



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

**GRUPO - IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DE UNIDADES GERADORAS USANDO
DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA E SIMULAÇÃO DINÂMICA HÍBRIDA**

Felipe Trevisan(*)
ITAIPU
Jorge Luiz Jacopetti e Silva
ITAI

Ildemar Cassana Decker
UFSC

Marcelo Neujahr Agostini
UFSC

RESUMO

O presente trabalho investiga a validação de parâmetros de modelos dinâmicos de unidades geradoras utilizando dados de medição fasorial sincronizada. Para tanto, emprega-se a técnica de simulação dinâmica híbrida, que permite o *playback* de registros fasoriais em ambiente de simulação. Usando um protótipo desenvolvido, foram avaliadas as influências dos parâmetros (de maneira quantitativa e qualitativa) na resposta de unidades geradoras e proposta uma metodologia heurística para o ajuste dos parâmetros. Uma plataforma de simulação em tempo real foi utilizada para emulação de medições fasoriais e os dados obtidos foram usados para demonstrar a viabilidade da metodologia de ajuste proposta.

PALAVRAS-CHAVE

Validação de Parâmetros de Unidades Geradoras, Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada.

1.0 - INTRODUÇÃO

Ferramentas de simulação dinâmica de sistemas de potência são a base para realização de estudos elétricos relacionados ao planejamento e operação em tempo real de sistemas de energia. Dessa forma, a confiança nos resultados desses estudos está diretamente ligada à qualidade dos modelos utilizados. A crescente evolução nos sistemas de potência vem gerando, de maneira gradativa, um aumento na complexidade das atividades de planejamento e operação desses sistemas, revelando a necessidade de melhoria dos modelos de simulação (1). Tradicionalmente, a determinação de parâmetros de modelos de simulação é feita com base em resultados de ensaios de campo. No caso de unidades geradoras, por exemplo, a realização de ensaios implica em paradas de máquina, restrições às condições do sistema e exposição das unidades a condições extremas de operação (2). Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS - *Synchronized Phasor Measurement Systems*) apresentam características interessantes no que diz respeito a estudos de validação de modelos, uma vez que permitem monitorar a dinâmica de sistemas de potência em função das elevadas taxas de amostragem e sincronização temporal entre equipamentos de medição (3). Assim, registros de perturbações naturais de sistemas elétricos podem ser utilizados como base de comparação para resultados de simulações computacionais (1). Nesse contexto, o presente artigo tem por objetivo descrever um estudo da utilização de registros fasoriais sincronizados de perturbações no processo de validação de parâmetros de unidades geradoras por meio da técnica de simulação dinâmica híbrida. Na seção 2 é apresentado um breve histórico e conceitos relacionados a estudos de validação de modelos. Na seção 3 é discutida a formulação matemática da técnica de simulação dinâmica híbrida. Na seção 4 apresenta-se a influência dos parâmetros de modelos dinâmicos nas respostas de potência ativa e reativa de unidades geradoras e aborda-se a metodologia de ajuste de parâmetros proposta. Na seção 5 são discutidos resultados de experimentos computacionais com objetivo de demonstrar a validade da metodologia e, por fim, na seção 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

(*) Av. Tancredo Neves, n° 6731 – CEP 85.856-970 Foz do Iguaçu, PR - Brasil
Tel: (+55 45) 3520-3613 – Email: felipet@itaipu.gov.br

2.0 - VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 Breve Histórico

Nos últimos 15 anos, estudos relacionados à validação de modelos foram motivados por eventos de proporções significativas, principalmente no sistema elétrico norte-americano (1). Como exemplos podem ser citados os blecautes de 1996 (interligação California-Oregon) (4) e 2003 (nordeste dos EUA e Ontário – Canadá) (5). Em ambos os casos, a análise dos eventos permitiu uma melhoria significativa da modelagem dos sistemas de potência dos EUA (1). Outro exemplo remete à aplicação de perturbações artificiais (curto-circuitos trifásicos) ao sistema de transmissão em 500 kV de uma empresa de transmissão chinesa. Os registros obtidos a partir do evento foram usados para melhoria dos modelos de cargas dinâmicas (6).

2.2 Classificação

Estudos de validação de modelos podem ser classificados, basicamente, de acordo com o tipo de modelo (estático ou dinâmico) e com relação a abrangência do estudo (validação sistêmica ou de subsistemas).

2.2.1. Quanto ao Tipo de Modelo

- Modelos Estáticos: São modelos representados por equações algébricas no processo de simulação; por exemplo, linhas de transmissão, transformadores e cargas representadas por modelos ZIP (combinação de impedância constante, corrente constante e potência constante) (1, 5);
- Modelos Dinâmicos: Utilizam equações diferenciais para representar a evolução no tempo das variáveis. Se enquadram nessa categoria modelos de equipamentos como unidades geradoras e controles associados (reguladores de tensão, reguladores de velocidade, estabilizadores de potência), além de controladores de dispositivos FACTS e cargas especiais, como sistemas de condicionamento de ar (1, 5).

