13: end while

```

---

A mesma abordagem pode ser utilizada quando são inseridas medições de variáveis de estado no processo de simulação. Neste caso, o valor de  $x_i$  é feito igual à  $x^*(t)$  a cada novo instante de tempo de simulação, de modo que a equação diferencial associada à variável  $x_i$  possa ser eliminada de  $f$ . A cada novo passo de integração o valor de  $x^*$  é atualizado para que as outras variáveis algébricas e de estado sejam calculadas (HUANG; GUTTROMSON; HAUER, 2004).

A Figura 12 ilustra o fato de que medindo-se grandezas em todas as barras de fronteira de um subsistema, é possível realizar simulações do subsistema de interesse utilizando apenas informações internas, ou seja, o comportamento do sistema externo passa a ser representado tão somente pelas medidas nas barras de fronteira injetadas a cada passo de integração da simulação (HUANG; XU, 2004). O exemplo apresentado na sequência tem por objetivo abordar essa característica.

### Sistema Exemplo

O diagrama da Figura 13 representa dois subsistemas considerando a existência de uma PMU instalada na barra de fronteira (barra  $a$ ). As barras  $a1$  e  $a2$  são barras virtuais utilizadas para representar os supostos pontos de injeção da tensão medida pela PMU quando da execução da simulação híbrida.

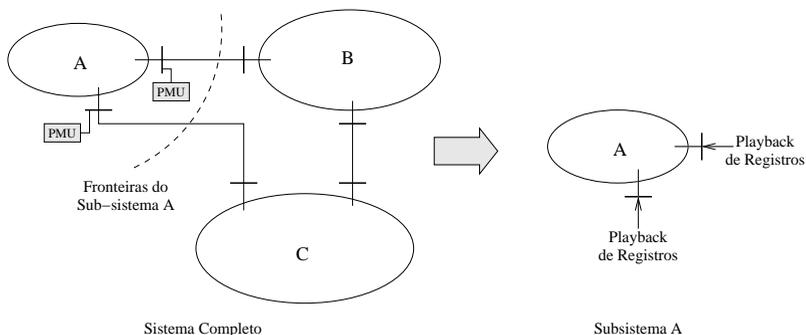


Figura 12 – Representação ilustrativa da simulação de subsistemas (HUANG; XU, 2004).

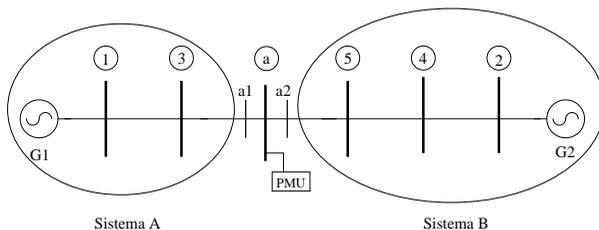


Figura 13 – Representação ilustrativa da simulação híbrida - exemplo.

A estrutura da matriz  $Y_{bus}$  e dos vetores de tensões e correntes, considerando o sistema completo (subsistemas A e B), é definida por:

$$\begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} & \textcircled{a1} & \textcircled{a2} \\ \textcircled{1} & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \textcircled{2} & 0 & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ \textcircled{3} & X & 0 & X & 0 & 0 & X & 0 \\ \textcircled{4} & 0 & X & 0 & X & X & 0 & 0 \\ \textcircled{5} & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & X \\ \textcircled{a1} & 0 & 0 & X & 0 & 0 & X & 0 \\ \textcircled{a2} & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{G1} \\ E_{G2} \\ V_{L3} \\ V_{L4} \\ V_{L5} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Nota-se no equacionamento, que a barra  $a$  foi substituída pelas duas barras virtuais ( $a1$  e  $a2$ ), as quais representam a injeção de registos no modelo de simulação. Reordenando-se as linhas e colunas da matriz  $Y_{bus}$  e os vetores de tensões e correntes, verifica-se que o equacionamento do Sistema A é independente do equacionamento do Sistema B.

Em outras palavras, este artifício possibilita simular separadamente os dois sistemas utilizando o conceito de simulação híbrida por meio da injeção das tensões nas barras  $a1$  e/ou  $a2$ .

$$\begin{bmatrix} I_{G1} \\ 0 \\ I_{a1} \\ I_{G2} \\ 0 \\ 0 \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \textcircled{1} & \textcircled{3} & \textcircled{a1} & \textcircled{2} & \textcircled{4} & \textcircled{5} & \textcircled{a2} \\ \textcircled{1} & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \textcircled{3} & X & X & X & 0 & 0 & 0 \\ \textcircled{a1} & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 \\ \textcircled{2} & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 \\ \textcircled{4} & 0 & 0 & 0 & X & X & X \\ \textcircled{5} & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X \\ \textcircled{a2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{G1} \\ V_{L3} \\ V_{a1} \\ E_{G2} \\ V_{L4} \\ V_{L5} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

A Figura 14 ilustra os dois subsistemas de maneira isolada em função da injeção dos registros de medições nas barras  $a1$  (subsistema A) e  $a2$  (subsistema B).

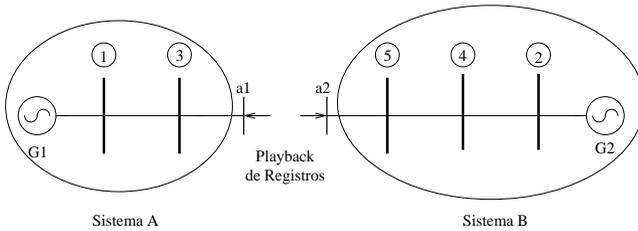


Figura 14 – Simulação híbrida - subsistemas isolados.

### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesta seção discutem-se métodos para implementação do conceito de simulação híbrida utilizando aplicativos de simulação dinâmica. Inicialmente, são apresentadas formas indiretas de implementação da técnica com base em softwares comerciais de simulação e, posteriormente, são discutidos detalhes da implementação do protótipo desenvolvido no decorrer do trabalho (método direto).

#### 3.2.1 Métodos Indiretos

Os métodos denominados indiretos utilizam componentes externos, como geradores, transformadores e cargas, para forçar o comportamento da tensão em uma determinada barra de acordo com valores medidos. Essa abor-

dagem é possível, visto que a maioria dos programas de simulação disponíveis comercialmente possuem mecanismos para implementação de modelos definidos pelo usuário.

O software PSLF/PSDS (*Positive Sequence Load Flow/Dynamic Simulation*) desenvolvido pela GE (*General Electric*), por exemplo, permite que usuários implementem seus próprios modelos por meio de *scripts* em linguagem EPCL (*Engineering Program Control Language*). Assim, modelos desenvolvidos por usuários são executados pelo simulador da mesma forma que modelos padrão (*built-in*) (HUANG; GUTTROMSON; HAUER, 2004).

Ferramentas similares podem ser encontradas em outros softwares de simulação, por exemplo:

- Linguagem BOSL (*Block-Oriented Simulation Language*), utilizada para implementação de modelos de usuários para o aplicativo PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*) desenvolvido pela Siemens;
- Linguagem DSL (*DigSILENT Simulation Language*), usada para implementação de modelos de usuários para o aplicativo DigSILENT desenvolvido pela GmbH;
- Ferramenta UDM (*User-Defined Model Editor*), utilizada para definição de modelos específicos para o aplicativo DSA PowerTool TSAT (*Transient Security Assessment Tool*) desenvolvido pelo PowerTech Labs.

As ferramentas descritas acima permitem que códigos C, FORTRAN ou *scripts* derivados dessas linguagens, sejam incluídos no processo de implementação de modelos definidos pelo usuário, possibilitando assim o uso de funções para leitura de arquivos e injeção de medições no processo de simulação. Na sequência são discutidos métodos indiretos, apresentados na literatura, para implementação da técnica de simulação híbrida utilizando softwares comerciais de simulação dinâmica.

### 3.2.1.1 Método do Transformador Defasador

No método do transformador defasador injeta-se no processo de simulação valores de módulo e ângulo da tensão terminal da barra de fronteira. O método utiliza um gerador com inércia de valor elevado conectado à um transformador defasador, ambos com impedâncias de valores reduzidos (mínimos). O gerador é representado pelo modelo clássico e, em função de sua elevada inércia, fornece tensão constante de referência, ou seja,  $1\angle 0^\circ$  (HUANG; XU, 2004).

O módulo e ângulo da tensão na barra de fronteira do subsistema ( $V\angle\theta$ ) são então alterados, a cada passo de integração, por meio de ajustes na relação  $n\angle\alpha$  do transformador defasador para refletir valores conhecidos obtidos de registros fasoriais. A Figura 15 ilustra a metodologia.

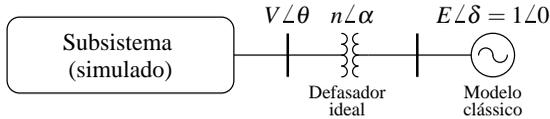


Figura 15 – Método do Transformador Defasador (HUANG et al., 2006).

Para cada intervalo de integração, novos valores da relação de transformação são calculados por:

$$n = \frac{V}{E} = V \quad (3.5)$$

$$\alpha = \theta - \delta = \theta \quad (3.6)$$

É importante ressaltar que as alterações na relação de transformação do defasador ideal implicam na modificação de um elemento diagonal e dois elementos fora da diagonal principal da matriz de admitâncias nodais do subsistema. Dessa forma, a cada novo registro injetado na simulação torna-se necessária a refatoração da matriz. É válido comentar, no entanto, que, em se tratando de sistemas reduzidos (subsistemas), o processo de refatoração da matriz de admitâncias nodais não deve introduzir custo computacional significativo ao processo de simulação.

### 3.2.1.2 Método do Gerador de Resposta Rápida

O método do gerador de resposta rápida, por sua vez, injeta o módulo e a frequência da tensão na barra de fronteira. Para implementação utiliza-se um gerador de elevada inércia e impedância mínima, juntamente com reguladores de tensão (EXC) e velocidade (GOV) de resposta rápida (constantes de tempo de valor mínimo). A Figura 16 apresenta um diagrama esquemático do método.

O módulo da tensão medida ( $V^*$ ) é usado como referência para o regulador de tensão enquanto a frequência do sinal ( $f^*$ ) é injetada como referência para o regulador de velocidade. Dessa forma, a cada passo de integração novos valores de referência são inseridos no processo de simulação de acordo com os registros. Em função da elevada inércia do gerador e da resposta

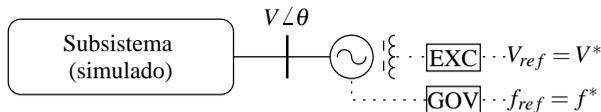


Figura 16 – Método do Gerador de Resposta Rápida (HUANG et al., 2006).

praticamente instantânea dos controladores, a tensão terminal da máquina é forçada a seguir os valores de referência (KOSTEREV, 2004).

Neste caso, como o ajuste da tensão da barra terminal é feito via referência dos reguladores de tensão e de velocidade do gerador fictício, não são necessárias modificações na matriz  $Y_{bus}$  do sistema durante o processo de simulação.

### 3.2.1.3 Método da Impedância Variável

Por fim, o método da impedância variável modela o comportamento da barra de fronteira do subsistema por meio de uma impedância equivalente calculada a cada passo de integração (Equação 3.7).

$$Z(k) = \frac{V(k)^2}{P(k) + jQ(k)} \quad (3.7)$$

O procedimento obtém para cada passo de integração  $k$ , um valor de impedância em função de medidas de tensão  $V(k)$ , potência ativa  $P(k)$  e potência reativa  $Q(k)$ . A Figura 17 apresenta um diagrama do sistema equivalente.

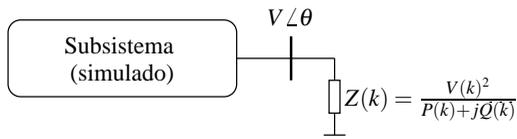


Figura 17 – Método da Impedância Variável (MA et al., 2008).

No método da impedância variável, novamente o ajuste das condições de fronteira (tensão complexa) depende de modificações na matriz de admitâncias nodais do sistema reduzido, neste caso, apenas de um elemento da diagonal principal (para inclusão da impedância  $Z(k)$ ). Entretanto, como já havia sido comentado, em função das dimensões reduzidas das matrizes uti-

lizas na simulação híbrida, em geral, o desempenho computacional não fica comprometido.

Uma desvantagem desse método está no fato de que são necessários registros (fasores) de tensão e corrente para reprodução das condições de fronteira no decorrer da simulação (cálculo das grandezas  $P(k)$  e  $Q(k)$ ). Já os outros dois métodos supracitados utilizam apenas fasores de tensão como fonte de dados.

### 3.2.2 Método Direto

No Sistema Interligado Nacional brasileiro (SIN), os modelos utilizados para simulação dinâmica são mantidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), responsável pelo desenvolvimento e atualização de modelos e dados da rede elétrica, geradores, controladores, cargas e equipamentos FACTS (DECKER et al., 2010). O software utilizado pelo ONS e indústrias do setor elétrico para simulação dinâmica é o ANATEM (Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos), desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) (CEPEL, 2006).

Apesar de contar com um mecanismo versátil para definição de modelos de usuários (CDU - Controladores Definidos pelo Usuário), a ferramenta não conta com funções para a leitura de arquivos e inclusão de dados externos no processo de solução das equações algébricas e diferenciais, inviabilizando a implementação da técnica de simulação dinâmica híbrida de maneira indireta.

Dessa forma, para o desenvolvimento de um protótipo para estudo e validação dos conceitos de simulação híbrida, foi utilizado como base o aplicativo SIMSP. O SIMSP é um simulador dinâmico desenvolvido em C++ que utiliza conceitos de modelagem orientada a objetos para representação de sistemas elétricos de potência (MANZONI, 1996). A base computacional sob a qual o aplicativo foi construído prevê a acomodação não somente de elementos físicos que formam o sistema, como também de metodologias de análise aplicadas a SEE (AGOSTINI, 2002).

Do ponto de vista de engenharia de software, o pacote computacional utiliza o padrão de projeto *Adapter* (GAMMA; HELM; JOHNSON, 2000) para relacionar elementos físicos que representam a estrutura de conexão do sistema elétrico (barras, linhas de transmissão, máquinas síncronas) e funcionalidades atribuídas a cada elemento físico dependendo do aplicativo instanciado (fluxo de potência, simulação dinâmica, análise de contingências).

Assim, é possível isolar características físicas dos componentes, válidas em qualquer aplicação, de características comportamentais dos elemen-

tos, implementadas em classes paralelas às classes que representam elementos físicos, denominadas *Interfaces Funcionais* (AGOSTINI, 2002).

A vantagem associada à utilização do aplicativo SIMSP reside no fato de que todo o código-fonte encontra-se disponível, permitindo-se o acesso direto ao esquema de solução das equações diferenciais e algébricas via programação.

Por outro lado, o programa conta com poucos modelos de controladores implementados, não podendo ser aplicado, portanto, à estudos de sistemas de grande porte como o SIN. Além disso, a implementação de novos modelos requer a transformação das equações diferenciais em equações algébricas a diferenças por meio da aplicação de métodos de integração numérica (processo de algebrização). Assim, dependendo da complexidade dos modelos, são necessários esforços computacionais significativos.

A seguir são discutidos, inicialmente, a estrutura e funcionamento do aplicativo SIMSP. Posteriormente, são apresentadas as modificações realizadas no código-fonte do programa, a fim de se implementar a técnica de simulação dinâmica híbrida, além dos resultados de testes para validação do protótipo desenvolvido.

### 3.2.2.1 Simulação Convencional no SIMSP

O processo de simulação dinâmica realizado pelo aplicativo SIMSP pode ser descrito da seguinte forma: a princípio, é necessário que seja definido o ponto de operação do sistema por meio da execução do fluxo de potência (*load flow*). O objetivo é obter o estado global do sistema, ou seja, tensões complexas em todas as barras da rede. O passo seguinte consiste em calcular as condições iniciais dos modelos dinâmicos das unidades geradoras.

Na sequência, o simulador realiza o processo de solução das equações diferenciais e algébricas de maneira alternada para cada passo de integração. As equações diferenciais dos modelos dinâmicos (máquina síncrona e regulador de tensão), convertidas em equações algébricas a diferença, são integradas numericamente e os resultados são repassados ao sistema de equações não-lineares da rede elétrica na forma de injeções de corrente.

As equações do sistema de transmissão ( $I = Y_{bus}E$ ), por sua vez, são resolvidas de maneira iterativa, envolvendo a solução das equações dinâmicas, por conta das relações não-lineares entre o vetor de injeção de corrente e o vetor de tensões complexas da rede. Assim que o processo atinge convergência, novos valores complexos de tensão são obtidos para cada barra do sistema e o passo de integração pode ser incrementado.

O diagrama da Figura 18 apresenta um fluxograma com detalhes do processo de simulação convencional no SIMSP.

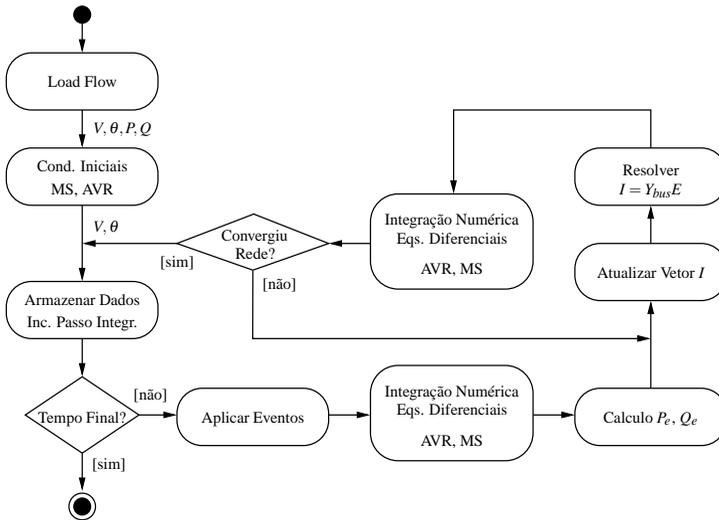


Figura 18 – Fluxograma da simulação convencional no SIMSP.

Vale ressaltar que, nos estudos realizados neste trabalho, não foram consideradas estabilizadores de potência (PSS - *Power System Stabilizers*) e reguladores de velocidade (GOV - *Governors*) nas simulações, com o objetivo de isolar e simplificar as análises de sensibilidade e influência dos parâmetros da máquina síncrona, nas respostas de potência ativa e reativa das unidades geradoras.

### 3.2.2.2 Simulação Híbrida no SIMSP

Como o objetivo do estudo contempla a validação de modelos de unidades geradoras apenas, o protótipo implementado considera subsistemas limitados à uma barra (barra terminal) conectada a uma unidade geradora. Ou seja, as equações do sistema de transmissão não precisam ser resolvidas durante a simulação, visto que a rede elétrica do subsistema a ser simulado foi reduzida a uma barra, a qual tem seu valor de tensão forçado a seguir registros de medições. Assim, para a viabilização da simulação híbrida foram realizadas as seguintes modificações no código-fonte do programa:

- Remoção do *loop* de convergência para equações de rede, já que os

valores de tensão são conhecidos de antemão para a barra terminal da unidade geradora;

- Inclusão de procedimento para leitura dos registros de tensão a serem injetados no processo de simulação ( $V$  e  $\theta$ );
- Implementação do esquema de *playback* da tensão complexa na barra conectada à unidade geradora.

O fluxograma apresentado na Figura 19 destaca as etapas do processo de simulação híbrida em contraste com o esquema de simulação convencional (Figura 18).

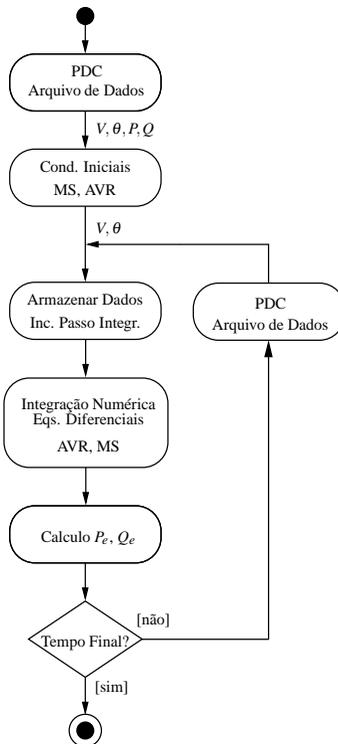
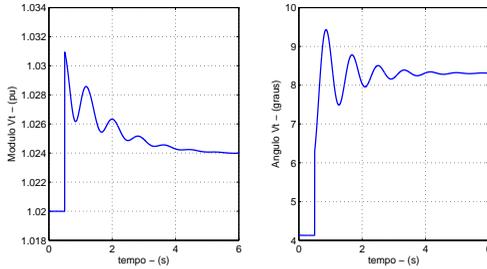


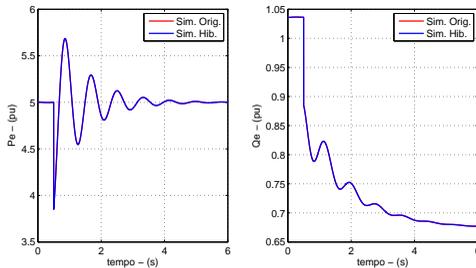
Figura 19 – Fluxograma da simulação híbrida no SIMSP.

Com objetivo de validar os conceitos de simulação híbrida e o protótipo implementado, foram usados dados obtidos a partir de uma simulação convencional (sistema máquina-barra infinita) como entrada para o processo de simulação híbrida. A Figura 20a apresenta as curvas de módulo e ângulo

da tensão terminal do gerador (injetadas no processo de simulação híbrida), enquanto a Figura 20b ilustra as curvas de potência resultantes do processo de simulação híbrida sobrepostas às curvas obtidas originalmente via simulação convencional. É possível observar que a simulação híbrida reproduz com fidelidade o comportamento da unidade geradora durante a perturbação.



(a) Módulo e ângulo de tensão



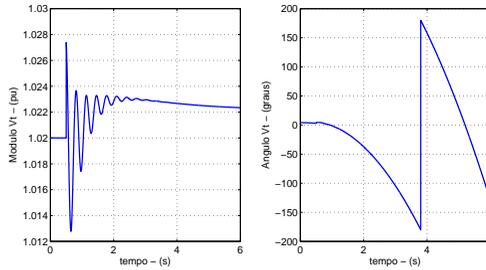
(b) Potência ativa e reativa

Figura 20 – Simulação convencional vs. híbrida

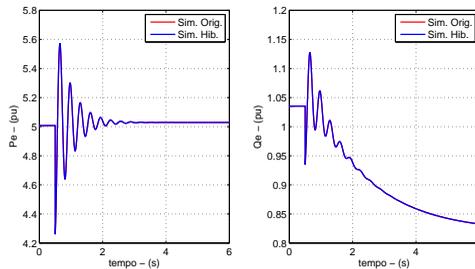
Em um segundo cenário, utilizando simulação convencional foram gerados registros de módulo e ângulo para condições de frequência fora da nominal (sistema de duas máquinas). Neste caso, o ângulo do fasor tensão varia no tempo a uma taxa que depende do desvio da frequência, já que a referência angular na simulação remete ao ângulo do fasor tensão da barra de folga do sistema no instante inicial da simulação.

As curvas apresentadas na Figura 21 demonstram que as curvas de potência ativa e reativa obtidas na simulação convencional e simulação híbrida são coincidentes, mesmo para simulações fora da frequência nominal.

