



XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - IV

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

UTILIZAÇÃO DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA NA VALIDAÇÃO DE MODELOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: PRINCÍPIOS, PRÁTICAS ATUAIS E DESAFIOS PARA SUA INCORPORAÇÃO ÀS PRÁTICAS DE ANÁLISE DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

George Arthur Gavioli(*)
ONS

José Mario Mamfrin Capano Jr.
ONS

Ildemar C. Decker
LabPlan/UFSC

André Della Rocca Medeiros
ONS

Aguinaldo Silveira e Silva
Labspot/UFSC

RESUMO

Neste artigo são abordados os principais aspectos da prática de validação de modelos de Sistemas de Energia Elétrica utilizando a tecnologia Medição Fasorial Sincronizada. Um exemplo de sua aplicação na validação dos modelos e dados do Sistema Interligado Nacional (SIN) é também descrito. As informações para a validação foram capturadas de duas grandes perturbações ocorridas no SIN, por um protótipo de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada que monitora a baixa tensão. Comparações foram realizadas utilizando o programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM), e o banco de dados para estudos de transitórios eletromecânicos, administrado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico.

PALAVRAS-CHAVE – Validação de Modelos, Medição Fasorial Sincronizada, WAMS.

1.0 - INTRODUÇÃO

As atividades de planejamento e operação de Sistemas de Energia Elétrica (SEE) dependem de simulações baseadas na representação matemática dos elementos da rede elétrica. Assim, a qualidade dos modelos e dados utilizados nas simulações é essencial para se garantir uma operação segura, confiável e econômica de um SEE, sendo imprescindível que, periodicamente, esses modelos e dados sejam validados, a fim de assegurar uma adequada representação do comportamento real do sistema.

A tradicional e mais utilizada estratégia para a validação de modelos em SEE é baseada em testes de campo, onde sinais são localmente injetados nos componentes sob ensaio e suas respostas medidas. Contudo, essa estratégia é restrita a um único componente ou instalação da rede elétrica e, geralmente, requer a indisponibilidade de tais componentes para o sistema, tendo um custo considerável para sua realização. A partir do desenvolvimento da tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada, que permite o registro contínuo da resposta dinâmica do sistema a eventuais eventos, surge uma nova e promissora oportunidade para a validação dos modelos da rede elétrica. Dessa forma, é possível também realizar uma análise da qualidade dos modelos e dados, comparando-se os resultados de simulações, onde todo o sistema é representado, com medições, em tempo real, obtidas por meio de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS – Synchronized Phasor Measurements Systems).

O propósito geral desse trabalho é discutir a importância da definição de um adequado processo de validação dos modelos que representam os elementos da rede elétrica, explorar o estado atual da prática de validação de modelos utilizando a tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada, bem como discutir aspectos relacionados à sua incorporação nos estudos de estabilidade eletromecânica do Sistema Interligado Nacional (SIN). Um exemplo de aplicação desta tecnologia na validação dos modelos e dados no SIN é descrito. Os registros para a validação foram capturados de eventos reais, por um protótipo de SPMS de baixa tensão que monitora o SIN, e comparações foram realizadas utilizando o programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM, bem como o banco de dados para estudos de transitórios eletromecânicos administrado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

(*) ONS - Rua Deputado Antônio Edu Viera, 999 – CEP 88.040-901 Florianópolis, SC, – Brasil
Tel: (+55 48) 3231-3902 – Fax: (+55 48) 3231-3900 – Email: george.gavioli@ons.org.br

2.0 - VALIDAÇÃO DE MODELOS

2.1 Visão Geral dos Modelos para Representação de SEE

Historicamente, um grande esforço tem sido dedicado ao desenvolvimento de modelos matemáticos e programas de simulação para representar o comportamento de SEE nos estudos de planejamento e operação. Para a representação em um ambiente de simulação, os SEE são construídos a partir de um conjunto de modelos e dados dos componentes da rede elétrica, com grande ênfase para os modelos que representam o comportamento dinâmico de geradores síncronos e seus controles associados (1). Os modelos têm suas estruturas representadas em termos de diagramas de blocos ou equações algébricas e diferenciais e são incorporados a maioria dos softwares disponíveis comercialmente para a simulação de SEE, cabendo aos usuários selecionar os modelos apropriados para o estudo desejado.