2.2.2. Quanto à Abrangência dos Sistemas

- Validação Sistêmica: Registros de medições em pontos selecionados do sistema (tensões e fluxos, por exemplo) são comparados a resultados de simulações do sistema completo. Permite a avaliação de parâmetros sistêmicos como frequência e amortecimento de modos de oscilação inter-área. Devido às elevadas dimensões dos sistemas de potência, esse tipo de abordagem envolve um trabalho considerável na preparação dos casos de *load flow* pré-falta e seqüenciamento de eventos para reprodução de perturbações reais (7).
- Validação de Subsistemas: Essa abordagem faz uso do conceito de simulação dinâmica híbrida para isolar componentes de sistemas externos, cuja modelagem não é levada em conta durante a simulação. A técnica consiste na reprodução de grandezas elétricas medidas em barras de fronteira no processo de simulação dinâmica, possibilitando o *playback* de perturbações reais em sistemas reduzidos (8).

É importante ressaltar que as duas abordagens 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 forma global, a aderência do modelo completo ao comportamento real do sistema (7).

3.0 - SIMULAÇÃO DINÂMICA HÍBRIDA

O conceito de simulação híbrida contempla a reprodução de registros (*playback*) de grandezas elétricas, obtidas via medição de sistemas reais, em ambiente de simulação (8). A Figura 1 ilustra didaticamente o processo de simulação híbrida em duas etapas: em 1(a), mostra-se a captura de perturbações naturais no sistema elétrico por PMUs (*Phasor Measurement Units*); em 1(b), apresenta-se a reprodução dos registros fasoriais em um sistema reduzido (subsistema).

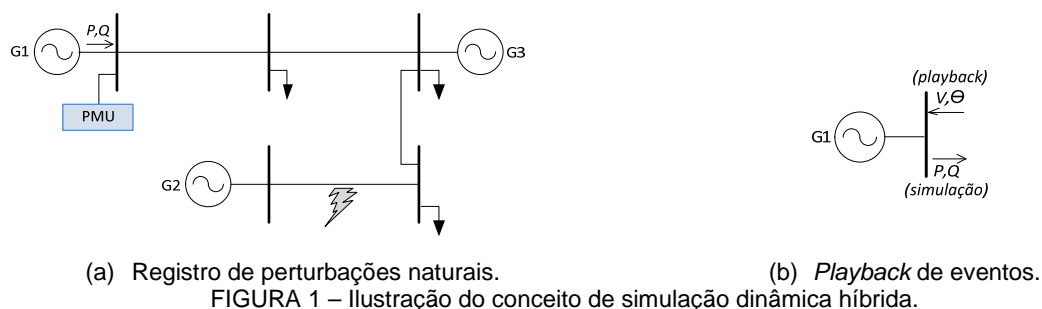


FIGURA 1 – Ilustração do conceito de simulação dinâmica híbrida.

A técnica de simulação dinâmica híbrida pode ser compreendida como uma ligação entre sistemas reais e simulações computacionais, trazendo para o ambiente de simulação eventos verificados na prática por meio de medições. Dentre os principais benefícios obtidos com a técnica, podem ser destacados (9):

- Reproduzir cenários reais com fidelidade (*playback* de eventos);
- Comparar medições e simulações sob as mesmas condições;
- Restringir o número de modelos a serem analisados;
- Facilitar o processo de preparação dos cenários de simulação.

3.1 Formulação Matemática

Genericamente, o comportamento dinâmico de sistemas de potência pode ser representado matematicamente pelo conjunto de equações algébricas e diferenciais definido em 1 (9):

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ 0 = g(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

onde $x^T = [x_1 \dots x_M]$ representa as variáveis de estado associadas às equações diferenciais do modelo (velocidade angular, tensões internas das máquinas síncronas etc), $y^T = [y_1 \dots y_N]$ refere-se a variáveis algébricas (tensões nodais e injeções de corrente), e f e g são vetores de funções com M e N variáveis, respectivamente. Considerando que, na simulação híbrida algumas variáveis sejam conhecidas previamente para todo o horizonte de simulação (por exemplo, $y_i = y^*(t)$), ou seja, obtidas por meio de medições, o conjunto de equações 1 poderia ser reescrito como:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y', y^*) \\ 0 = g'(x, y', y^*) \end{cases} \quad (2)$$

sendo que $y^T = [y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_N]$, e g' seja o novo conjunto de equações algébricas excluindo-se a equação associada a y_i . Dessa forma, a cada passo de integração, um novo valor de $y_i = y^*(t)$ é inserido no processo de simulação para contemplar os registros de medições (9). Uma implicação relevante desse conceito reside no fato de que, medindo-se grandezas em todas as barras de fronteira de um subsistema, é possível realizar simulações do subsistema de interesse usando apenas informações internas, de modo que o comportamento do sistema externo é representado pela injeção das medidas nas barras de fronteira a cada passo de integração (8).