Fazendo uma analogia com os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, a referência angular da simulação dinâmica é equivalente à referência angular fornecida pelo sistema GPS nos SPMS. Ambas definem uma referên-



(a) Módulo e ângulo de tensão



(b) Potência ativa e reativa

Figura 21 – Simulação convencional vs. híbrida - frequência fora da nominal

cia (ângulo  $0^\circ$ ) síncrona a partir da qual os ângulos das tensões das barras do sistema podem ser medidos.

A Figura 22 apresenta uma visão de entradas e saídas do processo de simulação híbrida de uma unidade geradora. A unidade tem como entradas quatro sinais, quais sejam: módulo e ângulo da tensão complexa, tensão de referência do regulador de tensão e potência mecânica de referência para o regulador de velocidade<sup>1</sup>.

Da mesma forma são definidos quatro sinais de saída: potência ativa e reativa, velocidade angular e ângulo de carga da máquina.

Para efeito de validação de modelos, a simulação híbrida pode ser entendida da seguinte forma: são injetados  $V$  e  $\theta$  no subsistema a ser simulado (unidade geradora - máquina síncrona e controladores) monitorando-se valores de potência ativa e reativa resultantes da simulação.

<sup>1</sup>Como não foi modelado o regulador de velocidade, o sinal usado como entrada é a potência mecânica  $P_m$ , a qual é mantida constante durante o período de simulação, exceto em perturbações.

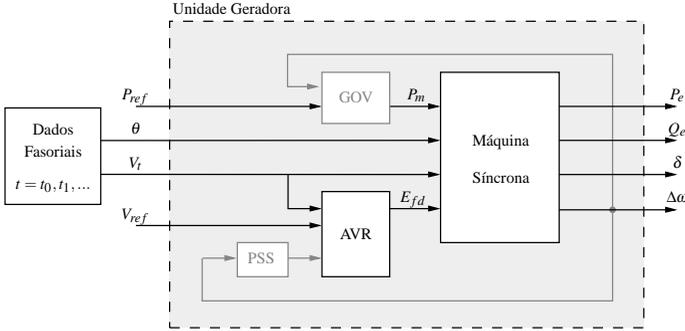


Figura 22 – Esquema ilustrativo da unidade geradora para algoritmo de simulação híbrida.

Os valores de  $P$  e  $Q$  simulados são então comparados aos valores de referência derivados de registros fasoriais de tensão e corrente obtidos por PMUs conectadas aos terminais da unidade geradora. Discrepâncias entre curvas simuladas e medidas refletem incoerências nos parâmetros dos modelos sob análise.

### 3.3 VALIDAÇÃO DE MODELOS USANDO SIMULAÇÃO HÍBRIDA

Como já foi citado previamente, a possibilidade da inclusão de registros de medições no processo de simulação dinâmica permite que resultados de simulações sejam comparáveis numericamente à registros reais, visto que o subsistema a ser simulado fica isolado de eventuais problemas de modelagem de sistemas externos.

Em sistemas de potência, geralmente quatro variáveis estão associadas ao estado de uma barra, quais sejam: módulo e ângulo da tensão ( $V$  e  $\theta$ ) e injeções de potência ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ). Tendo em mãos duas delas, as outras duas podem ser calculadas por simulação. No caso da simulação híbrida, a formulação apresentada considera o conhecimento prévio do módulo e ângulo da tensão de barra. Já os valores de potência ativa e reativa são resultados de simulação (HUANG et al., 2007).

Utilizando unidades de medição fasorial para monitoramento de fasores de tensão e corrente nos terminais de uma unidade geradora, é possível obter valores de tensão (módulo e ângulo) para injeção no processo de simulação híbrida, bem como calcular valores reais de potência ativa e reativa fornecidos pela máquina síncrona. Dessa forma, a comparação entre valores

de potência calculados via simulação e medidos por PMUs pode ser realizada em uma mesma base (mesmo tipo de perturbação e estímulos externos), viabilizando estudos de validação de modelos. A Figura 23 apresenta um fluxograma genérico do processo.

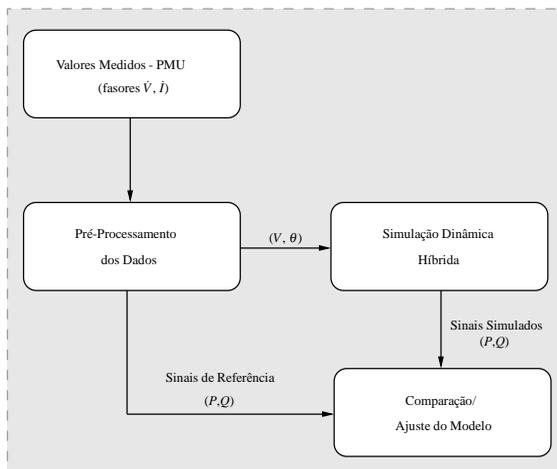


Figura 23 – Esquema de validação de modelos (HUANG; YANG; KOSTE-REV, 2009).

A etapa de pré-processamento contempla as seguintes atividades:

- Seleção de perturbações relevantes (excursões consideráveis das grandezas  $P$  e  $Q$ );
- Eventual reconstrução de sinais com problemas de perda de dados em função de falhas de comunicação;
- Ajuste dos intervalos de amostragem dos registros fasoriais para injeção dos dados no processo de simulação.

Unidades de Medição Fasorial que operam, por exemplo, a 60 fasores/s, fornecem registros em intervalos de aproximadamente 16,67 ms, enquanto simulações dinâmicas empregam passos de integração da ordem de 1 a 5 ms. Dessa forma, os registros devem passar por um processo de interpolação numérica para compatibilização dos intervalos de amostragem.

Outro ponto que merece destaque refere-se às condições iniciais das simulações. No caso de simulações convencionais, no início da simulação é calculado o ponto de operação de todo o sistema (*Load Flow*). Porém, no caso

da simulação híbrida, é necessário conhecer somente o ponto de operação da barra conectada à unidade geradora. Assim, as condições iniciais são obtidas usando-se os dados pré-falta obtidos pelo sistema de medição fasorial:  $\hat{V}$  e  $\hat{I}$  medidos na barra do gerador (HUANG; GUTTROMSON; HAUER, 2004).

Vale lembrar que os sinais de tensão injetados na simulação híbrida já contêm as informações dos eventos reais, de modo que não há necessidade de reconstrução da perturbação (sequenciamento de eventos). Essa característica implica em uma redução significativa de esforço no *setup* de casos base, já que, geralmente após uma perturbação ocorre a atuação de diversos equipamentos da rede (relés de proteção, ajuste automático de taps de transformadores, religadores) cuja definição exata do instante de ocorrência é de difícil determinação (HUANG et al., 2006).

Com base nas diferenças entre as curvas simuladas e medidas de potência ativa e reativa, é possível verificar a aderência dos modelos ao comportamento real do sistema. Desvios nas curvas expressam problemas nos valores dos parâmetros ou mesmo na estrutura dos modelos. Dessa forma, podem ser utilizados como indicadores da qualidade do modelo.

Procedimentos heurísticos baseados em regras podem ser estabelecidos para contemplar o ajuste manual de parâmetros. As regras são derivadas de análises de sensibilidade das variáveis monitoradas ( $P$  e  $Q$ ) com relação aos parâmetros dos modelos de máquina síncrona e regulador de tensão. Abordagens qualitativas e quantitativas podem ser utilizadas na obtenção de informações no sentido de relacionar padrões comportamentais de desvios nas curvas a problemas em parâmetros específicos dos modelos.

De maneira alternativa, a identificação de parâmetros pode ser formulada como um problema de mínimos quadrados não-linear, objetivando determinar a mínima soma dos quadrados do vetor de resíduos (ou erros) entre simulações e medições. Na literatura, são encontradas referências à diversos métodos de otimização aplicados ao problema de estimação de parâmetros. Por exemplo, o método de Newton (ROSE; HISKENS, 2008), Método do Gradiente (SHENG et al., 2000), Algoritmos Genéticos (JAHROMI; FIROUZI; RANJBAR, 2006) e *Maximum Likelihood* (estimação estatística) (WAMKEUE et al., 1999).

É importante salientar que a utilização dos métodos de otimização supracitados envolve a execução de uma simulação híbrida a cada iteração do método para obtenção dos valores de erro associados ao desvio das curvas simuladas e medidas. Além disso, parâmetros cuja influência nas variáveis monitoradas é reduzida são de difícil identificação e acabam por dificultar o processo de convergência. Dessa forma, parâmetros mal-condicionados são geralmente eliminados do processo de otimização por meio de métodos de seleção de subconjuntos de parâmetros (BURTH; VERGHESE; VÉLES-

REYES, 1999).

Outra abordagem para o processo de identificação de parâmetros faz uso de métodos preditores-corretores, como a técnica de Filtragem de Kalman Estendida (EKF). Neste caso os parâmetros a serem calibrados são incluídos no vetor de variáveis de estado do problema. Após as etapas de previsão e correção, executadas para cada passo de integração, o vetor de variáveis expandido (incluindo os valores dos parâmetros) é atualizado. Dessa forma, espera-se que os parâmetros atinjam a convergência ao longo do tempo de simulação. Esse método apresenta a vantagem de dispensar uma nova simulação a cada iteração. Resultados satisfatórios no ajuste dos parâmetros  $H$  e  $X'_d$  utilizando essa metodologia são citados em Huang et al. (2009).

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, inicialmente, foi abordada a formulação matemática do problema de simulação híbrida juntamente com formas de implementação computacional da técnica. Foram discutidos métodos indiretos de implementação com base em aplicativos comerciais de simulação dinâmica e suas ferramentas para desenvolvimento de modelos definidos pelo usuário.

Além disso, foi apresentado o método direto, resultado de adaptações no código-fonte de um aplicativo de simulação dinâmica (SIMSP) para injeção de medições no *loop* de simulação.

Por fim, foram evidenciadas as etapas necessárias para realização de estudos de validação de modelos aplicando os conceitos de simulação híbrida com base em dados fasoriais sincronizados.

No próximo capítulo são apresentados estudos de sensibilidade aos parâmetros de unidades geradoras cujos resultados servem de subsídio para a proposição de uma metodologia manual de ajuste de parâmetros.

A opção por um método heurístico tem como justificativa, principalmente, a possibilidade de se utilizar informações quantitativas e qualitativas no processo de avaliação da qualidade dos parâmetros. Além disso, utilizando uma abordagem heurística, é possível considerar resultados de simulações de eventos distintos quando da calibração dos parâmetros, ao passo que métodos de otimização realizam análises de perturbações distintas, de maneira isolada.



## 4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Este capítulo contempla a realização de estudos de sensibilidade com objetivo de determinar a influência dos parâmetros dinâmicos de unidades geradoras sob as grandezas potência ativa e reativa.

As análises foram conduzidas com foco em duas abordagens: quantitativa, por meio da aplicação da teoria de Sensibilidade de Trajetória e cálculo de índices de similaridade; e qualitativa, avaliando-se o efeito de variações dos parâmetros nos períodos sub-transitório, transitório e de regime das respostas simuladas. Como objetivo, pretende-se estabelecer um procedimento heurístico baseado em regras para ajuste manual de parâmetros dinâmicos.

### 4.1 TIPOS DE TESTES

Para obtenção de casos base, foram realizadas simulações convencionais utilizando um sistema elétrico simplificado (modelo máquina-barras infinita). Os sinais de tensão (módulo e ângulo) foram armazenados a cada passo de integração, emulando a função de uma PMU conectada à barra terminal da unidade geradora. Os valores de potência (ativa e reativa) também foram registrados para fins de comparação. A Figura 24 ilustra a configuração adotada.

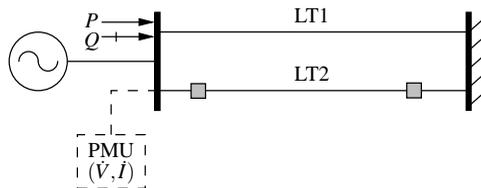


Figura 24 – Sistema máquina-barras infinita utilizado nos testes.

Os parâmetros dinâmicos associados à unidade geradora a serem avaliados são os seguintes:

- $X_d$ : reatância síncrona de eixo direto;
- $X_q$ : reatância síncrona de eixo em quadratura;
- $X'_d$ : reatância transitória de eixo direto;
- $X''_d$ : reatância sub-transitória de eixo direto;
- $T'_{d0}$ : constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto;

- $T''_{d0}$ : constante de tempo sub-transitória de eixo direto em circuito aberto;
- $T''_{q0}$ : constante de tempo sub-transitória de eixo em quadratura em circuito aberto;
- $H$ : constante de inércia do gerador;
- $Ka$ : ganho do regulador de tensão;
- $Ta$ : constante de tempo do regulador de tensão.

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros originais utilizados nas simulações. As linhas de transmissão foram representadas por modelos simplificados com parâmetros  $R = 0,5\%$  e  $X = 3\%$ .

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos dinâmicos.

$X_d$	$X_q$	$X'_d$	$X''_d$	$T'_{d0}$
0,90 pu	0,68 pu	0,30 pu	0,24 pu	7,6 s
$T''_{d0}$	$T''_{q0}$	$H$	$K_a$	$T_a$
0,09 s	0,19 s	5,071 MJ/MVA	10	0,05 s

Para excitar a dinâmica do sistema foram aplicadas as seguintes perturbações:

- ABCI<sup>1</sup>: abertura de um dos circuitos do sistema de transmissão (Figura 25);
- TRGT: aplicação de degrau no regulador de tensão da unidade geradora -  $\Delta V_{ref}$  (Figura 26);
- TRGV: aplicação de degrau na referência de potência mecânica da unidade geradora -  $\Delta P_m$  (Figura 27);
- APCB: aplicação de curto-circuito no barramento terminal do gerador com eliminação da falta pela abertura da LT2 (Figura 28).

<sup>1</sup>Os acrônimos ABCI, TRGT, TRGV e APCB remetem ao código do evento programado no aplicativo de simulação SIMSP.

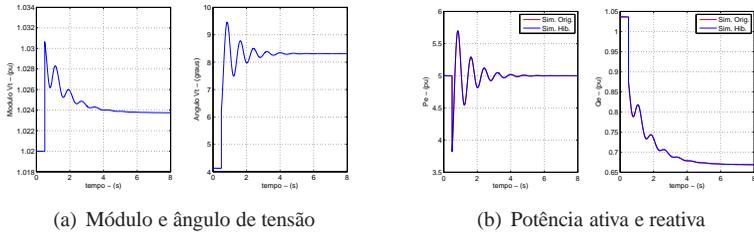


Figura 25 – Simulação convencional vs. híbrida - ABCI.

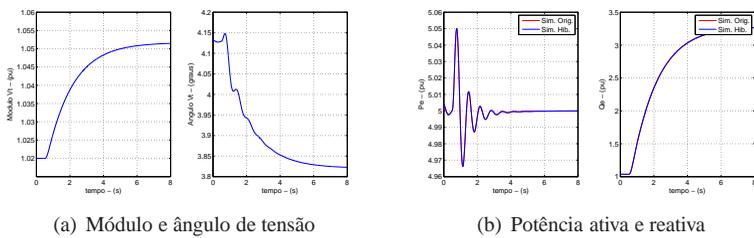


Figura 26 – Simulação convencional vs. híbrida - TRGT.

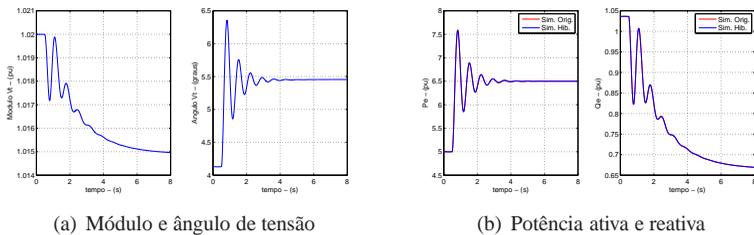


Figura 27 – Simulação convencional vs. híbrida - TRGV.

## 4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

Para análise quantitativa foram utilizadas duas ferramentas matemáticas: a análise da Sensibilidade de Trajetórias e o cálculo de índices de similaridade. Na sequência, são abordados detalhes da aplicação de cada um dos métodos e seus resultados.

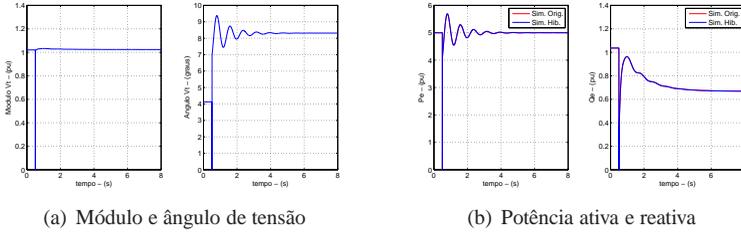


Figura 28 – Simulação convencional vs. híbrida - APCB.

#### 4.2.1 Sensibilidade de Trajetórias

A evolução no tempo de variáveis de um sistema dinâmico, após perturbações, é dita sua trajetória e é expressa por  $z(t)$ . A trajetória de um sistema, por sua vez, é definida em termos de seu fluxo ( $\phi$ ) como função dos parâmetros do sistema ( $\rho$ ) e do tempo (ROSE; HISKENS, 2008):

$$z_i(t) = \phi_i(t, \rho) \quad (4.1)$$

Geralmente a função que representa o fluxo do sistema não pode ser escrita de maneira explícita, porém, seus valores podem ser obtidos via simulação numérica. Para o caso tratado nesse trabalho, o vetor de parâmetros utilizados (associado à máquina síncrona e modelo de regulador de tensão simplificado) pode ser definido por:

$$\rho = [X_d \ X_q \ X'_d \ X''_d \ T'_{d0} \ T''_{d0} \ T'_{q0} \ T''_{q0} \ H \ K_a \ T_a]^T \quad (4.2)$$

As trajetórias avaliadas, por sua vez, contemplam as curvas de potência ativa e reativa fornecidas pela unidade geradora via simulação híbrida.

$$\begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1(t, \rho) \\ \phi_2(t, \rho) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(t) \\ Q(t) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A técnica da Sensibilidade de Trajetórias permite quantificar o impacto de alterações nos parâmetros individuais no comportamento geral do sistema. A sensibilidade de trajetória é definida pela derivada parcial da trajetória (ou fluxo) em relação aos parâmetros de interesse:

$$S_i(t, \rho) = \frac{\partial \phi_i(t, \rho)}{\partial \rho_j} \quad (4.4)$$

$$S_i(t, \rho) = \left[ \frac{\partial \phi_i(t, \rho)}{\partial \rho_1} \quad \frac{\partial \phi_i(t, \rho)}{\partial \rho_2} \quad \dots \quad \frac{\partial \phi_i(t, \rho)}{\partial \rho_n} \right] \quad (4.5)$$

Para as trajetórias definidas em 4.3, a sensibilidade relativa ao vetor de parâmetros  $\rho$  é dada por:

$$S_P(t, \rho) = \left[ \frac{\partial P}{\partial X_d} \quad \frac{\partial P}{\partial X_q} \quad \frac{\partial P}{\partial X'_d} \quad \frac{\partial P}{\partial X''_d} \quad \frac{\partial P}{\partial T'_{d0}} \quad \frac{\partial P}{\partial T''_{d0}} \quad \frac{\partial P}{\partial T'_{q0}} \quad \frac{\partial P}{\partial H} \quad \frac{\partial P}{\partial K_a} \quad \frac{\partial P}{\partial T_a} \right] \quad (4.6)$$

$$S_Q(t, \rho) = \left[ \frac{\partial Q}{\partial X_d} \quad \frac{\partial Q}{\partial X_q} \quad \frac{\partial Q}{\partial X'_d} \quad \frac{\partial Q}{\partial X''_d} \quad \frac{\partial Q}{\partial T'_{d0}} \quad \frac{\partial Q}{\partial T''_{d0}} \quad \frac{\partial Q}{\partial T'_{q0}} \quad \frac{\partial Q}{\partial H} \quad \frac{\partial Q}{\partial K_a} \quad \frac{\partial Q}{\partial T_a} \right] \quad (4.7)$$

A sensibilidade de trajetória pode ser calculada, de maneira eficiente, como um subproduto do processo de integração numérica (HISKENS, 2001). Entretanto, poucos softwares comerciais de simulação disponibilizam essa informação para o usuário.

Em contrapartida, valores aproximados podem ser obtidos por meio de simulações subsequentes utilizando parâmetros acrescidos de uma pequena diferença em relação aos valores originais (ROSE; HISKENS, 2008). A vantagem dessa abordagem consiste na necessidade de simular novamente o sistema, considerando alterações individuais nos parâmetros para os quais se deseja obter a sensibilidade. As Equações 4.8 e 4.9 ilustram o processo de cálculo aproximado da sensibilidade das trajetórias para  $P$  e  $Q$ , respectivamente.

$$S_P(t, \rho) \approx \frac{\Delta P(t)}{\Delta \rho_i / \rho_i^{base}} = \frac{P_{sim}(t) - P_{med}(t)}{(\rho_i^{alt} - \rho_i^{base}) / \rho_i^{base}} \quad (4.8)$$

$$S_Q(t, \rho) \approx \frac{\Delta Q(t)}{\Delta \rho_i / \rho_i^{base}} = \frac{Q_{sim}(t) - Q_{med}(t)}{(\rho_i^{alt} - \rho_i^{base}) / \rho_i^{base}} \quad (4.9)$$

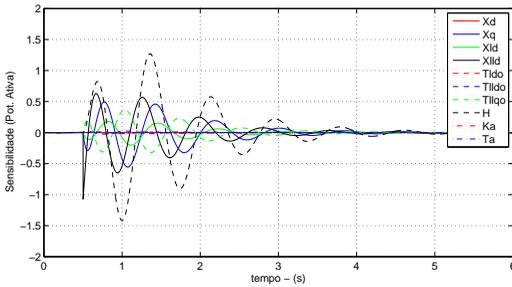
onde:

- $\rho_i^{base}$ : valor original do parâmetro;
- $\rho_i^{alt}$ : valor do parâmetro alterado em  $\Delta \rho_i$ ;
- $P_{med}$ : potência ativa medida;
- $Q_{med}$ : potência reativa medida;
- $P_{sim}$ : potência ativa simulada;
- $Q_{sim}$ : potência reativa simulada.

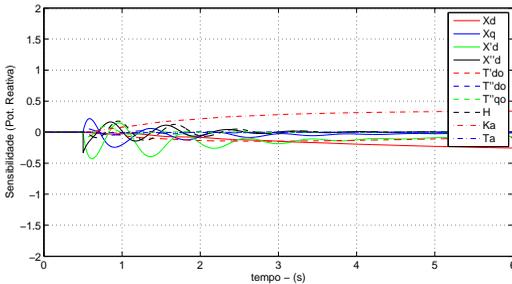
Seguindo a metodologia exposta em Rose e Hiskens (2008), as Figuras 29, 30, 31 e 32 apresentam curvas de sensibilidade das trajetórias de potência ativa e reativa para os parâmetros definidos em (4.2) contemplando

as perturbações ABCI, TRGT, TRGV e APCB.

A sensibilidade foi obtida para variações individuais de +5% nos parâmetros da máquina síncrona e regulador de tensão, ou seja, para cada parâmetro foi executada uma simulação híbrida e calculada a diferença entre as trajetórias em relação à simulação com parâmetros originais de acordo com as Equações 4.8 e 4.9.



(a) Potência Ativa -  $S_P(t, \rho)$ .



(b) Potência Reativa -  $S_Q(t, \rho)$ .

Figura 29 – Sensibilidade de Trajetória - ABCI.