Na modelagem de um grande SEE, como o SIN, modelos para o sistema de transmissão, unidades de geração e carga precisam ser desenvolvidos (2). Além disso, é importante também uma adequada representação das proteções intrínsecas desses equipamentos e de caráter sistêmico, bem como dos Sistemas Especiais de Proteção (SEP) em operação. Para o sistema de transmissão, além dos modelos para as linhas de transmissão, transformadores e elementos shunts (reatores e capacitores), equipamentos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) e HVDC (High-Voltage Direct Current) são elementos que requerem uma modelagem especial. Para as unidades de geração modelos para geradores e seus controles associados para usinas hidrelétricas, térmicas e parques eólicos são necessários. Ultimamente, verifica-se também, a necessidade de modelos para geração distribuída (ex. solar, pequenas centrais geradoras, células a combustível etc.). As cargas, historicamente, têm sido representadas, nos estudos de regime permanente e dinâmico, por um modelo estático (ZIP) que consiste de uma combinação de parcelas de carga do tipo impedância constante (Z), corrente constante (I) e/ou potência constante (P). No entanto, modelos estáticos estão sendo vistos como inadequados, particularmente com a crescente utilização de condicionadores de ar e equipamentos eletrônicos, e modelos mais precisos podem ser necessários para a representação de certos tipos de cargas e determinados fenômenos, como a lenta recuperação do nível de tensão (FIDVR – Fault Induced Delayed Voltage Recovery).

2.2 Importância e os Objetivos da Validação de Modelos

O planejamento e a operação de SEE são baseados nos resultados de simulações onde os elementos da rede elétrica são representados por modelos matemáticos. Cálculos de limites operacionais, avaliação da integração de novos equipamentos, bem como a definição de SEP são alguns estudos que dependem de uma representação matemática do sistema de transmissão, geração e carga. Modelos otimistas tendem a resultar em subinvestimento na rede elétrica ou em condições não seguras de operação, podendo levar à ocorrência de blecautes no sistema, como o ocorrido em 1996 no oeste dos EUA. Por outro lado, modelos pessimistas podem levar à subutilização da capacidade instalada do sistema, resultando em investimentos desnecessários e/ou em uma operação energética não otimizada, tendo como consequência a elevação do custo da energia elétrica para os consumidores. Assim, a qualidade dos modelos e dados utilizados nas simulações é essencial para uma operação segura, confiável e econômica de um SEE, sendo altamente recomendado que, periodicamente, esses modelos e dados sejam validados, uma vez que podem haver mudanças nas características do sistema com o tempo. Em particular com respeito à carga e a interações imprevistas entre componentes, quando novas estratégias de controles são implementadas pela adição de novos componentes e tecnologias (3).

O principal objetivo da validação de modelos é avaliar o quão adequado os modelos dos elementos da rede elétrica estão para os propósitos que são requeridos. De uma maneira simples, a validação de modelos pode ser vista como uma comparação entre dados medidos e resultados de simulações. O processo de validação deve assegurar que modelos identificados como inadequados sejam substituídos por modelos que reflitam o mais fielmente o comportamento real desses equipamentos. O objetivo final é ter uma representação completa do sistema, baseada em modelos, que possam razoavelmente prever o seu comportamento, por exemplo, quando da ocorrência de alguma perturbação (4).

2.3 Estratégias de Validação de Modelos

A tradicional e mais utilizada estratégia para validação de modelos em SEE é baseada em testes realizados em campo nos equipamentos, onde sinais são localmente injetados nos componentes sob ensaio e suas respostas são medidas (5). Essa estratégia permite maior facilidade na identificação e correção de importantes parâmetros dos modelos de simulação, uma vez que os testes realizados são desenvolvidos para terem suas repostas afetadas por poucos parâmetros. Simular as respostas dos testes, geralmente, é uma tarefa simples, já que a perturbação aplicada é bem definida e, em particular, quando o elemento é isolado da rede, como, por exemplo, em testes de rejeição de carga em geradores, não há contribuição externa do sistema para as respostas desses elementos, o que elimina o problema associado com a representação da rede. No entanto, essa estratégia baseia-se nos resultados de testes que, geralmente, requerem a operação do equipamento sob condições incomuns, como é o caso, por exemplo, da avaliação das características do regulador de velocidade de um gerador. Nos testes realizados, como normalmente o gerador é desconectado do sistema, seus controles de turbina/velocidade mudam para um modo de operação diferente, a fim de limitar a velocidade e reduzir o tempo necessário para trazer a unidade geradora em condições de novamente ser sincronizada à rede elétrica. Nesse caso, a resposta dinâmica correspondente a esse modo de operação não permite identificar a resposta desses controles quando o gerador está sincronizado ao sistema, o que justamente é o objetivo de todo o esforço do processo de validação. Assim, há um risco de se desenvolver modelos que podem apresentar boas respostas para certas condições e deixar de