3.2 Validação de Modelos usando Simulação Híbrida

As etapas envolvidas na aplicação da técnica de simulação híbrida à validação de modelos são representadas na Figura 2. Inicialmente, registros de perturbações passam por uma etapa de pré-processamento para a compatibilização entre os intervalos de amostragem usados pelas PMUs e o passo de integração usado na simulação dinâmica. Nessa etapa ainda são calculados valores de referência da potência ativa e reativa (P_{ref} , Q_{ref}) em função dos fasores de tensão e corrente medidos. Posteriormente, os registros pré-processados das tensões são usados como entrada para a simulação híbrida, a partir da qual são obtidos valores simulados de potência (P_{sim} , Q_{sim}) que podem então ser comparados aos valores de referência obtidos das medições (8).

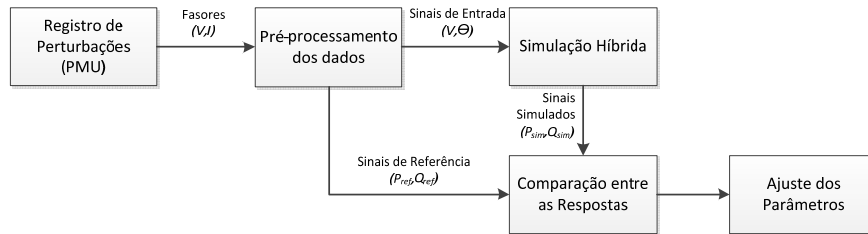


FIGURA 2 – Visão esquemática do processo de validação de modelos.

Por meio da comparação entre respostas reais e simuladas, é possível verificar a adequação do modelo de simulação ao sistema real. Técnicas de otimização numérica, como o método dos mínimos quadrados e filtragem de Kalman, poderiam ser usadas para a identificação do conjunto de parâmetros que fornecem as respostas mais similares aos registros das perturbações reais. No entanto, neste trabalho, optou-se pela utilização de uma metodologia heurística para ajuste dos parâmetros usando uma base de conhecimento que relaciona a influência dos parâmetros nas respostas de potência ativa e reativa de unidades geradoras (detalhes na seção 4.4).

4.0 - AVALIAÇÃO DE SIMILARIDADE

Para a obtenção de uma base de conhecimento associada à influência dos parâmetros, foram utilizadas duas abordagens para a avaliação da aderência entre resultados de simulações e registros de medições, quais sejam: avaliação qualitativa (cálculo de índices de similaridade) e avaliação qualitativa das curvas. Em (11) apresenta-se ainda, como metodologia complementar, a técnica da Sensibilidade das Trajetórias aplicada à avaliação da influência de parâmetros.

Registros de perturbações foram obtidos a partir da simulação convencional de um sistema simplificado máquina-barras infinita com duas linhas de transmissão. Os eventos usados para disparar a dinâmica das simulações foram:

- Abertura de uma das linhas de transmissão;
- Degrau nas referências do regulador de tensão e de potência mecânica da unidade¹;
- Aplicação de curto-circuito na barra terminal da unidade geradora.

¹ Para efeitos de simplificação, não foi modelado o regulador de velocidade da unidade geradora.

Os registros obtidos foram usados como dados de entrada para simulações híbridas realizadas com um protótipo computacional (SIMSP) adaptado para implementação da técnica de simulação híbrida (10, 11).

4.1 Índices de Similaridade

Com o objetivo de quantificar o comportamento da influência dos parâmetros, foi proposto o cálculo de 6 índices de similaridade (IS), tomando por base a classificação dos períodos de tempo adotada para representar o comportamento da corrente de armadura em máquinas síncronas durante curto-circuitos, ou seja, período subtransitário, período transitório e regime permanente. A formulação matemática para os 6 indicadores numéricos que permitem quantificar a influência dos parâmetros dinâmicos nas curvas de potência ativa e reativa em cada período das respostas é apresentada nas equações abaixo:

$$IS_{sub}^P = \sqrt{\sum_{t_{evt}}^{t_{trs}} (P_i^{ref} - P_i^{sim})^2} \quad IS_{trs}^P = \sqrt{\sum_{t_{trs}}^{t_{reg}} (P_i^{ref} - P_i^{sim})^2} \quad IS_{reg}^P = \sqrt{\sum_{t_{reg}}^{t_{sim}} (P_i^{ref} - P_i^{sim})^2} \quad (3)$$

$$IS_{sub}^Q = \sqrt{\sum_{t_{evt}}^{t_{trs}} (Q_i^{ref} - Q_i^{sim})^2} \quad IS_{trs}^Q = \sqrt{\sum_{t_{trs}}^{t_{reg}} (Q_i^{ref} - Q_i^{sim})^2} \quad IS_{reg}^Q = \sqrt{\sum_{t_{reg}}^{t_{sim}} (Q_i^{ref} - Q_i^{sim})^2} \quad (4)$$

onde:

P_i^{ref} : potência ativa de referência (medida);

Q_i^{ref} : potência reativa de referência (medida);

P_i^{sim} : potência ativa simulada;

Q_i^{sim} : potência reativa simulada;

t_{evt} : instante de início da perturbação (subtransitário);

t_{trs} : instante de início do período transitório;

t_{reg} : instante de início do regime permanente;

t_{sim} : instante final da simulação.