Analisando os gráficos, verifica-se que a influência dos parâmetros nas trajetórias de  $P$  e  $Q$  varia de acordo com o evento aplicado ao sistema. Perturbações no regulador de tensão (degrau em  $\Delta V_{ref}$  - Figura 30), por exemplo, fazem com que variações nos parâmetros sejam mais perceptíveis na trajetória da potência reativa. Neste caso, a curva de potência ativa apresenta sensibilidade reduzida durante a perturbação.

De fato, nota-se pelas escalas dos gráficos da Figura 26 que a excursão de potência ativa foi muito menor que a excursão de potência reativa para essa perturbação, resultando em uma maior sensibilidade de  $Q$  em detrimento

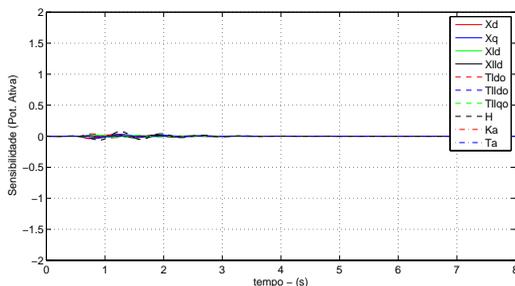
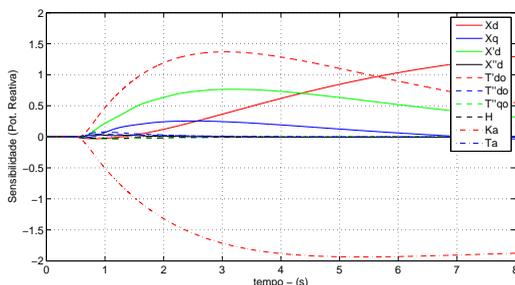
(a) Potência Ativa -  $S_P(t, \rho)$ .(b) Potência Reativa -  $S_Q(t, \rho)$ .

Figura 30 – Sensibilidade de Trajetória - TRGT.

de  $P$ . No caso da aplicação de curto-circuito (APCB), a Figura 32 revela que a perturbação excitou fenômenos transitórios sensíveis às reatâncias  $X_d''$  e  $X_d'^2$ . Dessa forma, é importante salientar que a análise de sensibilidade está associada à perturbações específicas, ou seja, eventos distintos excitam o sistema de modo a acentuar de maneira diferente o impacto dos parâmetros nas trajetórias analisadas.

Outro ponto que pode ser destacado pela análise das curvas é o fato de que alguns parâmetros são mais observáveis na trajetória de  $Q$  ( $Ka$ ,  $X_d$ ,  $X_d'$  e  $T_{d0}'$ ), enquanto outros são mais visíveis na trajetória de potência ativa ( $H$ ,  $X_q$  e  $X_d''$ ). As curvas ainda revelam que desvios em alguns parâmetros influenciam as trajetórias de  $P$  e  $Q$  apenas em períodos transitórios, outros, em regime permanente. No caso das curvas de potência ativa, nenhum dos parâmetros

<sup>2</sup>Neste caso, a escala da Figura 32 foi mantida para efeito de comparação com os outros gráficos, entretanto, a sensibilidade para os parâmetros  $X_d''$  e  $X_d'$  chegou a valores maiores que 10, ressaltando a influência expressiva desses parâmetros em transitórios rápidos.

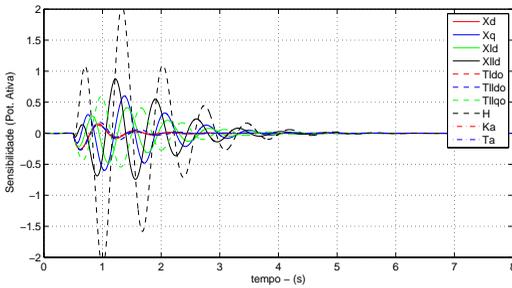
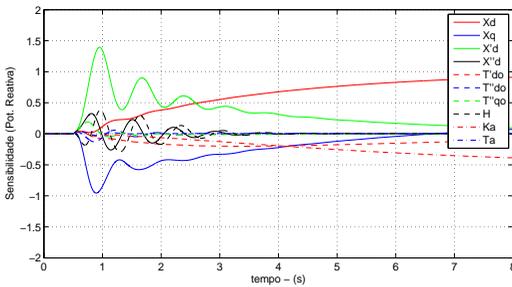
(a) Potência Ativa -  $S_P(t, \rho)$ .(b) Potência Reativa -  $S_Q(t, \rho)$ .

Figura 31 – Sensibilidade de Trajetória - TRGV.

avaliados provocou desvios significativos na resposta em regime permanente.

Outra forma de avaliar a sensibilidade das trajetórias, consiste na análise da matriz *Hessiana* da função de otimização, usando-se o método de mínimos quadrados, do erro entre trajetória simulada e trajetória medida. Matematicamente essa função pode ser escrita na seguinte forma (ROSE; HISKENS, 2008):

$$\hat{\rho} = \arg \min_{\rho} C(\rho) \quad (4.10)$$

$$C(\rho) = \|e(\rho)\|_2^2 = \sum_{k=0}^N e_k(\rho)^2 \quad (4.11)$$

onde  $\hat{\rho}$  é o vetor de parâmetros ótimo que minimiza a função  $C(\rho)$ , e o erro (ou resíduo) é definido por:

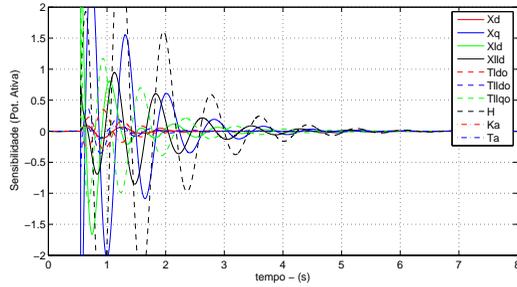
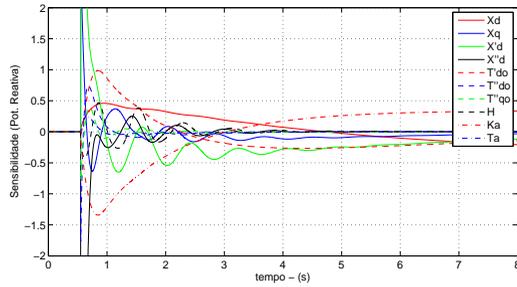
(a) Potência Ativa -  $S_P(t, \rho)$ .(b) Potência Reativa -  $S_Q(t, \rho)$ .

Figura 32 – Sensibilidade de Trajetória - APCB.

$$e(\rho) = z_i(\rho) - m \quad (4.12)$$

o vetor de medidas reais é definido como:

$$m = [m_0 \ m_1 \ m_2 \ \dots \ m_N]^T \quad (4.13)$$

e a trajetória obtida via simulação é expressa por:

$$z_i = [z_i(\rho, t_0) \ z_i(\rho, t_1) \ z_i(\rho, t_2) \ \dots \ z_i(\rho, t_N)]^T \quad (4.14)$$

Numericamente a matriz *Hessiana* pode ser calculada de maneira aproximada por (ROSE; HISKENS, 2008):

$$\mathbf{H}_i(\rho) \approx \mathbf{S}_i(\rho)^T \mathbf{S}_i(\rho) \quad (4.15)$$

onde

$$\mathbf{S}_i(\rho) = \begin{bmatrix} S_i(t_0, \rho_1) & S_i(t_0, \rho_2) & \dots & S_i(t_0, \rho_n) \\ S_i(t_1, \rho_1) & S_i(t_1, \rho_2) & \dots & S_i(t_1, \rho_n) \\ S_i(t_2, \rho_1) & S_i(t_2, \rho_2) & \dots & S_i(t_2, \rho_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_i(t_M, \rho_1) & S_i(t_M, \rho_2) & \dots & S_i(t_M, \rho_n) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

A matriz  $\mathbf{S}_i$ , definida em 4.16, representa a sensibilidade da trajetória  $i$  para cada um dos parâmetros analisados. Estruturalmente essa matriz possui  $n$  colunas (uma para cada parâmetro analisado) e  $M$  linhas (uma para cada passo de integração).

É importante salientar que no cálculo para determinação da matriz  $\mathbf{H}_i$  são levadas em conta informações de sensibilidade de todos os parâmetros para cada instante de tempo da simulação, ou seja, trata-se de um “resumo” das influências de cada parâmetro na trajetória analisada. A Equação 4.17 apresenta a definição formal da matriz  $\mathbf{H}_P(\rho)$ .

Os elementos diagonais da matriz quantificam a influência do parâmetro associado na trajetória por meio da soma dos quadrados da sensibilidade. Os elementos fora da diagonal, por sua vez, identificam acoplamento entre parâmetros, ou seja, sinaliza se dois parâmetros influenciam a trajetória de maneira sobreposta.

$$\mathbf{H}_P(\rho) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial X_d^2} & \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial X_d \partial X_q} & \dots & \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial X_d \partial T a} \\ \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial X_q \partial X_d} & \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial X_q^2} & \dots & \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial X_q \partial T a} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial T a \partial X_d} & \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial T a \partial X_q} & \dots & \frac{\partial^2 P(t, \rho)}{\partial T a^2} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

A Figura 33 ilustra os valores calculados para as matrizes  $\mathbf{H}_P$  e  $\mathbf{H}_Q$  para o caso da abertura de um dos circuitos (caso ABCI).

A primeira linha da matriz apresentada na Figura 33b, por exemplo, indica a influência mútua de cada um dos parâmetros em relação a  $X_d$  para a trajetória de potência reativa. Os elementos (1,3)<sup>3</sup> e (1,5) apresentam os

---

<sup>3</sup>(linha,coluna)

	$X_d$	$X_q$	$X'_d$	$X''_d$	$T'_{d0}$	$T''_{d0}$	$T'_{q0}$	$H$	$K_a$	$T_a$
$X_d$	0.00	0.15	0.09	-0.32	-0.00	0.00	0.02	-0.04	-0.00	-0.00
$X_q$	0.15	162.64	52.23	38.99	0.56	-6.19	-97.08	303.09	3.34	1.44
$X'_d$	0.09	52.23	19.82	-11.60	-0.18	-1.86	-25.90	63.22	0.80	0.31
$X''_d$	-0.32	38.99	-11.60	236.49	2.89	-3.10	-69.44	327.37	2.86	1.48
$T'_{d0}$	-0.00	0.56	-0.18	2.89	0.05	-0.03	-0.98	5.60	0.04	0.03
$T''_{d0}$	0.00	-6.19	-1.86	-3.10	-0.03	0.27	4.18	-12.21	-0.13	-0.06
$T'_{q0}$	0.02	-97.08	-25.90	-69.44	-0.98	4.18	69.93	-239.07	-2.44	-1.13
$H$	-0.04	303.09	63.22	327.37	5.60	-12.21	-239.07	1024.78	9.76	4.93
$K_a$	-0.00	3.34	0.80	2.86	0.04	-0.13	-2.44	9.76	0.10	0.05
$T_a$	-0.00	1.44	0.31	1.48	0.03	-0.06	-1.13	4.93	0.05	0.02

(a) Potência Ativa.

	$X_d$	$X_q$	$X'_d$	$X''_d$	$T'_{d0}$	$T''_{d0}$	$T'_{q0}$	$H$	$K_a$	$T_a$
$X_d$	151.99	26.82	95.13	-2.60	97.08	0.92	0.43	-2.27	-242.48	1.47
$X_q$	26.82	29.89	0.71	-6.48	24.61	4.18	-3.85	-12.57	-50.11	0.76
$X'_d$	95.13	0.71	149.98	7.39	81.32	-2.78	3.16	18.34	-171.34	2.50
$X''_d$	-2.60	-8.48	7.39	16.92	-1.08	-3.31	4.36	7.50	3.42	-0.09
$T'_{d0}$	97.08	24.61	81.32	-1.08	76.23	1.23	0.64	-1.96	-168.48	1.60
$T''_{d0}$	0.92	4.18	-2.78	-3.31	1.23	0.99	-1.08	-2.81	-2.08	0.08
$T'_{q0}$	0.43	-3.85	3.16	4.36	0.64	-1.08	2.08	1.40	-1.09	-0.06
$H$	-2.27	-12.57	18.34	7.50	-1.96	-2.81	1.40	14.10	4.16	0.01
$K_a$	-242.48	-50.11	-171.34	3.42	-168.48	-2.08	-1.09	4.16	399.87	-2.99
$T_a$	1.47	0.76	2.50	-0.09	1.60	0.08	-0.06	0.01	-2.99	0.07

(b) Potência Reativa.

Figura 33 – Matriz de Sensibilidade - ABCI.

maiores valores para essa linha, revelando que os parâmetros  $X'_d$  (associado à coluna 3) e  $T'_{d0}$  (associado à coluna 5) influenciam a trajetória de  $Q$  com impacto comparável ao parâmetro  $X_d$ . O elemento (1,9), por sua vez, apresenta um elevado valor em módulo, porém com sinal negativo, indicando que o sentido da influência de  $K_a$  (associado à coluna 9), em  $Q$ , é contrária àquela de  $X_d$ . Em outras palavras, um aumento em  $K_a$  provoca desvios na trajetória de potência reativa equivalente à uma redução em  $X_d$ .

Em um cenário ideal para validação e identificação de parâmetros, a matriz  $\mathbf{H}_P(\rho)$  deveria possuir elementos diagonais bem maiores que os elementos fora da diagonal. Essa propriedade garante que a trajetória apresente boa sensibilidade a todos os parâmetros envolvidos, além de não haver sobreposição de influências. Graficamente, esse fato implicaria em sensibilidades de trajetórias distintas para cada parâmetro.

Os elementos fora da diagonal com valores elevados revelam problemas de condicionamento numérico para métodos de otimização, visto que, nessas condições, os algoritmos apresentam dificuldade na obtenção da direção de descida para localização do ponto de mínimo. Comparando-se com o exemplo numérico citado previamente, nota-se que para desvios em  $Q$ , é difícil determinar qual dos parâmetros apresenta problemas ( $X_d$ ,  $X'_d$ ,  $T'_{d0}$  ou  $K_a$ ), visto que, todos influenciam a trajetória de  $Q$  de maneira similar.

Os gráficos apresentados na Figura 34 combinam as diagonais das matrizes Hessianas  $\mathbf{H}_P(\rho)$  e  $\mathbf{H}_Q(\rho)$  em gráficos  $x, y$  (sensibilidade de  $P$  vs. sensibilidade de  $Q$ ) para as quatro perturbações analisadas.

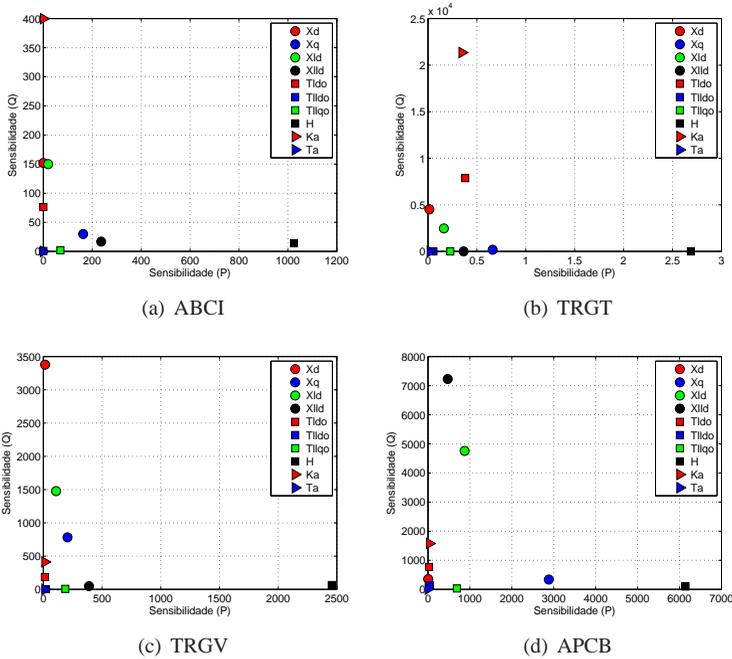


Figura 34 – Sensibilidade de  $P$  vs. Sensibilidade de  $Q$ .

Nota-se que, dependendo da perturbação aplicada, o sistema é excitado de modo que parâmetros diferentes sejam mais ou menos influentes nas trajetórias das curvas de potência ativa e reativa. A Tabela 2 sumariza os parâmetros mais influentes nas trajetórias do sistema para cada tipo de perturbação.

Tabela 2 – Sensibilidade de trajetória - influência dos parâmetros.

Perturbação	Pot. Reativa	Pot. Ativa
ABCI - Abertura de Circuito	$Ka, X_d, T'_{d0}$	$H$
TRGT - Degrau no AVR	$Ka, T'_{d0}, X_d$	-
TRGV - Degrau na Pot. Mecânica	$X_d, X'_d, X_q$	$H$
APCB - Curto-circuito em Barra	$X''_d, X'_d$	$H, X_q$

A partir dos resultados apresentados nos gráficos das Figuras 29, 30, 31 e 32 e dados sumarizados na Tabela 2, pode-se ressaltar as seguintes observações:

- Perturbações envolvendo o AVR (*Automatic Voltage Regulator*) excitam fracamente as trajetórias de potência ativa (Figura 30a), de modo que variações em  $H$  (parâmetro associado diretamente à  $P$ ) são pouco observáveis ou desprezíveis;
- Transitórios na potência mecânica (TRGV) implicam em boa sensibilidade de  $Q$  relativa à reatâncias ( $X_d$ ,  $X'_d$  e  $X_q$ ) em detrimento de  $Ka$  (ganho do regulador de tensão);
- Do ponto de vista da análise de trajetórias, percebe-se que os eventos TRGT e TRGV são complementares. A aplicação de degrau na referência do AVR excita principalmente comportamentos dinâmicos associados ao sistema de excitação da máquina, de modo que desvios no parâmetro  $Ka$ , por exemplo, se tornam muito visíveis. Perturbações na potência mecânica da máquina, por sua vez, são adequados para observar parâmetros que influenciam a potência ativa da unidade geradora, como  $H$  e  $X_q$ ;
- Eventos envolvendo curto-circuitos excitam transitórios rápidos no sistema, de modo que as reatâncias sub-transitória e transitória de eixo direto são fortemente observáveis em  $Q$ . Com relação à potência ativa, o parâmetro  $X_q$  apresentou boa sensibilidade para esse tipo de perturbação.

De fato, verifica-se que a análise baseada na teoria da Sensibilidade de Trajetórias apresenta algumas limitações quanto a avaliação da influência de desvio nos parâmetros com relação às curvas de potência ativa e reativa obtidas via simulação. Principalmente, no sentido de isolar os efeitos nas trajetórias associadas à variações nos parâmetros. Neste contexto, na seção seguinte é apresentada uma metodologia alternativa para quantificação da similaridade entre curvas, na qual são definidos índices individuais para cada período da resposta dinâmica dos sistemas (sub-transitório, transitório e regime permanente).

#### 4.2.2 Índices de Similaridade

De acordo com a análise realizada, observa-se que alterações nos diversos parâmetros provocam modificações diversas no comportamento das

trajetórias do sistema. Alguns parâmetros estão mais associados a valores de regime permanente, enquanto outros afetam as curvas durante o período transitório ou sub-transitório. Assim, propõe-se um esquema para decomposição de índices de similaridade (*fitness*<sup>4</sup>) tomando por base a classificação dos períodos de tempo adotada para representar o comportamento da corrente de armadura em máquinas síncronas durante curto-circuitos.

Na sequência, são equacionados 6 indicadores que permitem avaliar quantitativamente a influência dos parâmetros dinâmicos no regime permanente, período transitório e sub-transitório para as trajetórias de  $P$  e  $Q$ .

$$FIT_{sub}^P = \sqrt{\sum_{t_{evt}}^{t_{trs}} (P_i^{ref} - P_i^{sim})^2} \quad FIT_{sub}^Q = \sqrt{\sum_{t_{evt}}^{t_{trs}} (Q_i^{ref} - Q_i^{sim})^2} \quad (4.18)$$

$$FIT_{trs}^P = \sqrt{\sum_{t_{trs}}^{t_{reg}} (P_i^{ref} - P_i^{sim})^2} \quad FIT_{trs}^Q = \sqrt{\sum_{t_{trs}}^{t_{reg}} (Q_i^{ref} - Q_i^{sim})^2} \quad (4.19)$$

$$FIT_{reg}^P = \sqrt{\sum_{t_{reg}}^{t_{sim}} (P_i^{ref} - P_i^{sim})^2} \quad FIT_{reg}^Q = \sqrt{\sum_{t_{reg}}^{t_{sim}} (Q_i^{ref} - Q_i^{sim})^2} \quad (4.20)$$

onde:

- $P_i^{ref}$ : potência ativa de referência (medida);
- $Q_i^{ref}$ : potência reativa de referência (medida);
- $P_i^{sim}$ : potência ativa obtida por simulação híbrida;
- $Q_i^{sim}$ : potência reativa obtida por simulação híbrida;
- $\Delta P$ : excursão total da potência ativa durante a perturbação;
- $\Delta Q$ : excursão total da potência reativa durante a perturbação;
- $t_{evt}$ : instante do início da perturbação;
- $t_{trs}$ : instante do início do período transitório;
- $t_{reg}$ : instante do início do regime permanente;
- $t_{sim}$ : instante final da simulação;

A Figura 35 apresenta uma interpretação gráfica para o cálculo de *fitness*. A área hachurada nos gráficos representa a discrepância entre os resultados obtidos via medição e simulação híbrida. Os gráficos ainda apontam os três intervalos de tempo que delimitam o cálculo dos indicadores de similaridade.

De acordo com as expressões definidas em 4.18, 4.19 e 4.20, elevados valores de *fitness* sugerem divergências entre curvas obtidas via medição e

<sup>4</sup>O termo *fitness* aplicado à processos de otimização é derivado da teoria de Computação Evolutiva (Algoritmos Genéticos) e expressa, em termos numéricos, a “adequação do indivíduo ao ambiente”, ou seja, a qualidade da solução.

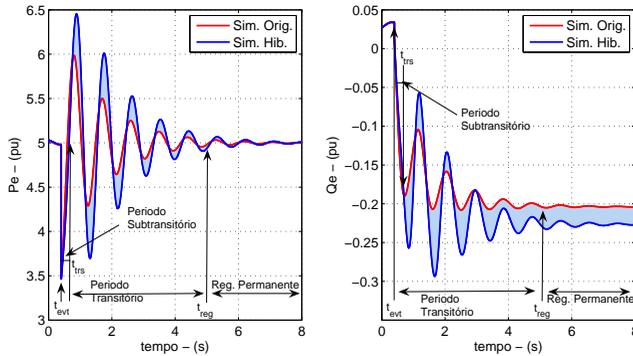


Figura 35 – Representação gráfica dos valores de *fitness*.

simulação para períodos específicos da resposta dinâmica. Os indicadores, portanto, servem como medida da aderência dos modelos aos registros de medições, podendo ser utilizados como guia no processo de ajuste dos parâmetros. Os três intervalos de tempo da resposta dinâmica são parâmetros que devem ser ajustados de acordo com a perturbação a ser avaliada.

Utilizando os mesmos tipos de perturbação apresentados para análise de sensibilidade (ABCI, TRGT, TRGV e APCB), foram então calculados valores para os indicadores definidos nas Equações 4.18, 4.19 e 4.20.

As Figuras 36 e 37 ilustram os valores obtidos considerando-se variações individuais de 5% em cada um dos parâmetros do sistema. Os gráficos de barra apresentam os valores para cada um dos índices apresentados.