representar outras características que são importantes quando esses estão em condições normais de operação. Além do mais, essa estratégia é restrita a um único componente da rede elétrica, tem um custo considerável para a sua realização e, geralmente, requer a indisponibilidade do equipamento para o sistema.

Equipamentos de monitoração capazes de continuamente gravar diferentes grandezas elétricas, com destaque para as Unidades de Medição Fasorial Sincronizada (PMUs), estão se tornando amplamente disponíveis para a utilização em SEE. Do ponto de vista da validação de modelos, esses equipamentos passam a apresentar uma nova e valiosa oportunidade para a melhoria desse processo, uma vez que são capazes de registrar o desempenho dos SEE em condições normais de operação e em eventuais distúrbios, exatamente o que se deseja conhecer por meio das simulações computacionais realizadas no planejamento e operação de SEE. Além do mais, pode-se evitar a necessidade de tornar indisponíveis à operação equipamentos do sistema ou de operá-los em condições não usuais, por necessidade de validação de seus modelos, o que é tecnicamente mais prático, seguro e econômico para o sistema. Exemplos que ilustram a utilização dessa estratégia e comprovam sua importância para a validação de modelos de SEE, podem ser encontrados em diversos artigos da literatura especializada (6), (7), (8).

3.0 - SPMS E A VALIDAÇÃO DE MODELOS

Os SPMS, genericamente citados na literatura técnica como Wide Area Measurement System (WAMS), estão se tornando amplamente disponíveis para utilização em SEE, principalmente após a ocorrência de grandes blecautes pelo mundo. Esses sistemas são compostos por equipamentos de monitoração (Unidade de Medição Fasorial – PMU), armazenamento (Concentrador de Dados – PDC) e metodologias de aplicação envolvendo aspectos de monitoração e controle em tempo real. Como o registro e análises de eventuais eventos em SEE são a melhor oportunidade para a validação dos modelos que representam os elementos da rede elétrica, o desenvolvimento da tecnologia de medição fasorial sincronizada surge também como uma excelente alternativa para a validação desses modelos. Os SPMS são capazes de capturar a dinâmica de SEE, através da medição simultânea de grandezas elétricas sincronizadas no tempo, via sinal de satélite (GPS), em instalações distantes geograficamente, a altas taxas de amostragens. Isto tudo permite ainda, de forma inédita, realizar uma análise da qualidade dos modelos, por meio da comparação com os resultados de simulações, onde todo o sistema é representado.

3.1 Princípios da Validação de Modelos Utilizando SPMS

A idéia geral da validação de modelos é avaliar se os resultados de simulações (seja para um único componente ou para todo o sistema), para determinados eventos no sistema, correspondem razoavelmente às respostas registradas para os mesmos eventos ocorridos no sistema real. Os SEE são ricos em informações que podem ser obtidas para utilização no processo de validação de modelos. Informações para a realização da comparação entre a resposta real e a simulada podem ser obtidas dos registros de grandezas elétricas do sistema nas seguintes situações:

- a. Regime Normal: Refletem a resposta do sistema a mudanças da carga e a outros pequenos estímulos, e são caracterizados por possuírem pouca ou nenhuma dinâmica envolvida.
- b. Perturbações Naturais: Os dados são obtidos após a ocorrência de uma perturbação natural no sistema. Dependendo da perturbação, grandes interações dinâmicas podem ser produzidas no sistema.
- c. Perturbações Artificiais: São eventos aplicados ao sistema visando estimulá-lo a desenvolver um comportamento dinâmico capaz de fornecer informações para serem utilizadas no processo de validação de modelos sem, contudo, submeter o sistema a riscos ou causar-lhe algum dano.