A Figura 3 apresenta uma interpretação gráfica para o cálculo dos indicadores de similaridade. A área hachurada nos gráficos representa a discrepância entre registros de medição e resultados de simulações. As curvas são divididas em três intervalos de tempo (período subtransitário, transitório e regime), para os quais os indicadores integralizam as diferenças entre simulações e medições. Os índices servem como medida da qualidade dos modelos de simulação, ou seja, respostas de modelos bem ajustados devem apresentar índices com valores reduzidos. Os intervalos de tempo são parâmetros de ajuste da metodologia e devem ser definidos de acordo com a perturbação a ser avaliada.

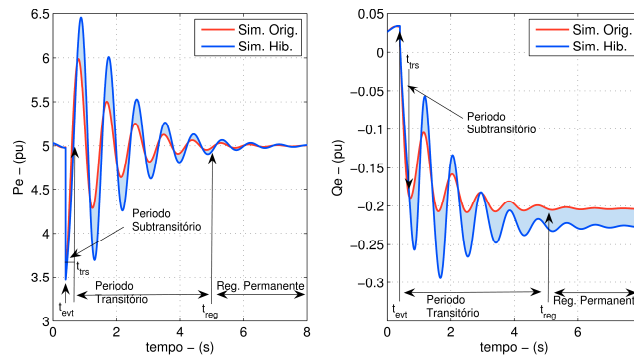


FIGURA 3 – Representação gráfica do cálculo dos indicadores de similaridade.

Utilizando a metodologia apresentada, foram obtidos indicadores de similaridade para os 4 tipos de perturbações supracitadas, considerando desvios individuais de 5% nos parâmetros dinâmicos da máquina síncrona e regulador de tensão ($x_d, x_q, x'_d, x''_d, T'_{d0}, T''_{d0}, T''_{q0}, H, Ka, Ta$). A Tabela 1 sumariza os resultados obtidos (alterações nos parâmetros T''_{d0}, T''_{q0}, Ta não sensibilizaram as respostas de maneira significativa):

Tabela 1 - Principal influência dos parâmetros dinâmicos nas respostas de unidades geradoras.

Principal influência	Parâmetros	Perturbações propícias à validação
Potência Ativa (regime permanente)	K_a, x_d	- Abertura de Circuito - Degrau no reg. de tensão - Degrau na pot. mecânica
Potência Reativa (período transitório)	T'_{d0}, x'_d	- Abertura de Circuito - Degrau no reg. tensão - Degrau na pot. mecânica
Potência Ativa (período transitório)	H, x_q	- Abertura de Circuito - Degrau na pot. mecânica
Potência Reativa (período sub-transitário)	x''_d	- Curto-circuito
Potência Ativa (período sub-transitário)	x_q	- Curto-circuito

Considerando os resultados sintetizados na tabela é possível verificar que determinadas perturbações são mais propícias à validação de certos parâmetros, ou seja, excitam o sistema de modo que desvios em alguns parâmetros sejam mais perceptíveis que outros. Além disso, foi possível constatar que, em alguns casos, existe sobreposição da influência dos parâmetros. No caso de K_d e x_d , por exemplo, verificou-se que as influências dos dois parâmetros na resposta de potência reativa são muito similares entre si, o que dificulta o processo de ajuste. O mesmo comportamento pode ser evidenciado para os parâmetros T'_{d0} / x'_d e H / x_q . Dessa forma, com objetivo de identificar características nas respostas que permitam distinguir entre os parâmetros descalibrados, foi realizada uma avaliação qualitativa das curvas de potência ativa e reativa.

4.2 Avaliação Qualitativa

Comportamentos característicos podem ser constatados por meio de uma inspeção visual detalhada das curvas, permitindo evidenciar diferenças nas influências dos parâmetros.

- Parâmetro x_d vs. K_d : O cálculo dos índices de similaridade revelou que ambos os parâmetros provocam desvios no regime permanente da resposta de potência reativa, porém, em sentidos contrários. Qualitativamente, pode-se constatar que para validação desses parâmetros é necessária a avaliação de perturbações distintas, visto que, utilizando-se apenas um tipo de perturbação, o efeito de desvios combinados nesses parâmetros pode ser mutuamente compensado, levando a conclusões errôneas a respeito da validade dos parâmetros.
- Parâmetro x'_d vs. T'_{d0} : Os parâmetros x'_d e T'_{d0} apresentam índices bastante similares no que diz respeito ao período transitório da resposta de potência reativa. Investigando-se essas diferenças de maneira qualitativa, foi possível verificar que desvios em x'_d provocam defasagens nas oscilações das respostas, enquanto alterações no parâmetro T'_{d0} influenciam no decaimento do período transitório, ou seja, no tempo necessário para o sistema alcançar as condições de regime.
- Parâmetro H vs. x_q : No caso de H e x_q verifica-se que ambos os parâmetros influenciam as trajetórias de potência ativa de maneira similar. A análise qualitativa, no entanto, permitiu revelar algumas diferenças nas influências. Desvios em x_q provocam variações na amplitude das primeiras oscilações das respostas, enquanto o parâmetro H , quando alterado, provoca modificações na amplitude das oscilações em todo o período transitório.