A legenda dos gráficos identifica os índices da seguinte forma:

$P_s$ : *fitness* de potência ativa no período sub-transitório ( $FIT_{sub}^P$ )

$P_t$ : *fitness* de potência ativa no período transitório ( $FIT_{trs}^P$ )

$P_r$ : *fitness* de potência ativa no regime permanente ( $FIT_{reg}^P$ )

$Q_s$ : *fitness* de potência reativa no período sub-transitório ( $FIT_{sub}^Q$ )

$Q_t$ : *fitness* de potência reativa no período transitório ( $FIT_{trs}^Q$ )

$Q_r$ : *fitness* de potência reativa no regime permanente ( $FIT_{reg}^Q$ )

É importante ressaltar que a escala utilizada para perturbações do tipo ABCI é 10 vezes menor que a escala usada nas outras perturbações. De fato, os valores absolutos de *fitness* são dependentes da condição de operação pré-falta do sistema e da excursão das grandezas. Dessa forma, os índices não são comparáveis numericamente entre perturbações distintas, entretanto, suas proporções sim.

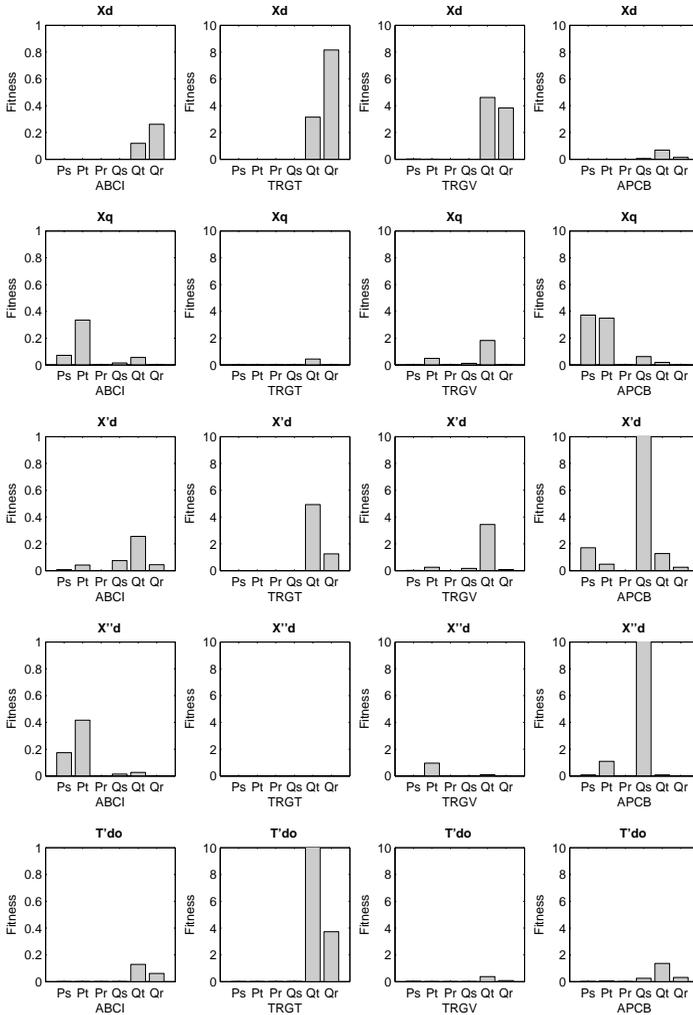


Figura 36 – Índices de similaridade.

Com base nos resultados apresentados pelas Figuras 36 e 37, foi elaborada a Tabela 3, a qual dispõe o impacto da alteração dos parâmetros dinâmicos às trajetórias do sistema.

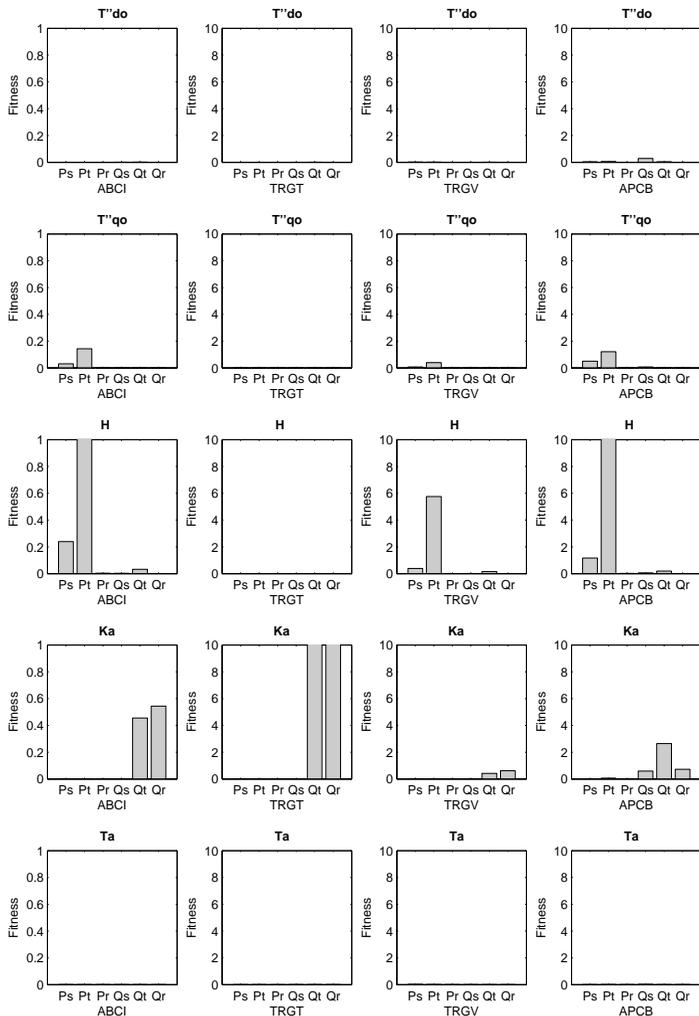


Figura 37 – Índices de similaridade (continuação).

A Tabela 3 classifica os parâmetros da unidade geradora de acordo com o período dinâmico sob o qual possui maior influência. Nota-se que alguns parâmetros possuem melhor observabilidade em determinadas perturbações. Por exemplo, alterações nos parâmetros  $X_d'$  e  $X_d''$  apresentam boa visibilidade em perturbações envolvendo curto-circuitos, eventos que excitam o comportamento sub-transitório do sistema.

Tabela 3 – Influência dos parâmetros nas trajetórias do sistema.

Principal Influência	Parâmetro	ABCI	TRGT	TRGV	APCB
Regime Permanente	$Ka$	$Qr, Qt$	$Qr, Qt$	$Qr, Qt$	$Qt$
	$X_d$	$Qr, Qt$	$Qr, Qt$	$Qr, Qt$	$Qt$
Período Transitório	$H$	$Pt$		$Pt$	$Pt$
	$X_q$	$Pt$	$Qt$	$Qt, Pt$	$Ps, Pt$
	$T'_{d0}$	$Qt$	$Qt, Qr$	$Qt, Qr$	$Qt$
	$X'_d$	$Qt$	$Qt, Qr$	$Qt$	$Qs, Ps$
	$T''_{q0}$	$Pt$		$Pt$	$Pt, Ps$
Período Sub-transitório	$X''_d$	$Pt$		$Pt$	$Qs$
	$T''_{d0}$				
	$Ta$				

Verifica-se ainda que, em alguns casos, existe sobreposição da influência de parâmetros diferentes nas trajetórias do sistema. Por exemplo, desvios nos parâmetros  $Ka$  e  $X_d$ , do ponto de vista dos indicadores, contemplam comportamentos bastante similares entre si.

Dessa forma, na próxima seção apresenta-se uma abordagem qualitativa a respeito das trajetórias do sistema, com objetivo de fornecer maiores subsídios para a identificação de parâmetros descalibrados.

### 4.3 ANÁLISE QUALITATIVA

Complementarmente à avaliação dos índices de similaridade, é possível notar que desvios em alguns parâmetros provocam comportamentos específicos (“*fingerprints*”) nas trajetórias do sistema. Tais características podem ser constatadas por meio de uma inspeção visual detalhada das curvas obtidas e permitem destacar efeitos de desvios em parâmetros determinados.

#### 4.3.1 Parâmetro $X_d$ vs. $Ka$

A Figura 38 ilustra o comportamento das trajetórias  $P$  e  $Q$  associadas à variações de  $\pm 30\%$  na reatância síncrona de eixo direto para um cenário de abertura de circuito (ABCI). Nota-se que o desvio no valor do parâmetro implica em discrepâncias na trajetória de potência reativa, sobretudo durante o regime permanente. O mesmo comportamento é verificado para perturbações TRGT e TRGV.

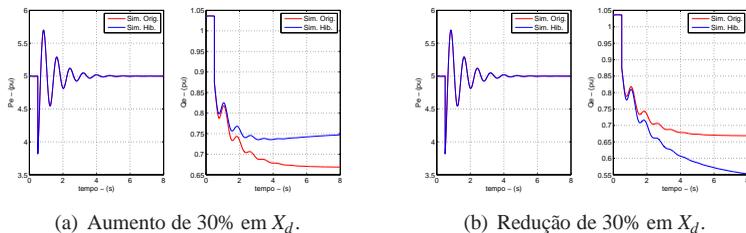


Figura 38 – Alteração em  $X_d$  - ABCI.

Como já foi comentado, variações em  $Ka$  apresentam comportamento muito similar a desvios em  $X_d$ . A diferença está associada, em sua maior parte, apenas ao sentido da mudança na trajetória:

- Um aumento na reatância síncrona faz com que a excursão de potência reativa seja menor que a excursão do caso original (Figura 38a);
- Um aumento no ganho do regulador de tensão, por sua vez, provoca uma excursão de potência reativa maior que no caso original (Figura 39a).

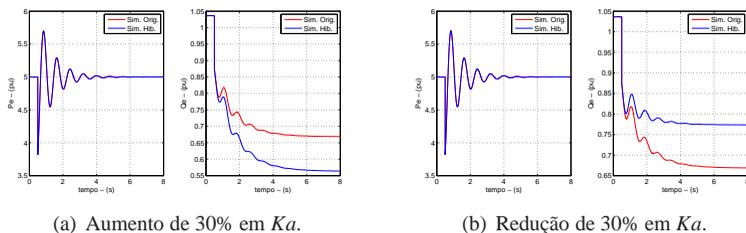


Figura 39 – Alteração em  $Ka$  - ABCI.

Portanto, é possível vislumbrar situações em que alterações em  $X_d$  sejam compensadas por modificações em  $Ka$ . Na sequência apresenta-se um caso em que a alteração combinada desses parâmetros provoca efeitos mutuamente exclusivos na trajetória de  $Q$  durante o regime permanente, prejudicando a avaliação quanto aos parâmetros descalibrados do modelo.

A Figura 40 contempla um cenário em que  $X_d$  teve seu valor alterado em +30% e  $Ka$  em +20%. Em 40a verifica-se que, mesmo com grandes discrepâncias nos parâmetros, a avaliação das curvas relativas à perturbações no

sistema de transmissão (ABCI) revelam boa aderência do modelo aos resultados da simulação usando parâmetros originais. A Figura 40b, por sua vez, apresenta o resultado da simulação híbrida de uma perturbação na potência mecânica da unidade geradora (TRGV) usando a mesma combinação de parâmetros, situação em que é exposto o problema nos valores dos parâmetros.

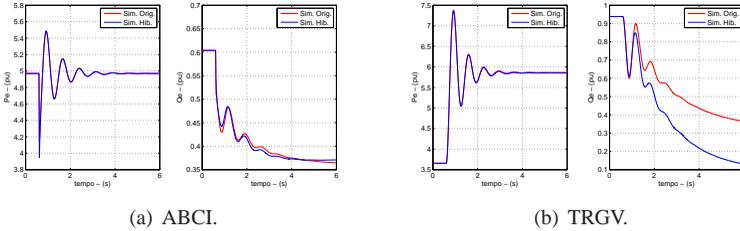


Figura 40 – Aumento de 30% em  $X_d$  e 20% em  $K_a$ .

Dessa forma, ressalta-se a importância da utilização de perturbações distintas quando da realização de estudos de validação de modelos. Somente após verificações usando diversos tipos de eventos é possível concluir sobre a validade dos modelos.

#### 4.3.2 Parâmetro $X'_d$ vs. $T'_{d0}$

De acordo com os índices de similaridade, verifica-se que ambos os parâmetros,  $T'_{d0}$  e  $X'_d$ , quando descalibrados, implicam em alterações na potência reativa durante o período transitório. Além disso, a análise de sensibilidade de trajetória revela ainda pequenos desvios em regime para os dois parâmetros. Avaliando-se as características das curvas apresentadas nas Figuras 41 e 42. No entanto, é possível evidenciar algumas diferenças nas trajetórias resultantes de desvios individuais nesses parâmetros:

- Variações em  $X'_d$  (tanto aumento como redução), em geral, acentuam o comportamento oscilatório da trajetória de  $Q$ , ou seja, reduzem o amortecimento do sistema aumentando a amplitude das oscilações. O parâmetro  $T'_{d0}$ , por sua vez, afeta o decaimento do período transitório, ou seja, implica em maior ou menor tempo para o sistema alcançar as condições de regime, sem, no entanto, modificar as características oscilatórias da resposta;
- Alterações em  $X'_d$  provocam também defasagens nas oscilações (Figura 42), fenômeno não observado para variações em  $T'_{d0}$ ;

- Percebe-se ainda que o parâmetro  $X'_d$  está muito associado a fenômenos sub-transitórios, enquanto  $T'_{d0}$  não apresenta essa característica (detalhe das curvas de potência reativa nas Figuras 43a e 43b - APCB).

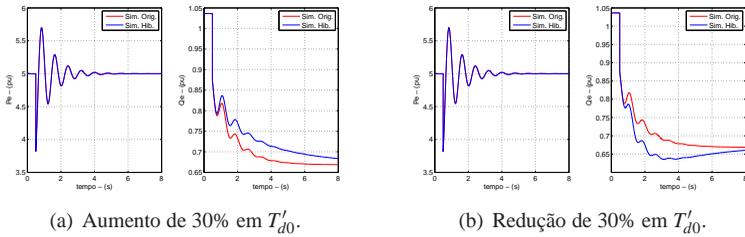


Figura 41 – Alteração em  $T'_{d0}$  - ABCI.

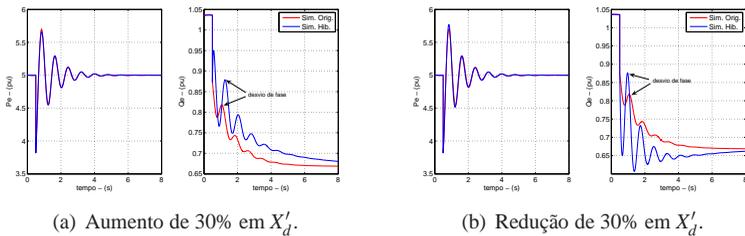


Figura 42 – Alteração em  $X'_d$  - ABCI.

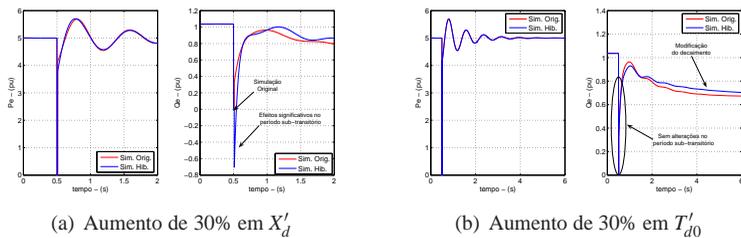


Figura 43 –  $X'_d$  vs.  $T'_{d0}$  - APCB.

### 4.3.3 Parâmetro $X''_d$

A reatância sub-transitória de eixo direto está fortemente associada a fenômenos transitórios rápidos. Portanto, perturbações envolvendo curto-circuitos são mais propícias a identificação desse parâmetro. A Figura 44a destaca desvios elevados na trajetória de  $Q$  durante o período sub-transitório para perturbações APCB.

Desvios no parâmetro  $X''_d$  provocam ainda alterações na amplitude das oscilações de  $P$  e  $Q$  no período transitório em perturbações TRGV e ABCI (Figura 44b). É importante salientar, contudo, que esse comportamento implica em valores de *fitness* reduzidos, sendo que a melhor opção para validação e ajuste desse parâmetro é por meio da utilização de eventos do tipo APCB.

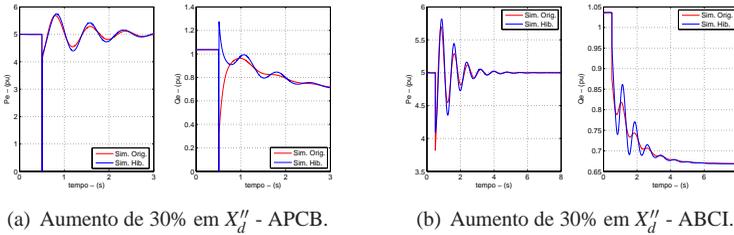


Figura 44 – Alteração em  $X''_d$ .

### 4.3.4 Parâmetro $H$ vs. $X_q$

De acordo com a análise dos valores de *fitness* obtidos, a constante de inércia do gerador é o parâmetro com maior influência sobre a trajetória de potência ativa<sup>5</sup> (Figura 45), sendo portanto a primeira opção para ajuste de curvas de  $P$ . A Figura 46, por sua vez, destaca a influência de  $H$  sobre curvas de potência reativa associada às oscilações no período transitório. Verifica-se ainda que, para o caso de perturbações no sistema de excitação (TRGT), modificações no valor de  $H$ , em geral, não provocam desvios na trajetória de  $Q$ .

A reatância síncrona de eixo em quadratura, por sua vez, está relacionada à trajetória de potência reativa e ativa (Figura 47), no entanto, de

<sup>5</sup>Deve-se atentar para o fato de que não foi considerado o sistema de regulação de velocidade da unidade nos estudos realizados.

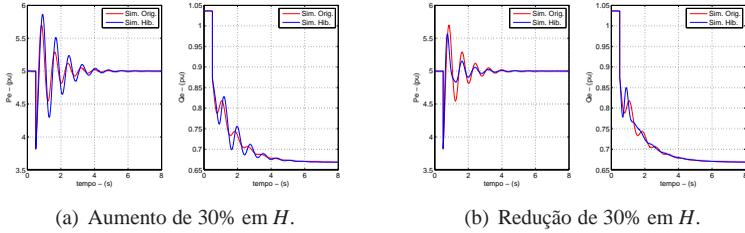


Figura 45 – Alteração em  $H$  - ABCI.

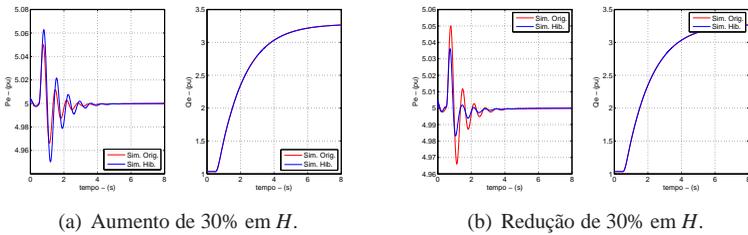


Figura 46 – Alteração em  $H$  - TRGT.

maneira menos evidente que a constante de inércia. Além disso, o efeito de desvios em  $X_q$  pode ser percebido de maneira mais significativa nas primeiras oscilações de  $P$  e  $Q$ .

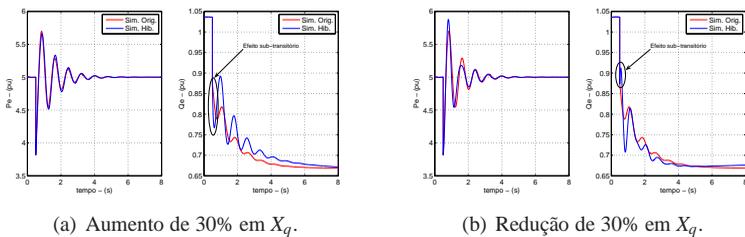


Figura 47 – Alteração em  $X_q$  - ABCI.

É possível ainda constatar a influência do parâmetro  $X_q$  na trajetória de  $Q$  no caso de perturbações no sistema de excitação (TRGT - Figura 48). Este comportamento não é perceptível para variações na constante de inércia, podendo, dessa forma, ser usado para diferenciar desvios em um ou outro parâmetro.

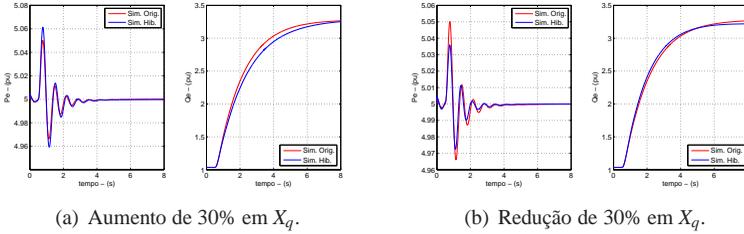


Figura 48 – Alteração em  $X_q$  - TRGT.

Outro efeito peculiar do parâmetro  $X_q$  está associado à fenômenos sub-transitórios. A Figura 49 ilustra a influência de variações em  $X_q$  em eventos que envolvem transitórios rápidos. Vale ressaltar que  $X_q$  é um dos poucos parâmetros que, quando descalibrado, provoca desvios visíveis na trajetória de potência ativa durante o período sub-transitório.

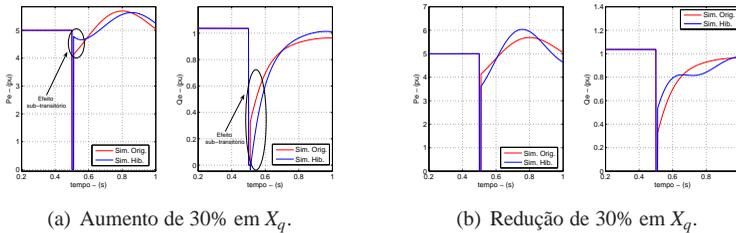


Figura 49 – Alteração em  $X_q$  - APCB.

#### 4.4 METODOLOGIA PARA AJUSTE MANUAL DE PARÂMETROS

Com base na análise de sensibilidade quantitativa (sensibilidade de trajetória e índices de similaridade) e qualitativa, é possível definir um conjunto de regras para ajuste dos parâmetros utilizando a ferramenta de simulação híbrida e dados de perturbações naturais de sistemas de potência. A estratégia de ajuste leva em conta o período da resposta dinâmica mais influenciado por cada parâmetro e indica quais as perturbações devem ser utilizadas para obter a maior sensibilidade aos parâmetros.

O processo de ajuste é baseado em etapas, ou seja, inicialmente procura-se corrigir parâmetros associados ao regime permanente, na sequência, parte-

se para o ajuste de parâmetros que provocam desvios no período transitório e, por fim, são modificados os parâmetros associados à discrepâncias no período sub-transitório. Além disso, tendo em vista que a trajetória de potência ativa, em geral, é menos sensível a variações nos parâmetros, verifica-se que é apropriado iniciar o ajuste dos parâmetros em função dos desvios em  $P$ . Em seguida, são ajustados os parâmetros relativos à trajetória de  $Q$ .

Em Huang et al. (2009), os autores associam diferenças no regime permanente das curvas de  $P$  a desvios nos parâmetros do regulador de velocidade. Entretanto, nos estudos realizados nesta dissertação, a malha de controle de velocidade não foi representada, de modo que não foram constatados desvios em regime para a trajetória de potência ativa. A Figura 50 apresenta um fluxograma contemplando as etapas envolvidas no processo de ajuste de parâmetros proposto.