4.3 Metodologia para Ajuste de Parâmetros

Usando a base de conhecimento construída a partir da análise quantitativa e qualitativa, é possível definir um procedimento, baseado em regras, para o ajuste manual dos parâmetros. A metodologia pode ser encarada como um guia no processo de ajuste de parâmetros para a correção das respostas simuladas de potência ativa e reativa. A Figura 4 mostra uma representação esquemática contemplando as etapas envolvidas no processo.

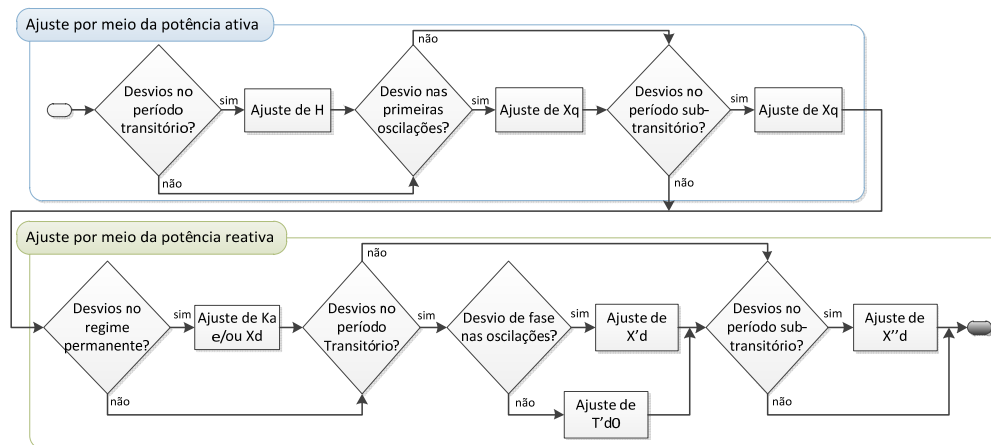


FIGURA 4 - Representação esquemática do processo de ajuste de parâmetros.

A metodologia aborda o processo de ajuste dos parâmetros em duas etapas: por meio da potência ativa e por meio da potência reativa. Para cada uma das etapas, inicialmente procura-se ajustar parâmetros associados ao regime permanente; na sequência, parte-se para o ajuste de parâmetros que provocam desvios no período transitório e, por fim, são ajustados os parâmetros associados ao período sub-transitório. A adoção de um procedimento heurístico, ao invés de métodos numéricos de otimização para determinação dos parâmetros, remete à possibilidade de se utilizar os resultados da análise qualitativa das respostas (apresentada previamente), além da possibilidade de avaliar, de maneira combinada, simulações usando diferentes tipos de perturbações.

5.0 - EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Com base na metodologia de ajuste proposta, partiu-se para a validação do procedimento por meio de experimentos computacionais. Neste sentido, foi utilizada uma plataforma computacional de simulação de sistemas de potência em tempo real (RTDS® – Real Time Digital Simulator) com o objetivo de emular o funcionamento de

uma unidade de medição fasorial conectada aos terminais de uma unidade geradora. O equipamento de simulação utilizado nos testes está disponível no Laboratório de Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), vinculado ao Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI) e à Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

5.1 Cenário de Testes

A Figura 5 apresenta o diagrama unifilar do sistema hipotético modelado no RTDS com o objetivo de demonstrar a viabilidade da metodologia de ajuste de parâmetros proposta. O modelo contempla um equivalente simplificado das unidades geradoras de Itaipu 60 Hz² conectadas à uma barra infinita por 4 linhas de transmissão. A fim de excitar a dinâmica do sistema, foram utilizados eventos de abertura do circuito LT4 e aplicação de degrau na potência mecânica da unidade G1. Os registros obtidos com o RTDS foram usados como dados de entrada para simulações híbridas usando o aplicativo SIMSP.

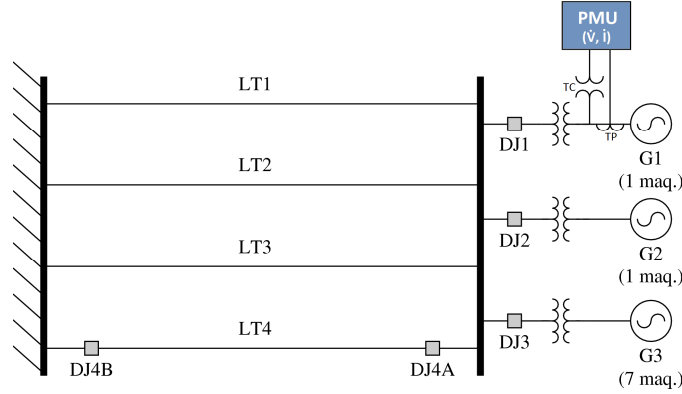
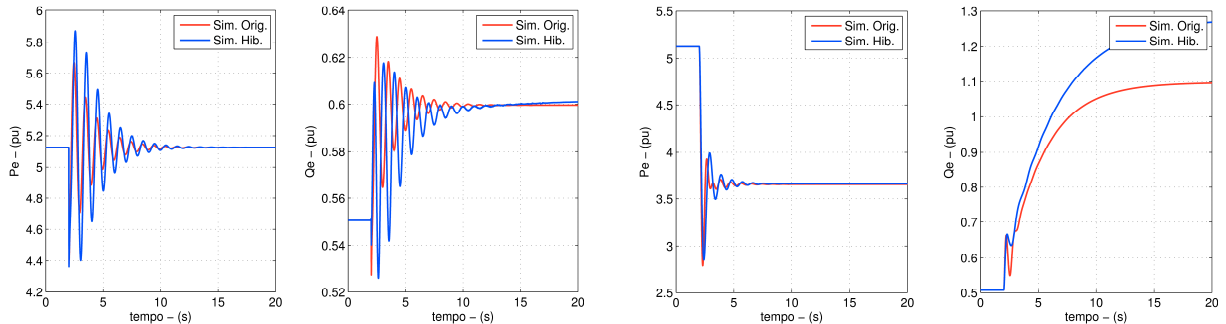


Figura 5 - Sistema hipotético usado nos experimentos com o RTDS para registro das perturbações.

Com objetivo de testar a metodologia de ajuste, os parâmetros x_d, x_q, x'_d, K_a, H , e T'_{d0} foram alterados propositalmente em 30% para, posteriormente, serem ajustados seguindo a metodologia proposta. A Figura 6 apresenta comparativamente os resultados das simulações realizadas no RTDS com parâmetros originais e as curvas obtidas via simulação híbrida (SIMSP) com parâmetros alterados. A Tabela 2, por sua vez, apresenta os valores dos índices de similaridade calculados para este caso. Os elevados valores dos indicadores (apresentados em destaque nas tabelas subsequentes) revelam desvios nos parâmetros do modelo.



(a) Perturbação: abertura de circuito.

(b) Perturbação: degrau na pot. mecânica.

FIGURA 6 – Simulação original vs. simulação híbrida (condição inicial).

Tabela 2 - Indicadores de similaridade (condição inicial).

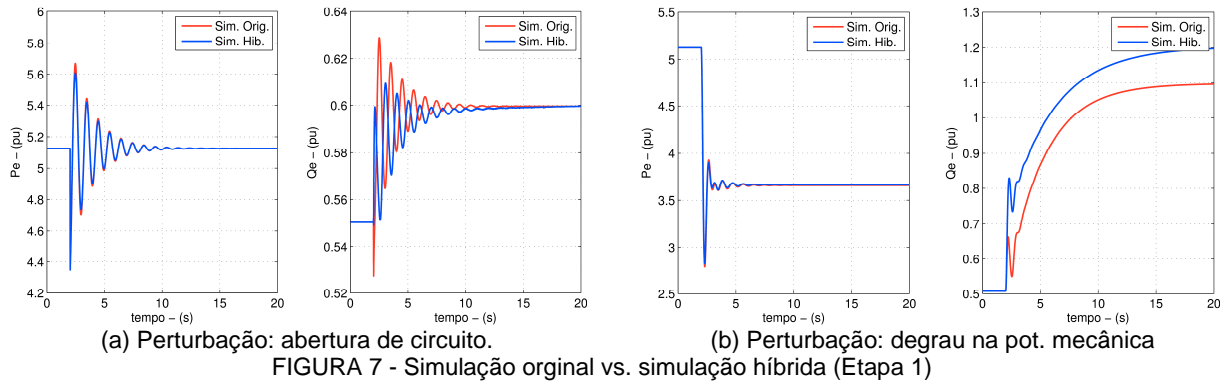
Perturbação	Indicadores de Potência Ativa			Indicadores de Potência Reativa		
	Sub-trans.	Transitório	Regime	Sub-trans.	Transitório	Regime
Abertura de circuito	0,0106	7,8636	0,0028	0,1630	20,0777	0,0349
Degrau na pot. mec.	0,2985	8,3393	0,0284	0,0743	79,8880	444,6030

5.2 Ajuste dos Parâmetros

5.2.1. Etapa 1

Seguindo a metodologia proposta (Figura 4), inicialmente são ajustados os valores de H e x_q com objetivo de corrigir as respostas de potência ativa. As curvas apresentadas na Figura 7 ilustram os resultados obtidos após a primeira etapa do ajuste.

² Não foram modelados os reguladores de velocidade e estabilizadores de potência (PSS). Os reguladores de tensão foram representados por um modelo simplificado (ganho + constante de tempo).



A Tabela 3 apresenta os valores dos indicadores de similaridade após os ajustes iniciais nos parâmetros. Nota-se uma redução considerável nos indicadores associados à potência ativa.

Tabela 3 - Indicadores de similaridade (Etapa 1).