Na Figura 50 estão representados blocos de decisão (D), nos quais apresentam-se os critérios de avaliação, bem como os tipos de perturbações a serem consideradas em cada caso; e blocos de ajuste (A), que indicam os parâmetros a serem corrigidos.

Analisando-se o fluxograma da Figura 50 verifica-se que em uma primeira etapa são corrigidos os parâmetros associados a desvios na trajetória de potência ativa, quais sejam:  $H$  e  $X_q$ . O parâmetro  $X_d''$ , apesar de provocar variações na amplitude das oscilações de  $P$ , não é contemplado nesta etapa, visto que pode ser observado de maneira mais confiável na trajetória de potência reativa durante o período sub-transitório.

Naturalmente, a primeira opção na correção da trajetória de  $P$  é por meio de ajustes na constante de inércia (blocos D1/A1 no fluxograma). Entretanto, no caso dos desvios se restringirem apenas às primeiras oscilações, sugere-se o ajuste da reatância de eixo em quadratura (blocos D2/A2 no fluxograma). Desvios em  $X_q$  também podem ser identificados em função de divergências no período sub-transitório da potência ativa usando perturbações envolvendo curto-circuitos (blocos D3/A3).

Após ajustada a trajetória da potência ativa, parte-se para a correção dos parâmetros associados à curva de potência reativa. A correção das condições de regime permanente envolvem ajustes no ganho do regulador de tensão e reatância síncrona de eixo direto (blocos D4/A4). De fato, trata-se de um ajuste complexo, visto que as influências dos dois parâmetros são similares entre si. Dessa forma, a determinação dos parâmetros corretos envolve análise conjunta de tipos distintos de perturbações (ABCI, TRGV e TRGT), já que o efeito de alterações em  $X_d$  pode compensar desvios em  $Ka$  e vice-versa.

A correção no período transitório para  $Q$  é feita mediante o ajuste dos parâmetros  $T'_{d0}$  (A5) e  $X'_d$  (A6). Neste caso, avalia-se o comportamento das oscilações, ou seja: havendo desvio de fase e amplitude durante o período

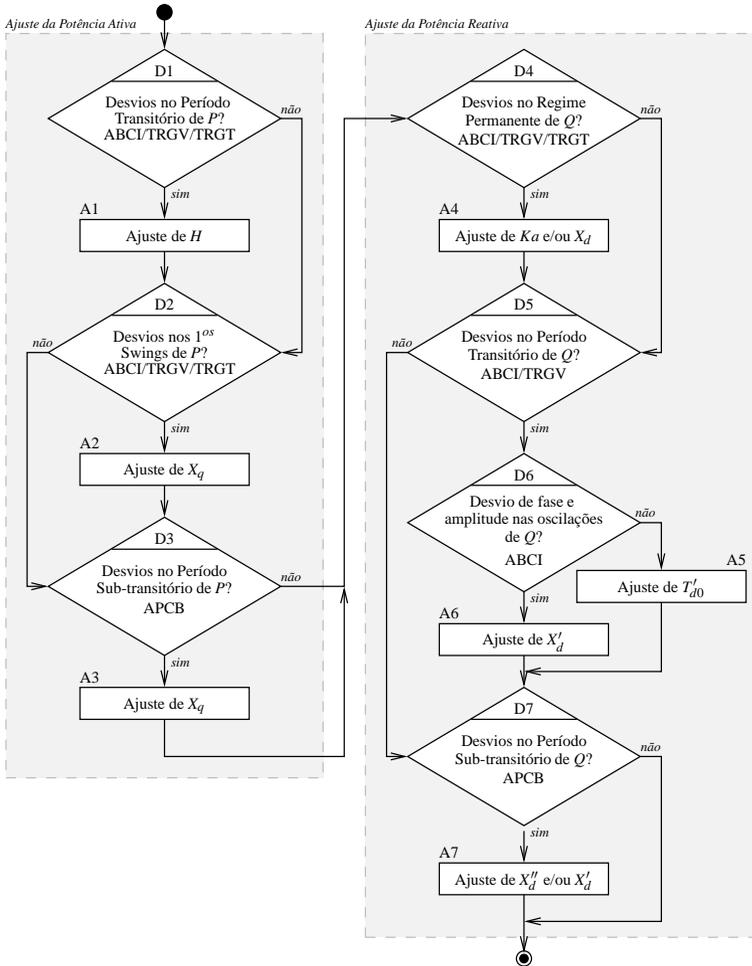


Figura 50 – Procedimento para ajuste de parâmetros.

transitório (D6), as diferenças provavelmente estão associadas à  $X'_d$ ; quando as diferenças são caracterizadas como “*offset*” no período transitório, a solução consiste no ajuste dos valores de  $T'_{d0}$ .

Por fim, caso sejam verificados desvios no período sub-transitório da potência reativa, parte-se para o ajuste da reatância  $X''_d$  e/ou  $X'_d$ . Vale lembrar que para sensibilização desses parâmetros é necessária a utilização de perturbações que evidenciem fenômenos rápidos, como eventos envolvendo curto-circuitos (APCB).

É importante ressaltar, todavia, que a metodologia apresentada na Figura 50 não contempla a correção de desvios associados à parâmetros do regulador de velocidade (GOV) e estabilizador de potência (PSS), visto que esses elementos não foram considerados na análise de sensibilidade dos parâmetros.

Além disso, a figura não mostra as eventuais iterações necessárias nos blocos de ajuste dos parâmetros, já que o processo de ajuste dificilmente é realizado de uma única vez. Ou seja, trata-se de um método do tipo “tentativa e erro”, sendo que o fluxograma da Figura 50 pode ser encarado como um guia para o procedimento. Em alguns casos, inclusive, pode ser necessário fazer um re-ajuste de parâmetros previamente ajustados.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas ferramentas para avaliação da similaridade entre curvas medidas e simuladas. Inicialmente foi discutida a formulação matemática e aplicação da técnica de sensibilidade de trajetória. Foram apresentados resultados de análises empregando quatro tipos de perturbações (ABCI, TRGT, TRGV e APCB), evidenciando-se o fato de que diferentes eventos excitam comportamentos dinâmicos distintos para as trajetórias  $P$  e  $Q$ .

Como alternativa, foram apresentados indicadores de similaridade baseados nos períodos dinâmicos da resposta de sistemas de potência (sub-transitório, transitório e regime permanente). Foram expostos ainda aspectos qualitativos das trajetórias do sistema que podem ser utilizados na seleção do parâmetro a ser ajustado.

Por fim, com base na análise combinada dos indicadores de similaridade e avaliação qualitativa das trajetórias, foi proposta uma metodologia para ajuste manual de parâmetros de unidades geradoras utilizando simulação dinâmica híbrida e dados de medição fasorial sincronizada.

Com objetivo de testar a validade da metodologia proposta, no Capítulo 6 são apresentados estudos de caso contemplando o ajuste de parâmetros de unidades geradoras utilizando dados de perturbações obtidos em uma ferramenta de simulação em tempo real (abordada no Capítulo 5) para um sistema de potência hipotético.



## 5 SIMULADOR DIGITAL PARA ANÁLISE EM TEMPO REAL

O simulador digital para análise do comportamento de sistemas de potência em tempo real (RTDS<sup>®</sup> - *Real Time Digital Simulator*) é uma plataforma computacional (hardware + software) dedicada à realização de estudos de fenômenos transitórios eletromagnéticos, em tempo real, com foco em sistemas elétricos de potência. Neste capítulo serão abordadas aplicações do equipamento, descrição dos módulos que compõem o RTDS, além da contextualização da utilização do equipamento como ferramenta para testes e validação de aplicações de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada.

O equipamento utilizado neste trabalho está disponível no Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), vinculado ao Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI) e à Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. O simulador foi fornecido pela empresa canadense *RTDS Technologies Inc*, fundada em 1994 pelo Centro de Pesquisas em HVDC (*High Voltage Direct Current*) de Manitoba.

### 5.1 DESCRIÇÃO E APLICAÇÕES

Sistemas RTDS são utilizados, principalmente, para realização de testes de sistemas de proteção e controle de sistemas de potência em função da possibilidade de interação com equipamentos reais.

A operação em tempo real implica na seguinte premissa: um intervalo de tempo decorrido no sistema sob simulação deve corresponder exatamente ao intervalo necessário para execução (cálculo) da simulação. Em outras palavras, um evento (perturbação) no sistema modelado que tenha duração de um segundo deve ser simulado no intervalo de um segundo (KUFFEL et al., 1995).

Este comportamento é especialmente adequado para viabilizar a realização de testes em malha fechada com equipamentos externos (testes do tipo *Hardware in Loop*). Para isso, o simulador possui interfaces de entrada/saída analógicas e digitais, as quais podem ser conectadas a amplificadores de tensão e corrente capazes de emular sinais elétricos dos secundários dos transformadores de instrumentação (TCs e TPs) (BO et al., 2008).

O hardware é dotado de vários processadores interconectados (*cluster*) para execução de cálculos paralelos visando a realização das simulações em tempo real. O software de modelagem possui interface gráfica para desenho do diagrama unifilar/trifilar da rede elétrica e conta com extensa biblioteca de componentes de sistemas de potência (máquinas síncronas, transforma-

dores), blocos de controle (reguladores de tensão/velocidade, estabilizadores de potência) além de uma grande variedade de blocos básicos e operações matemáticas para construção de modelos personalizados (MCLAREN et al., 1992).

O simulador permite a representação de diversos cenários de perturbações de maneira automatizada por meio de *scripts*. Essa ferramenta possibilita configurar parâmetros e condições a serem alteradas automaticamente em simulações consecutivas, garantindo elevada produtividade e eficiência na execução de ensaios repetitivos.

Abaixo apresenta-se uma lista de equipamentos que podem ser testados utilizando simuladores de sistemas de potência em tempo real.

- IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) de proteção e automação;
- Dispositivos de controle para máquinas síncronas (reguladores de tensão e velocidade, PSS);
- Sistemas de controle para dispositivos FACTS (STATCOM, SVC, UPFC, etc);
- Sistemas de controle para retificadores e inversores de *links* HVDC;
- Equipamentos de medição e monitoramento de sistemas elétricos, como registradores de perturbação e PMUs (BI et al., 2007).

Além disso, o RTDS pode ser utilizado para propósitos de educação e treinamento com foco em dinâmica de sistemas de potência.

## 5.2 SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Além da execução em tempo real, a modelagem matemática e o processo de solução utilizados pelo RTDS apresentam diferenças significativas com relação aos métodos adotados por programas de estabilidade transitória como ANATEM e SIMSP. De fato, o RTDS se enquadra em uma outra categoria de ferramentas de simulação, no caso, Simuladores de Transitórios Eletromagnéticos. Na sequência são listadas as principais diferenças entre esses dois tipos de ferramentas de simulação.

- Simulações de estabilidade transitória realizam cálculos com base na frequência fundamental do sistema, ou seja, a cada passo de integração novos fasores das tensões nodais são obtidos. Softwares para simulação de transitórios eletromagnéticos, por sua vez, utilizam algoritmos de

solução do tipo *point-on-wave* baseados no método de Dommel (DOMMEL, 1969), obtendo-se a cada passo de integração novos pontos dos sinais de tensão e corrente do sistema (FORSYTH et al., 2001).

- Simulações de transitórios eletromecânicos são realizadas utilizando passos de integração da ordem de 1 ms, enquanto no caso de transitórios eletromagnéticos são utilizados passos bem menores, da ordem de 50  $\mu$ s. Essa característica permite a representação de efeitos que não são visíveis em softwares de estabilidade transitória, por exemplo: magnetização de transformadores (correntes *inrush*), chaveamento de dispositivos de eletrônica de potência e fenômenos de ondas viajantes em linhas de transmissão (FORSYTH et al., 2001).
- Programas de estabilidade transitória realizam cálculos baseados em fasores de sequência positiva enquanto softwares de transitórios eletromagnéticos utilizam uma representação independente para as três fases, permitindo a simulação de condições de desbalanço entre fases.
- Ambos os programas utilizam a modelagem de máquinas síncronas baseada nas equações de eixo *dq*. Entretanto, a representação usada pelos programas de estabilidade transitória não leva em conta os efeitos transitórios do estator. Esta simplificação reduz significativamente o esforço computacional na realização dos cálculos, mas, em contrapartida, gera resultados mais conservadores nas simulações (KUNDUR, 1994).

Como exemplos de ferramentas de estabilidade transitória podem ser citados: PSS/E (*Power System Simulator* - Siemens PTI), GE PSDS (*Power System Analysis Software*), *PowerWorld Simulator* e ANATEM (CEPEL). Para simulação de transitórios eletromagnéticos podem ser listados: EMTP (*EletroMagnetics Transients Program*), ATP (*Alternative Transients Program*), e RTDS (*Real Time Digital Simulator*).

### 5.3 HARDWARE

Para prover o poder de processamento necessário para a realização dos cálculos em tempo real, o RTDS utiliza diversos cartões com processadores interligados via barramento dedicado para execução de algoritmos paralelos que contemplam a solução das equações algébricas e diferenciais de sistemas de potência.

Cartões de processamento juntamente com cartões de comunicação de dados e I/O (*input/output*) compõem os racks do simulador, os quais podem

ser utilizados em conjunto, para solução de sistemas de grande porte, ou de maneira isolada, para simulação de sistemas distintos, simultaneamente. Na sequência, são listados os principais cartões que compõem os racks do RTDS.

- **Cartões GPC (*Giga Processor Card*)**

É o cartão no qual são executados os algoritmos de simulação de sistemas de potência. Até 6 GPCs podem ser instalados em um rack para operação em paralelo. Cada cartão GPC possui dois processadores IBM Power PC 750GX rodando a 1 GHz. Geralmente um dos processadores é utilizado para a solução da rede elétrica (equações nodais) enquanto outros são dedicados à execução de modelos dinâmicos do sistema de potência (máquinas síncronas, linhas de transmissão, transformadores) e componentes de sistemas de controle (reguladores de tensão, velocidade, estabilizadores, funções de proteção, etc) (RTDS, 2009).

- **Cartões GTWIF (*Giga Transceiver Workstation Interface*)**

Cartão utilizado para comunicação entre o simulador RTDS e as estações de trabalho que fazem o gerenciamento das simulações (*download* de casos, início e término de simulações). A comunicação é feita via Ethernet e é responsável pela atualização de gráficos e envio de comandos de usuários (mudança de set-point, aplicação de perturbações etc). O GTWIF também é utilizado para sincronização dos racks em casos de simulação multi-rack (RTDS, 2009).

- **Cartões GTIO (*Giga Transceiver Input/Output*)**

São utilizados para prover interfaces de entradas e saídas ao RTDS, viabilizando testes de equipamentos em malha fechada. Estão disponíveis cartões de entradas e saídas analógicas e digitais, entretanto, os sinais são disponibilizados em níveis reduzidos, o que exige a instalação de amplificadores e painéis de interface (RTDS, 2009).

- **Cartões GTNET (*Giga Transceiver Network Communication Card*)**

Provê link de comunicação em tempo real com equipamentos externos via Ethernet. Os cartões GTNET podem ser entendidos como conversores de protocolos, recebendo pacotes da rede em protocolos específicos (IEC 61850 GOOSE/GSE, IEC 61850 Sample Values e DNP3), extraíndo as informações e, repassando os dados ao GPC. Da mesma forma, dados de simulações podem ser enviados a outros equipamentos (relés de proteção, controladores) por meio de protocolos de comunicação utilizando esses cartões (RTDS, 2009).

- **Amplificadores**

Amplificadores de tensão e corrente são utilizados para transformar os

níveis dos sinais analógicos gerados nos cartões GTIO para níveis compatíveis com equipamentos de proteção e controle (secundários de TPs e TCs).

O simulador disponível no LASSE dispõe de 4 racks totalizando 12 cartões GPC. Em termos das dimensões de sistemas que podem ser modelados no equipamento, cada rack permite a representação de 22 nós trifásicos. Dessa forma, a capacidade total de simulação é de sistemas com até 88 barras. Com relação aos amplificadores disponíveis, o LASSE possui 18 amplificadores de corrente (monofásicos) e 12 amplificadores de tensão (monofásicos).

As Figuras 51 e 52 apresentam, respectivamente, fotografias dos cubículos dos racks de processamento e dos amplificadores de potência do simulador instalado no LASSE.



Figura 51 – Cubículos dos Racks do RTDS.



Figura 52 – Cubículos dos Amplificadores do RTDS.

## 5.4 SOFTWARE

O gerenciamento das simulações e análise dos resultados é realizada por meio da ferramenta RSCAD. O aplicativo possui vários módulos com funções de modelagem e parametrização de sistemas de potência além de visualização e análise de curvas. A seguir é apresentada uma lista dos módulos que compõem o RSCAD juntamente com a descrição de suas funcionalidades.

- **Módulo FileMan**

O módulo *File Manager* é o ponto de entrada do software RSCAD. É utilizado no gerenciamento dos projetos e organização dos casos de simulação (RTDS, 2008).

- **Módulo Draft**

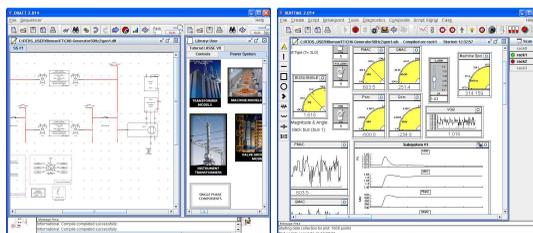
O módulo *Draft* é usado para a modelagem do sistema de potência e sistemas de controle via editor gráfico. O módulo disponibiliza função de fluxo de potência (*Load Flow*) integrado para determinação do ponto de operação do sistema usado na definição das condições iniciais da simulação (RTDS, 2006). A Figura 53a apresenta um *screen-shot* do módulo.

- **Módulo RunTime**

O módulo *RunTime* é usado para gerenciar a execução das simulações: iniciar, terminar, aplicar perturbações e visualizar resultados. Neste módulo é possível associar diversos componentes gráficos (botões, chaves, indicadores numéricos, *plots*) a variáveis internas do modelo em simulação, permitindo interação do usuário com o modelo em tempo de execução (RTDS, 2008). A Figura 53b apresenta um *screen-shot* do módulo *RunTime*.

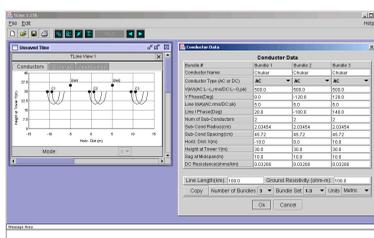
- **Módulo TLine**

O módulo *TLine* é utilizado para definição de especificações detalhadas de linhas de transmissão e cabos, como por exemplo, número de condutores e arranjo físico da estrutura (raio médio geométrico, distância média geométrica), tipo de condutor, comprimento da linha, tensão e frequência de operação, etc. Com base nestes dados o módulo *TLine* calcula os parâmetros da linha (indutância, capacitância e resistência) (RTDS, 2008). Alternativamente, modelos simplificados (PI equivalente) podem ser configurados por meio de reatâncias e resistências das linhas. Uma captura de tela do módulo *TLine* pode ser vista na Figura 53c.



(a) Módulo Draft.

(b) Módulo RunTime.



(c) Módulo TLine.

Figura 53 – Módulos do RSCAD.

## 5.5 SETUP DE SIMULAÇÕES

A configuração de cenários de simulação com o RTDS é realizada por meio da integração dos diversos módulos do RSCAD e o hardware dos racks do simulador. A Figura 54 ilustra a interação e a função de cada módulo.

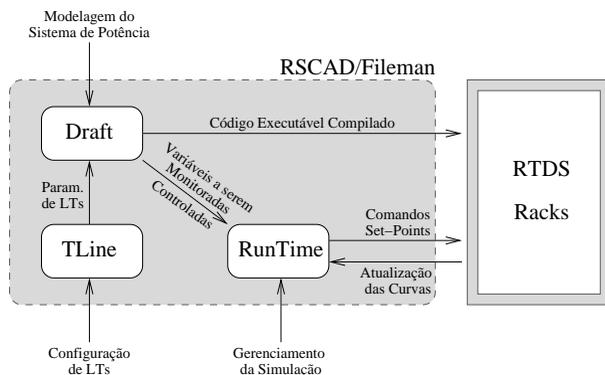


Figura 54 – Interação entre os módulos do RSCAD e os racks do RTDS.

A modelagem do sistema de potência (rede elétrica, geradores, cargas e linhas de transmissão) é feita pelos módulos *Draft* e *TLine*. Por meio do processo de compilação, a representação gráfica do sistema elétrico é convertida para código de máquina e transferida para os racks do RTDS para execução. O módulo *RunTime* faz o papel de interface entre o sistema sob simulação e o usuário, permitindo comandos de início/término da simulação, alteração de *set-points*, aplicação de faltas e visualização de curvas.

## 5.6 MODELAGEM DE COMPONENTES

Na sequência são apresentados detalhes da modelagem de componentes de sistemas de potência utilizada no RTDS, destacando as diferenças com relação à modelagem simplificada adotada em softwares de estabilidade transitória, como o SIMSP e ANATEM.

### 5.6.1 Máquina Síncrona

O modelo de máquina síncrona disponível no RTDS utiliza um equacionamento matemático detalhado, levando em conta os efeitos transitórios

do estator e saturação dos parâmetros. Além disso o componente possui uma grande quantidade de parâmetros, permitindo que diversos tipos de máquinas sejam representadas pelo mesmo bloco de simulação.

Configurações do componente permitem que os parâmetros da máquina sejam fornecidos na forma  $R$  e  $X$ , ou seja, resistências e reatâncias dos elementos que compõem o modelo (Figura 55), ou no formato de dados do gerador (*Generator Format*), como valores das reatâncias sem saturação e constantes de tempo de circuito aberto (parâmetros operacionais da máquina síncrona).

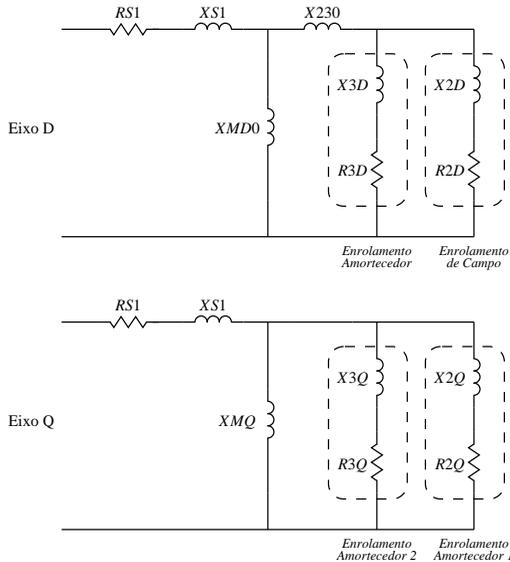


Figura 55 – Modelo de Máquina Síncrona - RTDS (RTDS, 2006).

É possível ainda definir o número de enrolamentos amortecedores no eixo  $q$  presentes no modelo (1 ou 2) para representação de máquinas de polos salientes ou lisos, respectivamente. O modelo da máquina permite ainda que seja incluído um transformador elevador  $\Delta Y$  junto ao gerador, economizando dessa forma um nó elétrico referente à barra intermediária entre a máquina e o transformador.

Um ponto importante a ser destacado é a inicialização (partida) da máquina na simulação. A ferramenta de cálculo de fluxo de potência disponível no módulo *Draft* pode ser utilizada para inicializar as variáveis de estado da máquina de modo que no primeiro passo de integração a máquina seja posta no ponto de operação definido como resultado do *LoadFlow*.