Perturbação	Indicadores de Potência Ativa			Indicadores de Potência Reativa		
	Sub-trans.	Transitório	Regime	Sub-trans.	Transitório	Regime
Abertura de circuito	0,0048	0,0739	0,0000	0,9546	11,7904	0,0229
Degrau na pot. mec.	0,0127	0,1337	0,0285	0,3200	169,1016	168,9452

5.2.2. Etapa 2

Numa segunda etapa, de acordo com a metodologia de ajuste, os parâmetros x_d e K_a foram alterados no sentido de corrigir as respostas da potência reativa durante o regime permanente. As curvas apresentadas na Figura 8 mostram tendências similares das respostas em regime permanente após a segunda etapa de ajustes. A Tabela 4 sumariza os valores dos índices calculados, revelando uma redução significativa nos indicadores associados ao regime permanente das respostas de potência reativa.

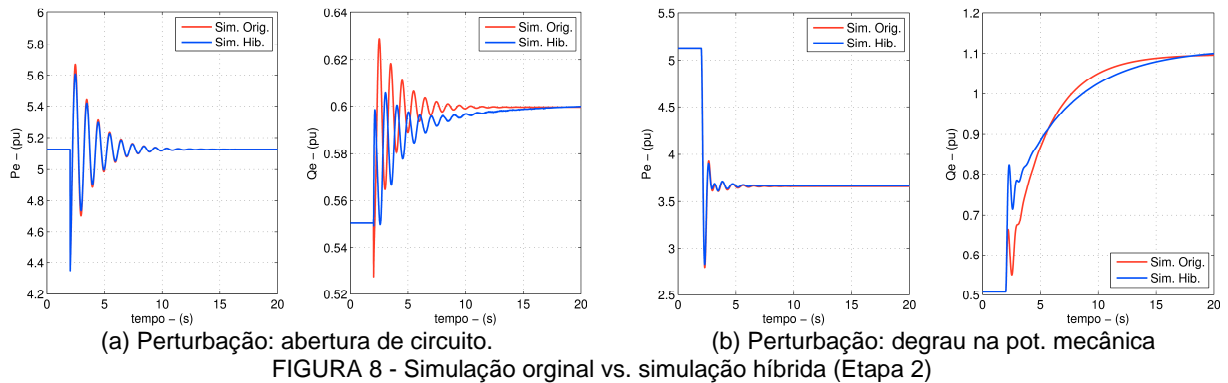


Tabela 4 - Indicadores de similaridade (Etapa 2).

Perturbação	Indicadores de Potência Ativa			Indicadores de Potência Reativa		
	Sub-trans.	Transitório	Regime	Sub-trans.	Transitório	Regime
Abertura de circuito	0,0048	0,0737	0,0000	0,9323	12,9092	0,0888
Degrau na pot. mec.	0,0128	0,1316	0,0285	0,3141	57,0007	3,2031

5.2.3. Etapa 3

Por fim, foram alterados os valores de x'_d e T'_{d0} com objetivo de reduzir as discrepâncias associadas ao período transitório das curvas de potência reativa. A análise do desvio de fase nas oscilações da potência reativa (avaliação qualitativa) permitiu um ajuste razoável dos parâmetros x'_d e T'_{d0} .

Os gráficos apresentados na Figura 9 mostram o resultado final do ajuste, enquanto a Tabela 5 apresenta os índices de similaridade obtidos.

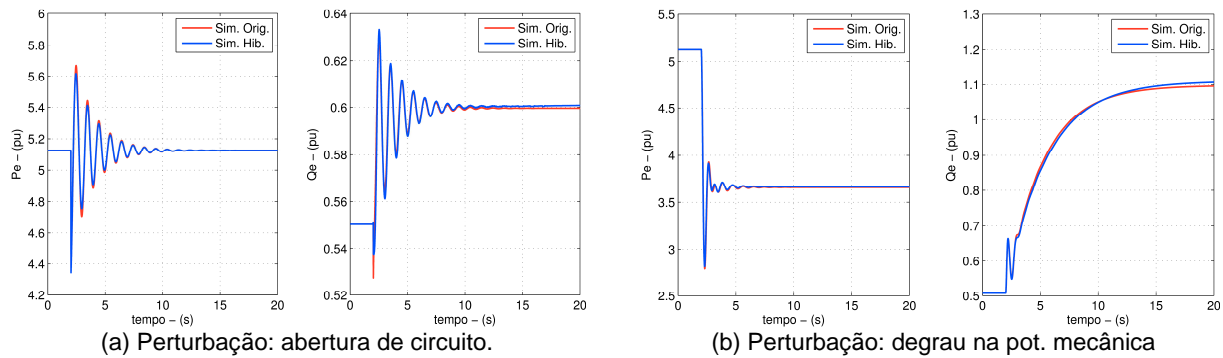


FIGURA 9 - Simulação original vs. simulação híbrida (Etapa 3)

Tabela 5 - Indicadores de similaridade (Etapa 3).