### 5.6.2 Linhas de Transmissão

O RTDS permite que modelos detalhados de linhas de transmissão sejam usados nas simulações. Estes modelos são representações das linhas por parâmetros distribuídos e levam em conta os fenômenos de ondas viajantes (modelo *Bergeron*), sendo mais apropriados que os tradicionais modelos PI para representação de linhas longas (RTDS, 2006).

### 5.6.3 Obtenção de Fasores

No contexto da aplicação do simulador para obtenção de dados para simulação híbrida, é necessário utilizar artifícios para geração de fasores da tensão terminal da unidade geradora, já que as simulações realizadas no RTDS fornecem valores ponto-a-ponto no tempo (sinais senoidais de tensão e corrente). De fato, deseja-se emular o funcionamento de uma unidade de medição fasorial a partir dos sinais no tempo disponíveis no simulador em tempo real.

Os componentes dinâmicos do RTDS possuem diversas variáveis internas que podem ser externalizadas para fins de monitoramento. Uma delas é o módulo da tensão terminal da máquina síncrona, em pu. Para obtenção do ângulo da tensão terminal do gerador é necessário utilizar um componente chamado *AngDiff*. Este componente, disponível na biblioteca de instrumentação (*metering*), possui 6 entradas para conexão de tensões trifásicas de duas barras e disponibiliza como saída a diferença angular entre as duas barras.

É necessário obter ainda os sinais de potência ativa e reativa da unidade geradora, os quais também são disponibilizados diretamente por meio de variáveis de monitoramento do componente máquina síncrona. Esses valores são usados como referência na comparação com resultados das simulações híbridas.

## 5.7 ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS

Tomando por base o estudo de sensibilidade apresentado no Capítulo 4, nesta seção apresenta-se uma análise das trajetórias das respostas obtidas via simulação híbrida com parâmetros originais utilizando dados obtidos da ferramenta RTDS. O sistema-teste e os tipos de perturbação utilizados contemplam os mesmos casos apresentados no Capítulo 4, exceto pelo caso da

perturbação envolvendo curto-circuito<sup>1</sup>. A Figura 56 ilustra o sistema-teste (máquina-barras infinita) representado na ferramenta RSCAD.

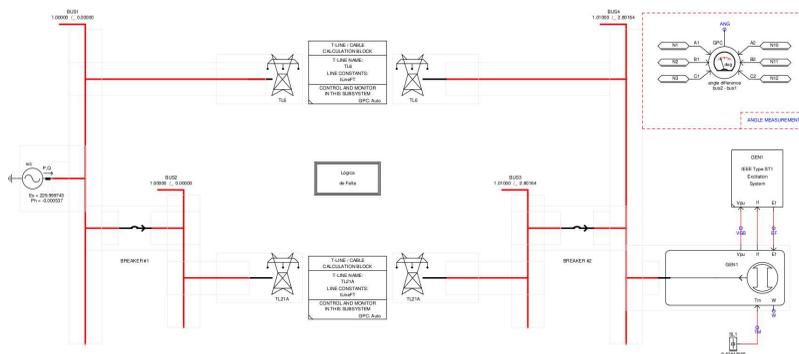
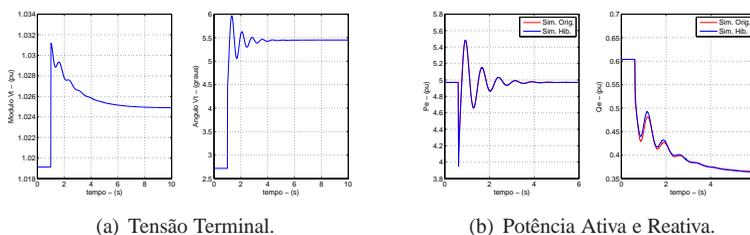


Figura 56 – Modelagem do Sistema-Teste (RSCAD).

As Figuras 57, 58 e 59 apresentam os resultados da simulação híbrida comparados às curvas obtidas do simulador de tempo real. No geral, verifica-se uma boa aderência entre as curvas obtidas do RTDS e aquelas simuladas via SIMSP. É possível notar, entretanto, que mesmo utilizando parâmetros originais são perceptíveis pequenas diferenças, principalmente, no período transitório das curvas de potência reativa, inerentes às diferenças nos modelos implementados nas duas ferramentas (RTDS e SIMSP).



(a) Tensão Terminal.

(b) Potência Ativa e Reativa.

Figura 57 – Abertura de Circuito - ABCI (RTDS).

<sup>1</sup>O componente do RTDS utilizado para medição de diferença angular não apresentou resposta adequada para os transitórios rápidos envolvidos durante a aplicação de curto-circuitos, comprometendo os resultados da simulação híbrida nestes casos. De fato, o fabricante não disponibiliza informações a respeito do algoritmo utilizado pelo componente para o cálculo da diferença angular.

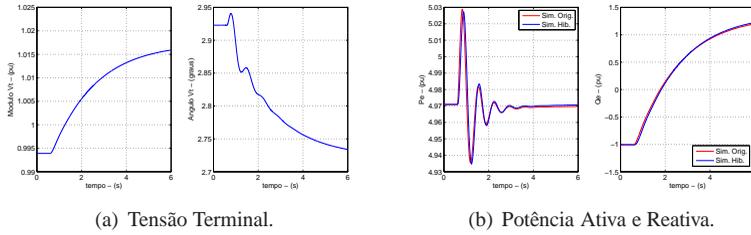


Figura 58 – Degrau no Regulador de Tensão - TRGT (RTDS).

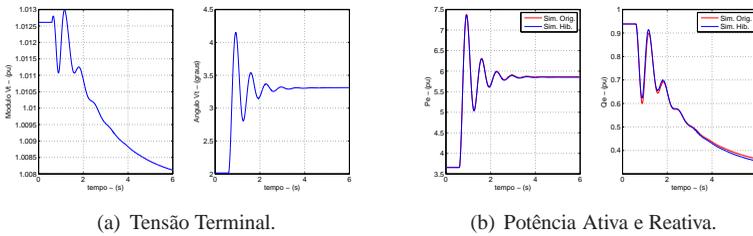


Figura 59 – Degrau na Referência de Potência Mecânica - TRGV (RTDS).

As Figuras 60 e 61 ilustram, respectivamente, os gráficos da sensibilidade de trajetória das curvas de potência ativa e reativa, sem, no entanto, realizar modificações nos parâmetros. Como objetivo, pretende-se avaliar se as diferenças inerentes à modelagem são significativas a ponto de prejudicar o processo de validação de parâmetros.

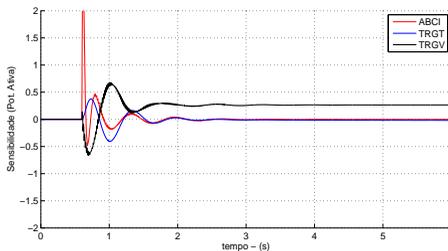


Figura 60 – Sensibilidade de Trajetória - Pot. Ativa (RTDS).

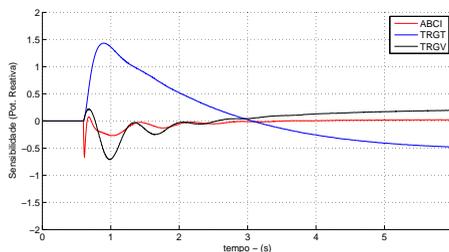


Figura 61 – Sensibilidade de Trajetória - Pot. Reativa (RTDS).

Nota-se que a trajetória de potência reativa para o caso de variação na referência do regulador de tensão (perturbação TRGT) apresentou valores relativamente elevados de desvios. Para os outros casos as discrepâncias foram menos significativas. Essas diferenças podem ser compreendidas como sendo *offsets* nos valores de *fitness* que podem prejudicar a precisão no ajuste de alguns parâmetros.

Os gráficos da Figura 62 apresentam os valores de *fitness* calculados para as simulações usando dados do RTDS<sup>2</sup>. Novamente nota-se que os maiores desvios podem ser visualizados para as simulações de perturbações no sistema de excitação.

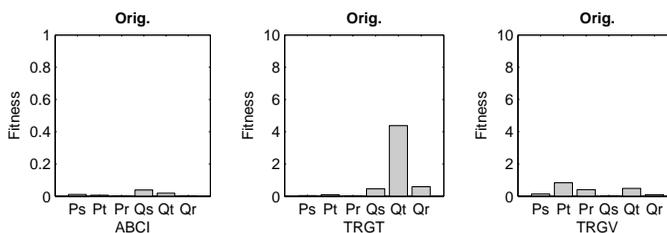


Figura 62 – Fitness - Simulação Híbrida com Parâmetros Originais (RTDS).

Dessa forma, ressalta-se a importância da análise qualitativa como técnica complementar, visto que, a depender do tipo de perturbação, a avaliação apenas dos valores de *fitness* pode ser tendenciosa.

<sup>2</sup>As escalas dos gráficos são as mesmas utilizadas na análise de sensibilidade dos parâmetros no Capítulo 4.

## 5.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram discutidas aplicações e funcionalidades da plataforma RTDS. Uma visão geral da composição do hardware do equipamento bem como da modelagem e *setup* de simulações utilizando o software RS-CAD foi apresentada.

O capítulo contemplou ainda uma análise de sensibilidade das trajetórias obtida via simulação em tempo real. Foi possível verificar que os resultados da simulação híbrida utilizando parâmetros originais apresentaram pequenas diferenças em relação aos sinais obtidos diretamente do simulador em tempo real, em vista das diferenças na modelagem utilizada pelas duas ferramentas (RTDS e SIMSP).

No capítulo seguinte é abordada a realização de um experimento prático, utilizando o simulador para obtenção de dados fasoriais visando a validação e ajuste de modelos seguindo a metodologia proposta no Capítulo 4.

## 6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são apresentados experimentos práticos utilizando o RTDS para obtenção de dados fasoriais. São discutidos resultados referentes a estudos de validação de modelos de unidades geradoras com base na simulação híbrida de perturbações em um sistema de transmissão hipotético conectado a 9 unidades de geração representadas pelos parâmetros dos geradores de Itaipu 60 Hz.

### 6.1 ESTUDO DE CASO: SISTEMA HIPOTÉTICO

A Figura 63 ilustra o sistema-teste utilizado para realização dos estudos de validação de modelos. Trata-se de um sistema simplificado composto por 4 linhas de transmissão conectando 9 unidades geradoras representadas pelos parâmetros das unidades de Itaipu 60 Hz a um barramento infinito. A Figura 64, por sua vez, mostra a representação do sistema-teste no software RSCAD.

As unidades foram modeladas separadamente (G1, G2 e G3 - equivalente de 7 unidades) para possibilitar a aplicação de perturbações nas máquinas de maneira individualizada. A unidade G1 corresponde ao gerador monitorado por uma PMU, da qual são obtidos valores de tensão terminal complexa e derivados valores de potência ativa e reativa da máquina<sup>1</sup>. Os parâmetros utilizados nas simulações são os mesmos apresentados no Capítulo 4.

#### 6.1.1 Tipos de Perturbação

Como base para o estudo de validação foram contemplados os seguintes casos de perturbações:

- Abertura de um dos circuitos do sistema de transmissão - LT4 (ABCI);
- Degrau de 5% na referência do regulador de tensão de uma das unidades da planta de geração - G2 (TRGT);
- Degrau de -30% na referência de potência mecânica da unidade sob estudo - G1 (TRGV);

---

<sup>1</sup>Nas simulações usando RTDS foi possível obter diretamente os valores de potência e tensão terminal a partir das variáveis de monitoramento do bloco máquina síncrona. O ângulo de fase da tensão terminal foi obtido por meio da utilização do componente AngDiff.

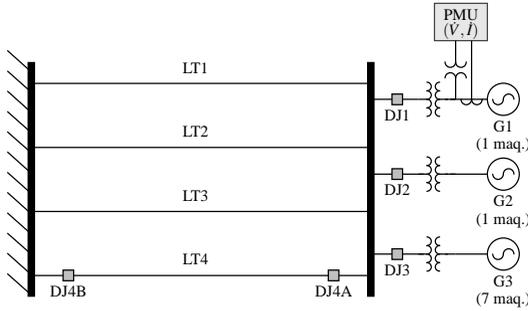


Figura 63 – Sistema Hipotético.

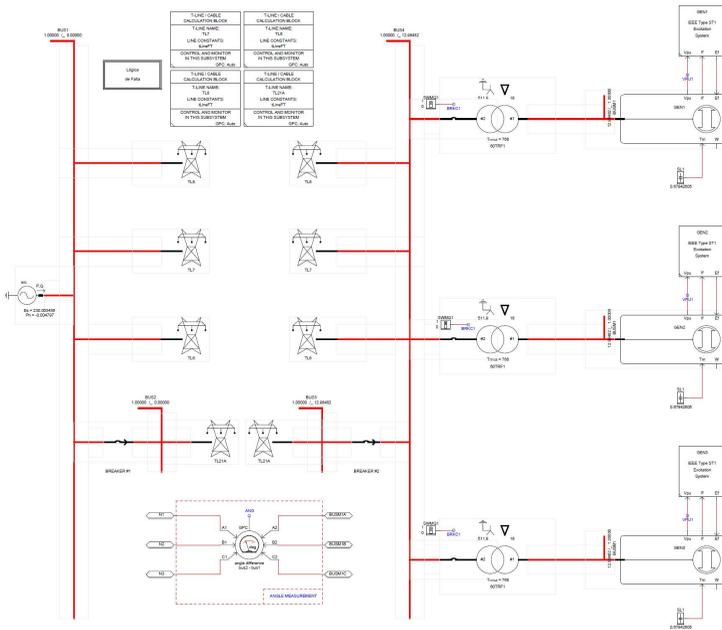


Figura 64 – Sistema Hipotético: Representação no RSCAD.

- Corte de geração em uma das unidades da planta por redução da referência de potência mecânica - G2 (CTMQ).

As Figuras 65, 66, 67 e 68 apresentam dados obtidos a partir do RTDS, juntamente com resultados de simulação híbrida usando parâmetros originais.

Para todos os casos, ilustra-se o comportamento da tensão terminal da unidade geradora e as curvas de potência ativa e reativa.

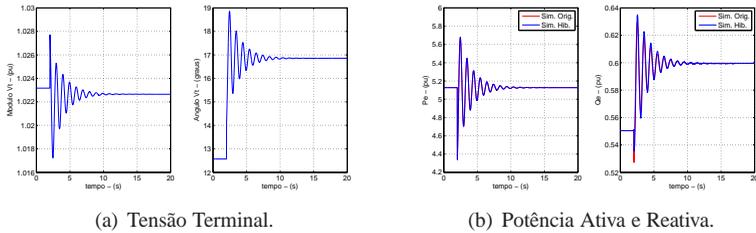


Figura 65 – Sistema Hipotético: Abertura de Circuito - ABCI (RTDS)

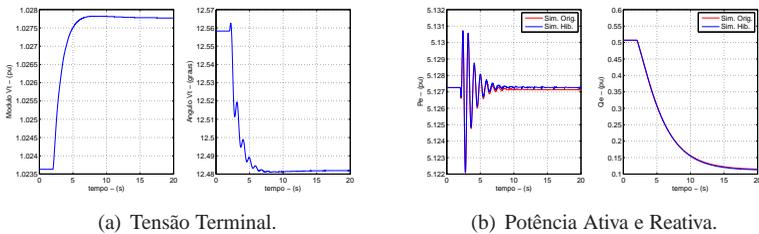


Figura 66 – Sistema Hipotético: Degrau no sist. excitação - TRGT (RTDS).

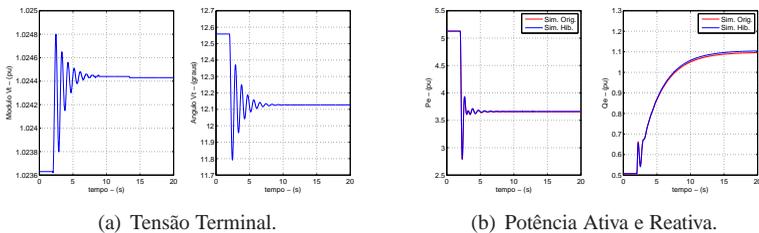


Figura 67 – Sistema Hipotético: Degrau de pot. mecânica - TRGV (RTDS)

Visualmente é possível notar boa aderência entre as curvas obtidas via simulação híbrida e aquelas resultantes da simulação em tempo real via RTDS.

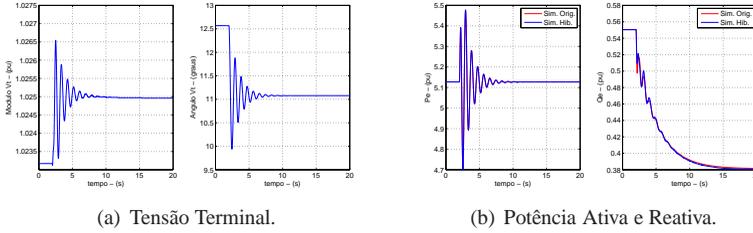


Figura 68 – Sistema Hipotético: Corte de Geração - CTMQ (RTDS).

## 6.2 AJUSTE DE PARÂMETROS DE MODELOS

Nesta seção serão ilustrados casos de ajuste (calibração) de parâmetros com base na metodologia proposta no Capítulo 4. A metodologia contempla a análise dos indicadores de similaridade (*fitness*) além de aspectos qualitativos das trajetórias do sistema.

São apresentados três casos nos quais são alterados parâmetros dinâmicos de maneira proposital, para, posteriormente, serem reajustados seguindo a metodologia proposta. Como objetivo, pretende-se verificar o desempenho da técnica de ajuste.

### 6.2.1 Caso A: Alteração em $X_d$ e $X'_d$

Neste primeiro caso, os valores de  $X_d$  e  $X'_d$  foram alterados ambos em +30%. Os valores utilizados na simulação são listados na Tabela 4 enquanto a Figura 69 apresenta os resultados da simulação híbrida comparados às curvas originais para as perturbações de abertura de circuito (ABCI) e variação na referência de potência mecânica (TRGV). A Tabela 5, por sua vez, lista os valores dos indicadores de similaridade calculados para o caso.

Tabela 4 – Caso A: parâmetros alterados.

Parâmetro	Alteração
$X_d$	1,2337 pu (+30%)
$X'_d$	0,4121 pu (+30%)

Avaliando-se as características das curvas e os valores de *fitness*, verifica-se que as trajetórias de potência ativa resultantes da simulação híbrida são

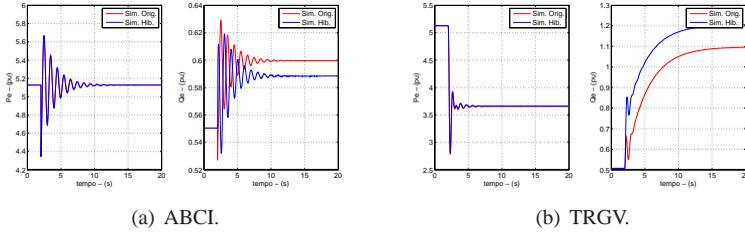


Figura 69 – Caso A: Condição Inicial.

Tabela 5 – Caso A - Condição Inicial (*fitness*).

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0,0012	0,0400	0,0000	1,3434	19,9630	4,5900
TRGV	0,0002	0,0349	0,0285	0,2720	339,6917	239,5058

muito similares àquelas obtidas via RTDS. Dessa forma, seguindo a metodologia proposta, parte-se para o ajuste dos valores de regime da trajetória de potência reativa.

De acordo com o estudo de sensibilidade, os parâmetros que apresentam maior influência sobre a trajetória de  $Q$  durante o regime permanente são  $Ka$  e  $X_d$ . Como primeira tentativa, o valor de  $Ka$  é ajustado de modo que o valor de regime da curva de potência reativa para ABCI seja similar ao valor obtido via RTDS. Os gráficos apresentados na Figura 70a ilustram essa condição ( $Ka = 13$ ).

A Figura 70b, no entanto, revela que o ajuste em  $Ka$  não corrigiu os desvios apresentados na perturbação TRGV. A Tabela 6 apresenta os valores de *fitness* calculados para essa primeira tentativa de ajuste.

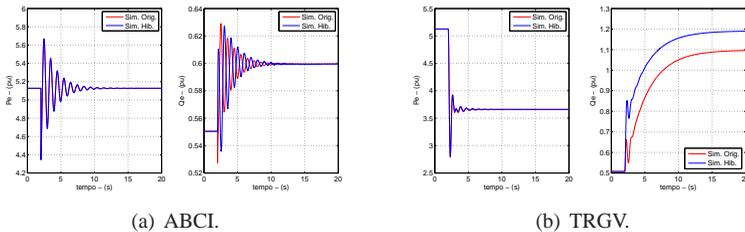


Figura 70 – Caso A: Tentativa 1.

Tabela 6 – Caso A - Tentativa 1 (*fitness*).

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0,0012	0,0404	0,0000	1,3197	17,1462	0,0047
TRGV	0,0002	0,0351	0,0285	0,2720	302,3207	178,2552

Como segunda tentativa, alterou-se o valor de  $X_d$  para 0,94 pu considerando-se o valor original de  $K_a$ . Os resultados, confirmando a validade do novo ajuste, podem ser visualizados na Figura 71 e Tabela 7. Caso novamente não fosse possível o ajuste, deveria-se partir para um ajuste combinado dos parâmetros  $X_d$  e  $K_a$ .

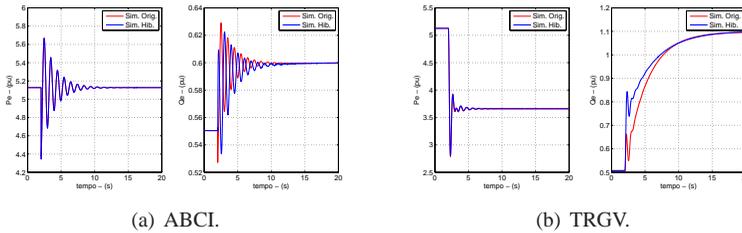


Figura 71 – Caso A: Tentativa 2.

Tabela 7 – Caso A - Tentativa 2 (*fitness*).

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0,0013	0,0403	0,0000	1,2851	17,5340	0,0105
TRGV	0,0002	0,0353	0,0285	0,2653	89,4210	0,0412

Após ajustadas as condições de regime, é necessário corrigir os desvios durante o período transitório da curva de potência reativa. Dentre os parâmetros disponíveis para esse ajuste tem-se:  $T'_{d0}$ ,  $X_q$  e  $X'_d$ . O parâmetro  $X_q$  está associado também a desvios na curva de potência ativa durante o período transitório. Como esse não é o caso, o parâmetro pode ser descartado do conjunto de busca.

Os parâmetros  $X'_d$  e  $T'_{d0}$ , por sua vez, apresentam índices de *fitness* similares entre si com relação à trajetória de potência reativa. Dessa forma, é necessário avaliar qualitativamente o comportamento das trajetórias a fim de se determinar qual o parâmetro mais associado ao desvio.

Com base em uma análise dos gráficos da Figura 71a, nota-se que existe um deslocamento de fase nas oscilações de  $Q$ , característica relacionada a desvios no parâmetro  $X'_d$ . Ajustando-se o valor de  $X'_d$  para 0,32 pu é possível obter resultados satisfatórios para os valores de *fitness* (Figura 72 e Tabela 8).

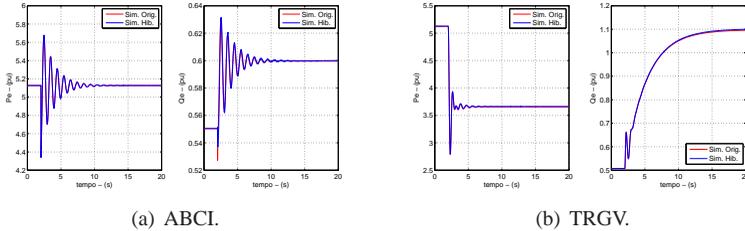


Figura 72 – Caso A: Tentativa 3.

Tabela 8 – Caso A - Tentativa 3 (*fitness*).

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0,0041	0,0010	0,0000	0,0305	0,2731	0,0033
TRGV	0,0009	0,0231	0,0285	0,0005	0,0291	0,2054

Os gráficos da Figura 73 ilustram a evolução dos indicadores de similaridade para as 3 etapas de ajuste considerando as perturbações analisadas (ABCI e TRGV). O resultado do ajuste remete aos valores  $X'_d = 0,94$  pu e  $X'_d = 0,32$  pu.

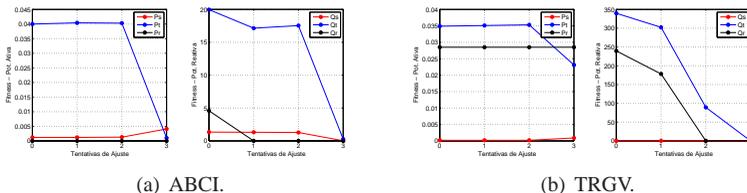


Figura 73 – Caso A - Evolução dos Indicadores de Similaridade.

A Figura 74 ainda expõe resultados de simulações híbridas realizadas utilizando perturbações no sistema de excitação (TRGT) e corte de geração (CTMQ) com objetivo de ilustrar a validade dos parâmetros ajustados.

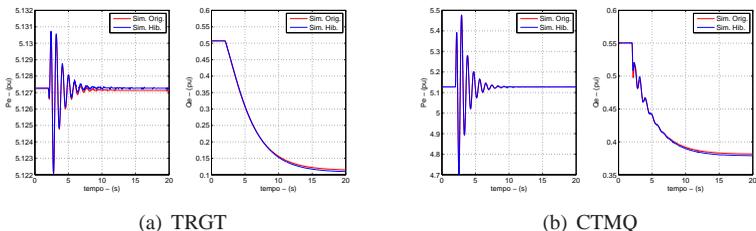


Figura 74 – Caso A: Validação do Ajuste.

### 6.2.2 Caso B: Alteração em $X_q$ , $Ka$ e $H$

Para o Caso B, a Tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros alterados no *setup* do cenário de validação.

Tabela 9 – Caso B: parâmetros alterados.

Parâmetro	Alteração
$X_q$	0,8814 pu (+30%)
$Ka$	12 (+20%)
$H$	3,7723 MJ/MVA (-30%)

Os gráficos da Figura 75 ilustram as trajetórias de potência ativa e reativa, enquanto a Tabela 10 contempla os valores iniciais dos indicadores de similaridade.

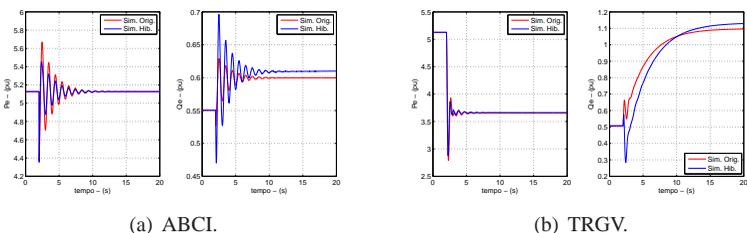


Figura 75 – Caso B: Condição Inicial.

Seguindo a metodologia proposta, o primeiro passo consiste no ajuste das trajetórias de potência ativa. Como opção preferencial tem-se o parâmetro  $H$ , fortemente associado à desvios na curva de  $P$ . Resultados da pri-

Tabela 10 – Caso B - Condição Inicial (*fitness*).

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0,0945	1,5832	0,0003	2,0011	10,1321	3,6191
TRGV	0,3316	2,1020	0,0284	0,2959	171,1437	11,3386

meira tentativa ( $H = 5,5 \text{ MJ/MVA}$ ) são apresentados na Figura 76. Em 76b apresenta-se em detalhe o período transitório de  $P$  para a perturbação TRGV, revelando que, além de  $H$ , outro parâmetro está provocando desvios nos primeiros *swings* da curva de  $P$ . Pela característica qualitativa do desvio pode-se inferir que o parâmetro problemático é  $X_q$ .

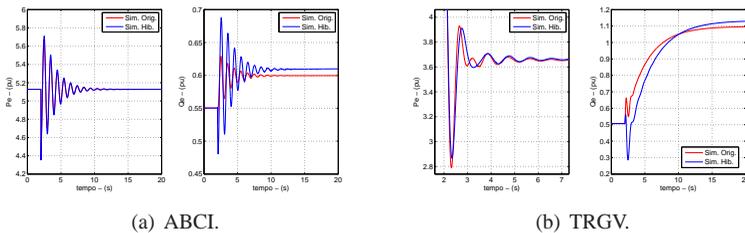


Figura 76 – Caso B: Tentativa 1.

Ajustando-se o valor de  $X_q$  para 0,65 pu é possível obter uma melhor aderência entre as curvas de potência ativa (Figura 77b). Percebe-se ainda que, indiretamente, a curva de potência reativa apresentou melhorias em seu comportamento.

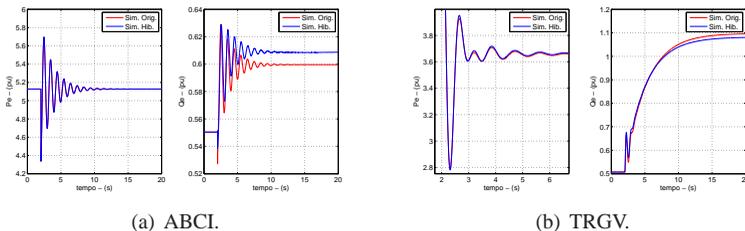


Figura 77 – Caso B: Tentativa 2.

Após ajustadas as curvas de potência ativa, parte-se então para o ajuste do regime permanente das curvas de  $Q$ . Seguindo a metodologia, a primeira

opção é o ajuste do ganho do regulador de tensão. As curvas apresentadas na Figura 78 ilustram os resultados para o ajuste de  $Ka = 10, 1$ .

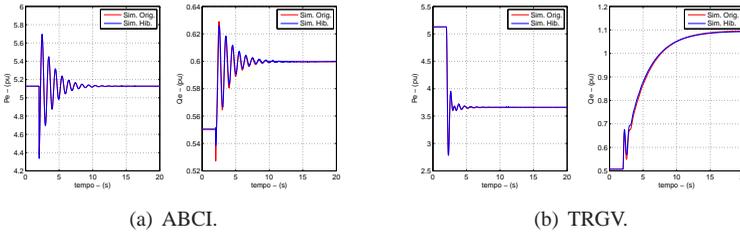


Figura 78 – Caso B: Tentativa 3.

Em 78b, verifica-se um pequeno desvio no comportamento de  $Q$  durante o período transitório. Novamente, dentre as opções disponíveis para ajuste do período transitório de  $Q$  tem-se  $X'd$ ,  $T'_{d0}$  e  $X_q$ . Por meio da avaliação das características qualitativas do desvio verificado é possível levantar as seguintes observações:

- A reatância  $X'_d$  está associada à desvios de fase em oscilações, entretanto, este não é o caso;
- A constante de tempo  $T'_{d0}$  está associada ao tempo de estabilização das trajetórias de  $Q$ , no entanto, este também não é o caso;
- A reatância  $X_q$ , por sua vez, está associada a desvios nos primeiros swings de  $P$  e  $Q$ , portanto, é o parâmetro candidato a ser calibrado.

As curvas apresentadas na Figura 79 revelam o comportamento de  $Q$  para o novo valor de  $X_q = 0,68$  pu.

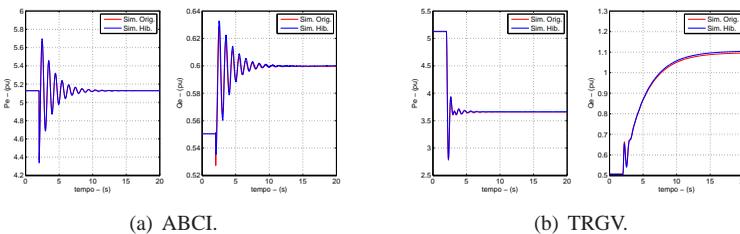


Figura 79 – Caso B: Tentativa 4.

O ajuste em  $X_q$ , no entanto, provocou novamente desvios em regime da curva de potência reativa. O valor de  $Ka$  foi reajustado para 11, apresentando bons resultados para a perturbação TRGV, mas piorando a similaridade das curvas de abertura de circuito (tentativa 5). Dessa forma passou-se para a segunda opção de ajuste de  $Q$  em regime,  $X_d$ .

As curvas apresentadas na Figura 80 ilustram o comportamento das trajetórias após um ajuste de  $X_d$  para 0,94 pu.

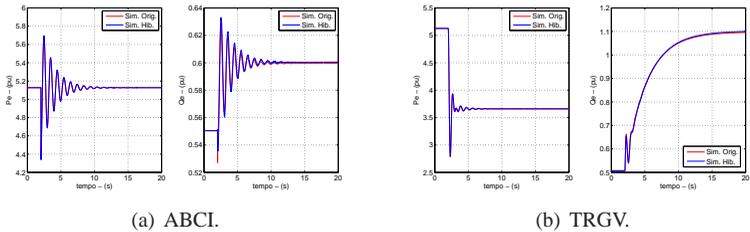


Figura 80 – Caso B: Tentativa 6

A Tabela 11 sumariza os valores dos parâmetros ajustados enquanto a Figura 81, por sua vez, apresenta a evolução dos índices de similaridade em função das diversas tentativas.

Tabela 11 – Caso B: parâmetros ajustados.

Parâmetro	Ajuste
$X_q$	0,68 pu
$Ka$	10,1
$H$	5,5 MJ/MVA
$X_d$	0,94 pu

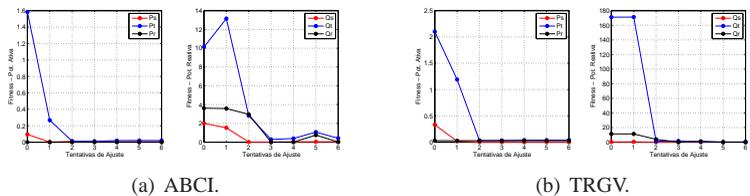


Figura 81 – Caso B - Evolução dos Indicadores de Similaridade

Por fim, a Figura 82 ainda ilustra resultados da simulação híbrida usando os parâmetros obtidos no processo de ajuste, porém, com base em outras perturbações (TRGT e CTMQ). Em ambos os casos nota-se boa coerência entre as curvas originais e aquelas geradas via simulação híbrida com parâmetros ajustados.

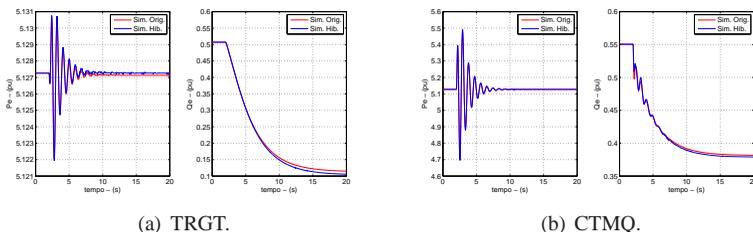


Figura 82 – Caso B: Validação do Ajuste.

### 6.2.3 Caso C: Alteração em $X_d$ , $X_q$ , $X'_d$ , $Ka$ , $H$ e $T'_{d0}$

O caso C contempla um cenário em que 6 parâmetros da unidade geradora são alterados em +30%. A Tabela 12 lista os valores modificados para cada parâmetro.

Tabela 12 – Caso C: parâmetros alterados.

Parâmetro	Alteração
$X_d$	1,2337 pu (+30%)
$X_q$	0,8814 pu (+30%)
$X'_d$	0,4121 pu (+30%)
$Ka$	13 (+30%)
$H$	7,0057 MJ/MVA (+30%)
$T'_{d0}$	11,05 s (+30%)

Na Figura 83 são ilustrados os resultados da simulação híbrida levando em conta os desvios nos parâmetros para os casos de abertura de circuito (ABCI) e degrau na referência de potência mecânica da unidade sob estudo (TRGV).

A Tabela 13, por sua vez, contempla os valores de *fitness* calculados para simulações usando os parâmetros descalibrados. A partir da análise dos

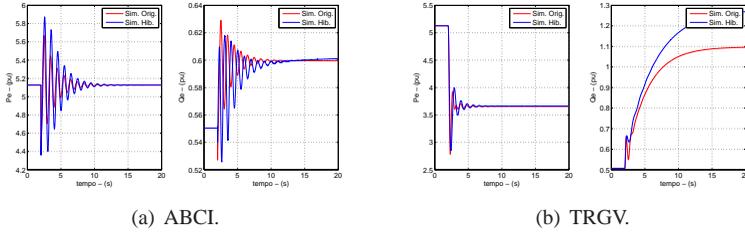


Figura 83 – Caso C: Condição Inicial.

valores de *fitness* nota-se que, para a perturbação ABCI, os efeitos dos desvios em  $X_d$  e  $Ka$  acabam sendo compensados, o que resulta em praticamente nenhum desvio em regime permanente. Os resultados para TRGV, no entanto, evidenciam potenciais problemas nos parâmetros associados ao regime permanente de  $Q$ .

Tabela 13 – Caso C - Condição Inicial (*fitness*).

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0.0106	7.8636	0.0028	0.1630	20.0777	0.0349
TRGV	0.2985	8.3393	0.0284	0.0743	79.8880	444.6030

Novamente, de acordo com a metodologia de ajuste, preferencialmente são ajustados os parâmetros que provocam desvios na trajetória de potência ativa do sistema, quais sejam:  $H$  (tentativa 1) e  $X_q$  (tentativa 2). Após alterações sequenciais nos dois parâmetros seguindo os mesmos critérios adotados para o caso B, obtém-se o resultado apresentado pela Figura 84 e pela Tabela 14. Os valores ajustados são  $H = 5$  MJ/MVA e  $X_q = 0,70$  pu.

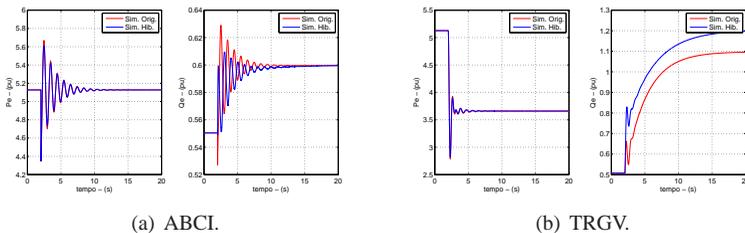


Figura 84 – Caso C: Tentativa 2.

Tabela 14 – Caso C - Tentativa 2 (*fitness*)

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0.0048	0.0739	0.0000	0.9546	11.7904	0.0229
TRGV	0.0127	0.1337	0.0285	0.3200	169.1016	168.9452

Após o ajuste da trajetória de  $P$ , o próximo passo é o ajuste dos parâmetros associados à resposta da potência reativa em regime permanente. Neste ponto, cabe observar que a perturbação ABCI não expõe as divergências nos parâmetros. Dessa forma, a perturbação TRGV é usada para evidenciar desvios combinados nos parâmetros associados ao regime permanente.

Essa informação é importante pois reduz o horizonte de busca, ou seja, os parâmetros  $X_d$  e  $K_a$  serão alterados de maneira conjunta no mesmo sentido já que possuem efeitos opostos nas trajetórias. Como primeira opção (tentativa 3), os valores de  $X_d$  e  $K_a$  foram aumentados para 1,40 pu e 15, respectivamente. Essa alteração, no entanto, aumentou ainda mais os valores de *fitness*<sup>2</sup>.

Na tentativa 4 os valores de  $X_d$  e  $K_a$  foram reduzidos para 1,05 pu e 11, respectivamente. Neste caso melhores resultados foram obtidos. O ajuste do regime permanente da trajetória de  $Q$  foi concluído após a alteração dos parâmetros  $X_d$  e  $K_a$  para 0,95 pu e 10,2 (tentativa 5 - Figura 85 e Tabela 15).

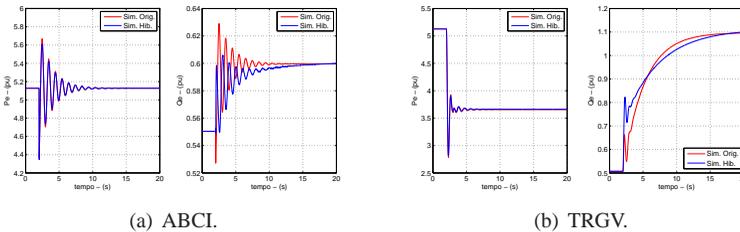


Figura 85 – Caso C: Tentativa 5.

Analisando o comportamento da Figura 85 e os valores da Tabela 15, conclui-se que existem “resíduos” no valor de *fitness* de  $Q$  no regime permanente para TRGV (3,2031) associados, no entanto, a desvios em parâmetros relacionados ao período transitório da trajetória. As tendências para os valores de regime, por sua vez, apresentam boa similaridade com o caso original.

<sup>2</sup>É importante salientar que a verificação dos valores de *fitness* e a análise qualitativa não pode ser baseada em apenas um tipo de perturbação, já que os efeitos da alteração de um parâmetro podem ser compensados pela alteração em outro.

Tabela 15 – Caso C - Tentativa 5 (*fitness*).

Perturbação	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0.0048	0.0737	0.0000	0.9323	12.9092	0.0888
TRGV	0.0128	0.1316	0.0285	0.3141	57.0007	3.2031

De acordo com a metodologia de ajuste, o parâmetro a ser ajustado para correção dos desvios no período transitório é  $X'_d$ , visto que as oscilações obtidas na simulação híbrida apresentam desvio de fase em relação aos valores originais. Após o ajuste de  $X'_d$  para 0,30 pu são obtidos os resultados apresentados na Figura 86.

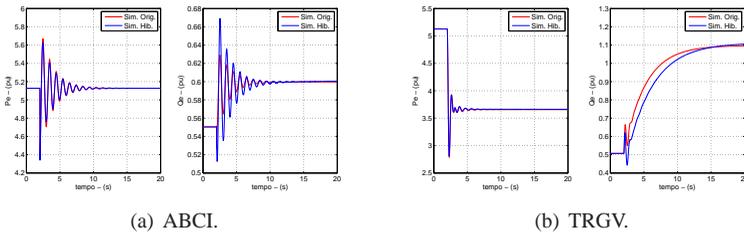


Figura 86 – Caso C: Tentativa 6.

Apesar da correção no desvio de fase das oscilações em ABCI, a curva de  $Q$  da perturbação TRGV ainda revela discrepâncias no período transitório. Seguindo a metodologia, a próxima opção para ajuste é o parâmetro  $T'_{d0}$ , corrigido para 9 segundos (tentativa 7). O parâmetro  $X'_d$  também passou por um ajuste fino para contemplar a correção da amplitude das oscilações em  $Q$  para ABCI (tentativa 8).

Por fim, com o objetivo de melhorar a resposta em regime para a perturbação TRGV os parâmetros  $X_d$  e  $Ka$  foram reajustados para os valores 0,94 pu e 10,1 respectivamente (tentativa 9). As curvas da Figura 87 ilustram o desempenho da simulação híbrida com base nos novos valores dos parâmetros, enquanto a Tabela 16 mostra os valores de *fitness* obtidos ao final do procedimento de ajuste.

Os gráficos da Figura 88 contemplam a evolução dos índices de similaridade para os dois casos de perturbação analisados com base nas várias etapas do ajuste.

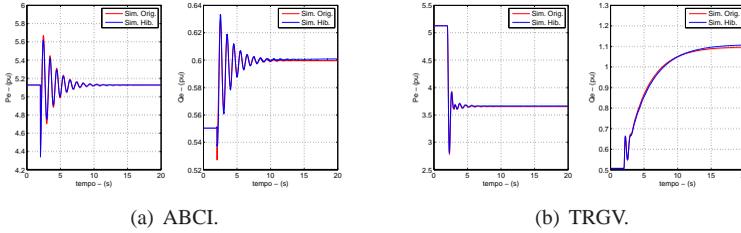


Figura 87 – Caso C: Tentativa 9.

Tabela 16 – Caso C - Tentativa 9 (*fitness*)

Perturb.	$P_s$	$P_t$	$P_r$	$Q_s$	$Q_t$	$Q_r$
ABCI	0,0200	0,1975	0,0285	0,0074	0,9345	1,0240
TRGV	0,0433	0,0894	0,0157	0,0748	1,1421	1,8240

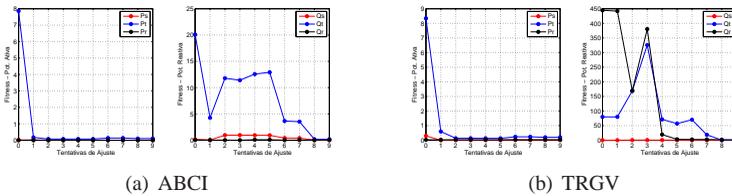


Figura 88 – Caso C - Evolução dos Indicadores de Similaridade.

A Tabela 17 lista os valores dos parâmetros após o procedimento de ajuste.

Tabela 17 – Caso C: parâmetros ajustados.

Parâmetro	Valores Ajustados
$X_d$	0,945 pu
$X_q$	0,70 pu
$X'_d$	0,33 pu
$K_a$	10,1
$H$	5,0 MJ/MVA
$T'_{d0}$	9 s

Novamente, com o objetivo de validar o processo de ajuste, foram utilizados dados de perturbações distintas (TRGT e CTMQ) para verificar o novo comportamento do modelo. A Figura 89 ilustra o êxito no processo de ajuste dos parâmetros.

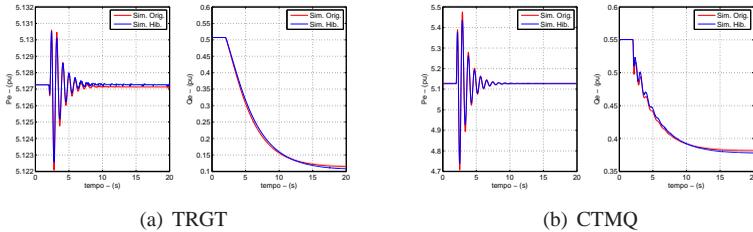


Figura 89 – Caso C: Validação do Ajuste

## 6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados experimentos computacionais com base em dados obtidos via RTDS. Utilizando um sistema hipotético, foram elaborados cenários considerando desvios propositalmente nos parâmetros de unidades geradoras. Seguindo a metodologia de ajuste manual proposta no Capítulo 4, os parâmetros tiveram seus valores ajustados com o objetivo de minimizar os valores de *fitness*.

Com relação ao procedimento de ajuste, verificou-se que existe certa dificuldade no ajuste de parâmetros cuja influência se sobrepõe a desvios provocados por outros parâmetros. Nesses casos, ficou evidente a necessidade de se avaliar características qualitativas das trajetórias para identificar o parâmetro descalibrado.

Neste ponto, podem ser destacados os parâmetros  $X_d$  e  $K_a$ , ambos associados à desvios no regime permanente de  $Q$ . Dificuldades foram encontradas no ajuste desses parâmetros, justamente em função da forte correlação de seus efeitos sobre as trajetórias do sistema. De fato, mesmo com base em uma análise qualitativa é difícil determinar qual dos parâmetros (ou combinação deles) é o causador de desvios em regime permanente. Vale lembrar que esse comportamento prejudica inclusive o desempenho de algoritmos de otimização, visto que pode ser caracterizado como mal condicionamento numérico do problema de otimização.