Perturbação	Indicadores de Potência Ativa			Indicadores de Potência Reativa		
	Sub-trans.	Transitório	Regime	Sub-trans.	Transitório	Regime
Abertura de circuito	0,0200	0,0737	0,0285	0,0074	0,9345	1,0240
Degrau na pot. mec.	0,0433	0,0894	0,0157	0,0748	1,1421	1,8240

6.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentados resultados associados à investigação da utilização de dados de medição fasorial sincronizada de perturbações naturais na validação de modelos de unidades geradoras, por meio da aplicação da técnica de simulação dinâmica híbrida. Utilizando um protótipo computacional desenvolvido (SIMSP), foram realizadas simulações híbridas exaustivas com o intuito de construir uma base de conhecimento relacionando o comportamento das respostas de potência ativa e reativa de unidades geradoras a desvios em seus parâmetros usando abordagem quantitativa e qualitativa das curvas. A base de conhecimento foi então usada para proposição de uma metodologia heurística (guia) de ajuste de parâmetros.

Com base nos estudos, foi possível verificar que o efeito de desvios dos parâmetros nas respostas dinâmicas está associado ao tipo de perturbação utilizada nas simulações. De fato, diferentes tipos de perturbações (abertura de LTs, curto-circuitos, rejeições de carga etc) excitam o sistema de modo que os parâmetros descalibrados afetem em maior ou menor grau as respostas analisadas. Dessa forma, para garantir a confiabilidade do processo de validação, é importante que os estudos sejam realizados usando eventos variados que perturbem o sistema de diferentes formas. É importante destacar ainda que o procedimento de validação de subsistemas utilizando simulação híbrida deve ser baseado em resultados prévios de ensaios de comissionamento, quando estimativas iniciais para os parâmetros são obtidas. 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 avaliação de seu comportamento global (caracterização de modos de oscilação inter-área, *mode shapes*, fatores de participação etc). Por fim, o artigo procurou demonstrar a viabilidade da utilização de sistemas de medição fasorial sincronizada na manutenção da qualidade de modelos de simulação de sistemas de potência.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NERC. Power System Model Validation – White Paper (draft). NERC Model Validation Task Force of the Transmission Issues Subcommittee, May 2010.
- (2) IEEE Guide: Test procedures for synchronous machines. Part II – Test procedures and parameter determination for dynamic analysis, 1993.
- (3) DECKER, I.; SILVA, A.; SILVA, R. J. G.; AGOSTINI, M. N.; MARTINS, N.; PRIOSTE, F. B. System wide model validation of the brazilian interconnected power system. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010.
- (4) KOSTEREV, D.; TAYLOR, C.; MITTELSTADT, W. Model validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage. IEEE Transactions on Power Systems, 1999.
- (5) UNDRILL, J.; PEREIRA, L.; KOSTEREV, D.; PATTERSON, S.; DAVIES, D.; YANG, S.; AGRAWAL, B. Generating unit model validation: WECC lessons and moving forward. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2009.
- (6) YANHUI, X.; RENMU, H.; DONG, H. Validation of measurement-based load modeling for large-scale power grid. IEEE Power Energy Society General Meeting, 2008.
- (7) HUANG, Z.; KOSTEREV, M.; GUTTROMSON, R.; NGUYEN, T. Model validation with hybrid dynamic simulation. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006.
- (8) HUANG, Z.; KOSTEREV, M.; GUTTROMSON, R.; NGUYEN, T. Model validation of power system components using hybrid dynamic simulation. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- (9) HUANG, Z.; GUTTROMSON, R. T.; HAUER, J. F. Large-scale hybrid dynamic simulation employing field measurements. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.
- (10) AGOSTINI, M. N. Nova filosofia para o projeto de software para sistemas de energia elétrica usando modelagem orientada a objetos. Tese (Doutorado) – UFSC, 2002.
- (11) TREVISAN, F. Validação de parâmetros de modelos de unidades geradoras usando dados de medição sincronizada de fasores. Dissertação (Mestrado) – UFSC, 2011.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Felipe Trevisan possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007), especialização em Automação, Controle e Supervisão do Processo Elétrico baseado na Norma IEC 61850 pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2010) e mestrado em Sistemas de Energia pela UFSC (2011). Atualmente trabalha em Itaipu Binacional no desenvolvimento de aplicativos de suporte à operação em tempo real (SCADA/EMS).

Ildemar Cassana Decker é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Pelotas (1979), mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1984) e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1993). Desde 1985 é professor e pesquisador do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente desenvolve atividades de pesquisa relacionadas à dinâmica e controle de sistemas elétricos de potência, com ênfase na aplicação de técnicas de medição sincronizada de fasores.

Marcelo Neujahr Agostini possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (1996) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2002). Atualmente trabalha como pesquisador junto ao Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan/UFSC) desenvolvendo projetos nas áreas de medição fasorial sincronizada, dinâmica de sistemas elétricos, e modelagem orientada a objetos aplicada a sistemas de potência.

Jorge Luiz Jacopetti e Silva possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2008) e especialização em Sistemas Elétricos (CESE) pela UNIFEI (2010). Atualmente trabalha no Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE/ITAI) nas áreas de simulação, ensaio de modelos, proteção e estudos elétricos.