Outro ponto que merece destaque é o fato de que efeitos de alterações em  $X_d$  podem compensar desvios em  $K_a$ , causando a falsa impressão de que

os parâmetros estão calibrados. Felizmente, situações como esta podem ser testadas por meio da análise de outros tipos de perturbações.

Além disso, ficou evidente a importância de seguir uma sequência durante o processo de ajuste. O parâmetro  $X_q$ , por exemplo, está associado às trajetórias de potência ativa e reativa no período transitório. Verificou-se que, inicialmente, é vantajoso realizar o ajuste em função dos desvios na curva de potência ativa, entretanto, eventualmente pode ser necessário um ajuste fino com base na trajetória de potência reativa do sistema (caso B).

## 7 CONCLUSÕES

A preocupação com a qualidade dos modelos dinâmicos utilizados em sistemas de potência vem aumentando à medida que as redes elétricas são expandidas e a complexidade de operação aumenta. De fato, a ausência de bons modelos para representar a estrutura de fornecimento de energia elétrica dá margem a má utilização dos equipamentos, bem como, impede o conhecimento dos reais limites de operação dos sistemas elétricos.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de medição em sistemas de potência (SPMS) baseadas em técnicas de sincronização na aquisição de dados e taxas de amostragem elevadas, abre-se um horizonte de aplicações para melhoria da operação de sistemas de energia. Dentre as diversas possibilidades podem ser destacadas aplicações *on-line* de monitoramento, controle e proteção sistêmica; e aplicações *off-line*, que contemplam estudos de análise de perturbações e validação de modelos de simulação.

Neste contexto, o trabalho apresentou um estudo da utilização de dados de sistemas de medição fasorial sincronizada na validação de modelos dinâmicos de unidades geradoras por meio da aplicação da técnica de Simulação Dinâmica Híbrida.

Inicialmente, no Capítulo 2 foram apresentados os equipamentos que compõem os sistemas de medição fasorial sincronizada, as potenciais aplicações da tecnologia, bem como um breve histórico da evolução dos SPMS nos Estados Unidos e descrição da situação atual dos sistemas implementados no Brasil.

Com relação à validação de modelos, foram destacados diversos eventos (perturbações) no sistema norte-americano que impulsionaram estudos no sentido de melhoria dos modelos utilizados em estudos elétricos. São relatados também experimentos realizados na China, em que curto-circuitos foram propositalmente provocados em sistemas de transmissão em 500 kV objetivando obter dados para estudos de validação de modelos. Foram discutidos ainda resultados de iniciativas pioneiras de validação sistêmica de modelos no Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN) com base em dados obtidos dos protótipos de medição fasorial sincronizada desenvolvidos no âmbito do projeto MedFasee.

No Capítulo 3 foram apresentadas as potenciais aplicações da simulação híbrida no que diz respeito à validação de modelos de subsistemas. Foram ressaltadas as vantagens inerentes à técnica, que permite a injeção de sinais obtidos de sistemas reais em modelos de simulação. Discutiu-se ainda a formulação matemática da técnica de simulação híbrida e o desenvolvimento de um protótipo computacional para implementação da ferramenta de simulação.

Por fim, foi contemplada a integração dos dados fasoriais à ferramenta de simulação híbrida definindo-se quais as grandezas elétricas a serem analisadas no processo de validação de modelos.

Utilizando o protótipo desenvolvido, no Capítulo 4 foi realizada uma investigação exaustiva da sensibilidade das grandezas resultantes do processo de simulação híbrida (potência ativa e reativa) em relação à desvios nos valores dos parâmetros dinâmicos de unidades geradoras para diferentes perturbações. No desenvolvimento dessa atividade foram adotadas duas abordagens: análise quantitativa, por meio da aplicação da técnica de sensibilidade de trajetória e pela definição de índices de similaridade (*fitness*); e análise qualitativa, levantando características peculiares relacionadas a variações nos valores dos parâmetros.

Em função dos valores obtidos para os índices de similaridade (*fitness*), foi possível identificar comportamentos específicos associados a desvios nos parâmetros analisados, ou seja, determinar a trajetória e o período (sub-transitório, transitório ou regime) sobre os quais os parâmetros possuem maior influência. Além disso verificou-se que o efeito de desvios dos parâmetros nas curvas de potência ativa e reativa estão associadas ao tipo de perturbação utilizada nas simulações. De fato, diferentes tipos de perturbações excitam o sistema de modo que parâmetros descalibrados afetem em maior ou menor grau as trajetórias analisadas. Dessa forma, para garantir a confiabilidade do processo de validação é importante que sejam realizados estudos considerando eventos distintos que perturbem o sistema de forma complementar.

As conclusões geradas nos estudos de sensibilidade serviram então para a proposição de uma metodologia baseada em regras para o ajuste manual de parâmetros de unidades geradoras. A metodologia prevê a correção dos parâmetros de acordo com as características das trajetórias obtidas via simulação híbrida.

No Capítulo 5 foi apresentada a plataforma de simulação em tempo real RTDS. Foram listadas as potenciais aplicações da ferramenta no que tange a testes de equipamentos de proteção, controle e monitoramento de sistemas de potência. Neste capítulo, ainda foram abordados, de maneira simplificada, os principais componentes do hardware do equipamento, assim como os módulos do software RSCAD utilizados para modelagem e gerenciamento de simulações.

No contexto deste trabalho, a utilização do RTDS possibilitou uma representação mais detalhada dos componentes dos sistemas de potência, em contraste aos dados obtidos com softwares de estabilidade transitória, como SIMSP e ANATEM. Além disso, o simulador permite que equipamentos como PMUs sejam conectadas aos amplificadores do equipamento possibi-

litando a captura de comportamentos muito similares a sistemas reais, sendo assim caracterizado como um ambiente de testes promissor para aplicações de SPMS.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentados experimentos computacionais utilizando a plataforma RTDS para obtenção de dados para estudos de validação de parâmetros dinâmicos de unidades geradoras. Com base em perturbações aplicadas a um sistema hipotético, foram apresentados três estudos de caso em que parâmetros foram propositalmente alterados e reajustados utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 4. O procedimento mostrou-se adequado para a correção dos parâmetros que apresentam maior influência nas trajetórias de potência ativa e reativa, no entanto, parâmetros cujas influências são similares entre si apresentaram maiores dificuldades no ajuste, como o caso dos pares  $X_d/Ka$  e  $H/X_q$ .

Novamente é importante salientar a necessidade de se avaliar perturbações distintas quando da validação de modelos, visto que a sensibilidade das trajetórias em relação aos parâmetros difere em função da perturbação aplicada.

A realização dos estudos de sensibilidade possibilitou vislumbrar a complexidade do problema associado à identificação de parâmetros dinâmicos. Pôde-se constatar que a solução do problema de otimização deve levar em conta diversos tipos de perturbações no sentido de minimizar as chances de obtenção de mínimos locais. Dessa forma, é possível desenhar uma ferramenta que, recebendo como entrada vários registros de perturbações, seja capaz de determinar o conjunto de parâmetros que minimize os índices de similaridade (*fitness*).

Cabe ressaltar, no entanto, que o problema a ser resolvido toma proporções significativas quando se considera o fato de que para cada iteração é necessário realizar no mínimo uma simulação híbrida para cada caso de perturbação. Além disso, para aplicação em sistemas reais, é necessária a representação completa dos controladores associados às unidades geradoras (reguladores de velocidade, reguladores de tensão e estabilizadores de potência), aumentando consideravelmente o espaço de busca e, conseqüentemente, o tempo para convergência do método.

É importante destacar ainda, que o procedimento de validação de subsistemas utilizando simulação híbrida deve ser encarado como uma etapa complementar aos ensaios realizados durante comissionamentos, a partir dos quais valores iniciais para os parâmetros são derivados. Além disso, após a validação de modelos individualizados, os sistemas como um todo devem passar por um processo de validação sistêmica (*System Wide Model Validation*) para uma avaliação global do sistema, envolvendo a caracterização de modos de oscilação inter-área, *mode shapes* e fatores de participação.

Por fim, pode-se ainda comentar a respeito das tendências para a próxima versão da norma internacional de sincrofasores (IEEE C37.118.1). Destaca-se a inclusão de requisitos de desempenho para PMUs para o cálculo de fasores durante transitórios, além do incentivo à utilização de maiores taxas de amostragem nos equipamentos de medição fasorial, fatos que vem ao encontro das necessidades de aplicações de validação de modelos.

## 7.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Dentre as principais contribuições do trabalho podem ser destacados os seguintes itens:

- Revisão bibliográfica acerca dos sistemas de medição fasorial sincronizada e estudos relacionados à validação de modelos dinâmicos de sistemas de potência;
- Realização de estudo teórico, documentação e implementação computacional da técnica de simulação dinâmica híbrida utilizando dados fasoriais, além da demonstração prática de sua viabilidade para aplicação na validação de subsistemas;
- Investigação da sensibilidade das curvas de potência ativa e reativa em relação à influência de desvios nos parâmetros dinâmicos de unidades geradoras por meio de análise quantitativa;
- Proposição do cálculo de *fitness* considerando indicadores distintos para os diferentes períodos da resposta dinâmica de geradores (sub-transitório, transitório e regime permanente);
- Identificação de características particulares das trajetórias de sistema de potência associadas a desvios nos parâmetros de unidades geradoras por meio de avaliação qualitativa;
- Desenvolvimento de metodologia para ajuste manual de parâmetros de unidades geradoras baseada nos resultados dos estudos de sensibilidade aos parâmetros;
- Estudo da ferramenta computacional de simulação em tempo real (RTDS) e utilização do equipamento para obtenção de dados fasoriais para estudos de caso de ajuste de parâmetros.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros na área sugere-se a realização das seguintes atividades:

- Realização de estudos de validação de modelos com base em dados obtidos de equipamentos de medição fasorial (PMUs) conectados à sistemas de potência reais ou ferramentas de simulação em tempo real;
- Extensão da análise de sensibilidade a parâmetros de modelos detalhados de controladores associados a unidades geradoras: reguladores de tensão, reguladores de velocidade e estabilizadores de sistemas de potência;
- Análise da influência de parâmetros não-lineares nas trajetórias de potência ativa e reativa (limitadores e curvas de saturação);
- Verificação da influência dos erros (ruídos) da cadeia de medição das PMUs no desempenho da técnica de simulação híbrida e na metodologia de ajuste proposta;
- Estudos de validação de modelos de carga utilizando a técnica de simulação dinâmica híbrida;
- Realização de estudos e implementação de algoritmos de otimização numérica para solução do problema de identificação de parâmetros de modelos dinâmicos de unidades geradoras baseado em registros de medição fasorial sincronizada.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, M. N. *Nova Filosofia para o Projeto de Software para Sistemas de Energia Elétrica usando Modelagem Orientada a Objetos*. Tese (Doutorado) — UFSC, 2002.

AGOSTINI, M. N. *Estudos de Aplicação de Medição Fasorial Sincronizada em Sistemas de Energia Elétrica - Programa de Pós-Doutorado Júnior - PDJ*. [S.l.], 2006.

AGRAWAL, B.; KOSTEREV, D. Model validation studies for a disturbance event that occurred on June 14 2004 in the Western Interconnection. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.

ALLEN, E.; KOSTEREV, D.; POURBEIK, P. Validation of power system models. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010.

ARRILLAGA, J.; ARNOLD, C. P.; HARKER, B. J. *Computer Modelling of Electrical Power Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1983.

BENETTI, M. A. *Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em Metodologias de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

BHARGAVA, S.; A., B. S. Synchronized measurement and analysis in real time SMART - system at Southern California Edison (SCE) Co. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2008.

BI, T. et al. Large scale power system simulation and PMU testing using a real time digital simulator. *The 8th International Power Engineering Conference (IPEC)*, 2007.

BO, Z. Q. et al. A real time digital simulator system for testing of integrated protection schemes. *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference (POWERCON)*, 2008.

BURTH, M.; VERGHESE, G. C.; VÉLES-REYES, M. Subset selection for improved parameter estimation in on-line identification of a synchronous generator. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999.

CEPEL. *Programa ANATEM - Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário*. [S.l.], 2006.

CERTS. Functional specifications for NASPI RTDMS enhancements (version 5). Jan. 2005.

CHEN, X. et al. On-line identification of synchronous generator parameters from large disturbance testing data. *International Conference on Power System Technology, POWERCON*, 1998.

CHEN, Y. et al. A new approach to real time measurement of power angles of generators at different locations for stability control. *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, v. 2, p. 1237–1242 vol.2, 2000.

CIGRE. Wide area monitoring and control for transmission capability enhancement. Agosto 2007.

CIPRIANI, E.; COSTA, A. J. A. S. Análise de observabilidade e criticidade de medidas na estimação de estados em sistemas de potência considerando medições fasoriais sincronizadas. *Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Bonito, MS*, Setembro 2010.

DAGLE, J. E. North American Synchrophasor Initiative - an update of progress. *IEEE 42nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2009.

DECKER, I. et al. System wide model validation of the Brazilian interconnected power system. *Power and Energy Society General Meeting*, 2010.

DECKER, I. C. et al. Applications of a synchronized phasor measurements system in Southern Brazil. *Anais do X Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - SEPOPE*, 2006.

DECKER, I. C. et al. Performance of a synchronized phasor measurements system in the Brazilian power system. *IEEE - Power Engineering Society General Meeting*, p. 18-22, June 2006.

DECKER, I. C.; SILVA, A. S. e. Dinâmica de sistemas de energia elétrica. *Notas de Aula*, 2006.

DOMMEL, H. W. Digital computer solution of eletromagnetic transients in single and multiphase networks. *IEEE Trans. App. Syst.*, 1969.

DOTTA, D. *Controle hierárquico usando sinais de medição fasorial sincronizada*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

DOTTA, D.; SILVA, A. S.; DECKER, I. C. Wide-area measurements-based two-level control design considering signal transmission delay. *Transactions on Power Systems, IEEE*, Feb. 2009.

EHRENSPERGER, J. G. *Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

ERNST, D. et al. Real-time transient stability emergency control of the South-Southeast Brazilian system. *VI Simpósio de Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência*, 1998.

FORSYTH, P. et al. Comparison of transient stability analysis and large-scale real time digital simulation. *IEEE Porto Power Tech Conference*, 2001.

GAMMA, E.; HELM, R.; JOHNSON, R. *Padrões de Projeto: Soluções Reutilizáveis de Software Orientado a Objetos*. [S.l.]: Bookman, Porto Alegre, 2000.

GPA. *openPDC - Phasor Data Concentrator*. 2010.  
<<http://openpdc.codeplex.com/>> - Grid Power Alliance. acesso em 25 de setembro de 2010.

HAUER, J. Application of Prony analysis to the determination of modal content and equivalent models for measured power system response. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 6, n. 3, p. 1062–1068, Aug 1991. ISSN 1558-0679.

HAUER, J. F.; BESHIR, M. J.; MITTELSTADT, W. A. Dynamic performance validation in the Western power system. *WSCC Performance Validation Task Force - APEX 2000, Kananaskis - Alberta*, 2000.

HISKENS, I. Nonlinear dynamic model evaluation from disturbance measurements. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 4, p. 702–710, Nov 2001. ISSN 1558-0679.

HUANG, Y.; XU, Z. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units. *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, p. 668–672 vol.2, Oct. 2004.

HUANG, Z. et al. Application of extended Kalman filter techniques for dynamic model parameter calibration. *IEEE Power and Energy Society General Meeting - New Techniques for Synchronized Phasor Data Analysis*, 2009.

- HUANG, Z.; GUTTROMSON, R. T.; HAUER, J. F. Large-scale hybrid dynamic simulation employing field measurements. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004.
- HUANG, Z. et al. Model validation with hybrid dynamic simulation. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, p. 9 pp.–, June 2006.
- HUANG, Z. et al. Model validation of power system components using hybrid dynamic simulation. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, p. 9 pp.–, June 2007.
- HUANG, Z.; YANG, B.; KOSTEREV, D. Benchmarking of planning models using recorded dynamics. *IEEE Power and Energy Society Power Systems Conference and Exposition 2009, Seattle, WA, 2009*.
- IEEE. *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines Part II - Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis*. [S.l.], 1993.
- IEEE. *IEEE C37.118 - Standard for Synchrophasors for Power Systems*. [S.l.], 2005.
- IEEE. Pc37.118.1 standard for synchrophasor measurements for power systems - draft. *IEEE Power Engineering Society - Power System Relaying Committee*, p. 476–479, 2010.
- ITAIPU. *Resultados dos Ensaios de Aceitação do Gerador U08 da Usina de Itaipu*. [S.l.], 1993.
- JAHROMI, M. E.; FIROUZI, B. B.; RANJBAR, A. M. Possibility of large synchronous generator parameters estimation via on-line field tests using genetic algorithm. *IEEE Power India Conference*, 2006.
- KOSTEREV, D. Hydro turbine-governor model validation in Pacific Northwest. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 2, p. 1144–1149, May 2004. ISSN 1558-0679.
- KOSTEREV, D.; DAVIES, D. System model validation studies in WECC. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010.
- KOSTEREV, D.; TAYLOR, C.; MITTELSTADT, W. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 3, p. 967–979, Aug 1999. ISSN 1558-0679.
- KUFFEL, R. et al. Rtds - a fully digital power system simulator operating in real time. *IEEE Catalogue No. 95TH8130*, 1995.

KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.

LIRBUKT, A.; BREIDABLIK, O.; GJERDE, J. O. Deployment of a scada integrated wide area monitoring system. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2008.

LIU, C. W. Phasor measurement applications in Taiwan. *IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific*, p. 490–493, October 2002.

LIU, S.; MESSINA, A.; VITTAL, V. Characterization of nonlinear modal interaction using normal forms and Hilbert analysis. *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, p. 1113–1118 vol.2, Oct 2004.

MA, J. et al. Wide area measurement-based model validation and its application. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2008.

MANZONI, A. *Desenvolvimento de um Módulo Dinâmico para Simuladores de Ensino e Treinamento em Sistemas de Energia Elétrica usando Programação Orientada a Objetos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

MARTÍNEZ, H.; JUÁREZ, N.; GUZMÁN, A. Using synchronized phasor angle difference for wide-area protection and control. *Comisión Federal de Electricidad (CFE), México and Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) Inc.*, 2006.

MCLAREN, P. G. et al. A real time digital simulator for testing relays. *Transactions on Power Delivery, IEEE*, 1992.

MEDFASÉE. *Sistema de Medição Fasorial Sincronizada com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica - MedFasee*. [S.l.], 2006.

NERC. Power system model validation - white paper (draft). *NERC Model Validation Task Force of the Transmission Issues Subcommittee*, May 2010.

NERC. Real-time application of synchrophasors for improving reliability - final draft. 2010.

NIGLYE, N. et al. Considerations for the application of synchrophasors to predict voltage instability. *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2006. PS '06*, p. 169–172, March 2006.

- PEREIRA, L. et al. A new thermal governor modeling approach in the WECC. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003.
- PEREIRA, L. et al. Generating unit model validation: WECC lessons and moving forward. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09.*, 2009.
- PESENTE, J. R. *Estudo da Utilização de Medição Sincronizada de Fasores para o Esquema de Controle de Emergência do Sistema de Transmissão de Itaipu em 60Hz*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- PESENTE, J. R.; DECKER, I. C.; SILVA, A. S. e. Estudo da utilização de medição sincronizada de fasores para o esquema de controle de emergência do sistema de transmissão de Itaipu em 60 hz. *X STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle*, Outubro 2010.
- PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements: A historical overview. *IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, p. 476–479, October 2006.
- PHADKE, A. G. et al. Synchronized sampling and phasor measurement for relaying and control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, January 1994.
- POURBEIK, P. Approaches to validation of power system models for system planning studies. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010.
- POURBEIK, P.; AGRAWAL, B. Hybrid model for representing air-conditioner compressor motor behavior in power system studies. *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, July 2008.
- RASMUSSEN, J.; JORGENSEN, P. Synchronized phasor measurements of a power system event in Eastern Denmark. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006.
- RICE, M.; HEYDT, G. T. *Phasor Measurement Unit Data in Power System State Estimation*. [S.l.], 2005.
- ROSE, J.; HISKENS, I. A. Estimating wind turbine parameters and quantifying their effects on dynamic behavior. *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
- RTDS. *Real Time Digital Simulator - Power System Users Manual*. [S.l.], 2006.

RTDS. *Real Time Digital Simulator - Tutorial Manual (RSCAD Version)*. [S.l.], 2008.

RTDS. *Real Time Digital Simulator - Hardware Manual*. [S.l.], 2009.

SAITOH, H. GPS synchronized measurement applications in Japan. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific*, 2002.

SAMUELSSON, O. et al. Power system damping in Iceland based on phasor measurements. *International Conference on Power Systems and Communications Systems Infrastructures for the Future*, 2002.

SANTOS, M. M. *Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência usando dados de Medição Fasorial Sincronizada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

SANTOS, M. M.; DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N. Análise de fatores de participação e mode shapes usando dados de medição fasorial sincronizada. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, Belém, PA*, 2010.

SHENG, M. et al. A new framework for estimation of generator dynamic parameters. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000.

SHI, B.; XIE, X.; HAN, Y. WAMS-based load shedding for systems suffering power deficit. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, p. 1–6, 2005.

SILVA, E. L. da. *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica*. [S.l.]: Editora Sagra Luzzatto, 2001.

SKOK, S.; IVANKOVIC, I.; CERINA, Z. Applications based on PMU technology for improved power system utilization. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.

SNYDER, A. et al. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements. *Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON '98. 1998 International Conference on*, v. 2, p. 790–794 vol.2, Aug 1998.

TALEBI, M. A. et al. A genetic algorithm approach for identifying synchronous generator parameters from excitation disturbance test. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.

TAYLOR, C. W.; VENKATASUBRAMANIAN, M. V.; CHEN, Y. Wide-area stability and voltage control. *VII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, 2000.

TIANSHU, B. *WAMS Implementation in China - Part I: Current Status*. [S.l.], 2010.

WAMKEUE, R. et al. Iteratively reweighted least squares for maximum likelihood identification of synchronous machine parameters from on-line tests. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999.

WARLAND, L.; HOLEN, A. A voltage instability predictor using local area measurements (VIP++). *Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto*, v. 2, p. 6 pp. vol.2-, 2001.

WSCC. Test guidelines for synchronous unit dynamic testing and model validation. *WSCC Control Work Group and Modeling and Validation Work Group*, 1997.

WSCC. WECC Synchro-Phasor Project Whitepaper - proposed scope v. 3.0. *WECC Operations and Planning Coordination Committees*, 2009.

XIE, X. et al. WAMS applications in Chinese power systems. *Power and Energy Magazine, IEEE*, v. 4, n. 1, p. 54–63, Jan.-Feb. 2006. ISSN 1540-7977.

YANHUI, X.; RENMU, H.; DONG, H. Validation of measurement-based load modeling for large-scale power grid. *IEEE Power Energy Society General Meeting*, 2008.

YI, K. K.; CHOO, J. B.; YOON, S. H. Development of wide area measurement and dynamic security assessment systems in Korea. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001.

ZHAO, H. A new state estimation model of utilizing PMU measurements. *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, p. 1–5, Oct. 2006.

ZHAO, Z. et al. A dynamic on-line parameter identification and full-scale system experimental verification for large synchronous machines. *IEEE/PES Winter Meeting, New York*, 1995.