Alguns requisitos também devem ser levados em conta no processo de validação, a fim de garantir uma válida comparação (9):

- As condições do sistema anteriores ao distúrbio devem ser adequadamente representadas nos casos de fluxo de potência utilizados no processo de simulação.
- O processo de simulação deve ser fiel à sequência de eventos ocorrida durante um distúrbio no sistema.
- Para a validação de modelos dinâmicos, os eventos devem produzir repercussões dinâmicas suficientes em grandezas elétricas do sistema. Grandes perturbações são uma ótima fonte de registros para tal propósito.

A determinação do ponto de operação do sistema antes da ocorrência de um evento, geralmente, é uma tarefa complexa e sujeita a incertezas, sendo necessário definir critérios, a fim de avaliar se as respostas fornecidas pelos modelos de simulação são satisfatórias, quando comparadas com os registros obtidos por SPMS. Critérios baseados em análise qualitativa e quantitativa podem ser utilizados para tal propósito (10), conforme descrito a seguir.

- a. Critérios qualitativos: São baseados na análise e comparação da similaridade de forma entre as respostas obtidas do processo de simulação computacional com as respostas registradas do sistema real, de relevantes variáveis do sistema, tais como: frequência, tensão, diferenças angulares e fluxos de potência em linhas de transmissão. De posse desses dados, indicadores para se avaliar a qualidade dos modelos baseadas nesse critério podem ser também propostos, baseados nas seguintes premissas:
 - Os modelos prevêem estabilidade ou instabilidade do sistema.
 - Os modelos prevêem a natureza da resposta do sistema: comportamento oscilatório, amortecimento, etc.

- Os modelos prevêem similar variação na excursão de variáveis, com máximos e mínimos ocorrendo em tempos compatíveis.

- b. Critérios quantitativos: São baseados em diferenças numéricas entre os resultados das respostas simuladas com as respostas reais apresentadas pelo sistema. Por exemplo, os valores da frequência e amortecimento dos principais modos de oscilações eletromecânicas presentes no sistema podem ser utilizados nesta comparação.

3.2 Abordagens

3.2.1 Validação de Modelos de Sistemas

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático do processo de validação de modelos de sistemas, em que é feita a avaliação da qualidade dos modelos por meio da comparação dos resultados de simulações, onde todo o sistema é representado, com dados obtidos por um SPMS. Os principais desafios desta estratégia estão na complexidade de gerenciamento da grande quantidade de modelos e dados envolvidos no processo de simulação. Por exemplo, o ajuste do caso de fluxo de potência para a condição pré-evento, para todo o sistema, é um processo muito trabalhoso, porém essencial, que pode consumir muito tempo, dada a grande dimensão dos SEE. Há também a dificuldade de se coletar informações à respeito da seqüência exata de eventos, em todo o sistema, durante a ocorrência de uma grande perturbação, para uma reprodução fiel no processo de simulação, uma vez que nem todos os eventos envolvidos são possíveis de serem capturados. Por último, avaliar se as respostas fornecidas pela simulação computacional são satisfatórias e apontar problemas, quando diferenças existirem, requer conhecimento técnico dos analistas responsáveis por este processo, uma vez que grandes quantidades de modelos estão envolvidos na simulação.

Embora seja um procedimento complexo, esta estratégia oferece uma oportunidade de comparação, e uma visão macro da interação dos modelos dentro de um grande sistema, permitindo saber se o comportamento apresentado pelo sistema durante a ocorrência de alguma perturbação é também representado pelos modelos nas simulações computacionais realizadas. Um exemplo pioneiro e de grande sucesso dessa abordagem foi a validação de modelos realizada no blecaute de agosto de 1996, no Oeste dos Estados Unidos (11). Os resultados da tentativa de reprodução desse evento nos modelos de simulação apresentaram um comportamento totalmente diferente dos resultados reais capturados por um SPMS. Um grande esforço foi realizado, então, na tentativa de se identificar quais modelos e dados apresentavam problemas, e que deveriam ser revisados. As modificações e melhorias implementadas permitiram uma boa reprodução do blecaute em ambiente de simulação, garantindo maior confiança nos modelos e dados utilizados para representação do sistema. Nas referências (10) e (12) encontram-se outros exemplos de validação de modelos utilizando essa abordagem.

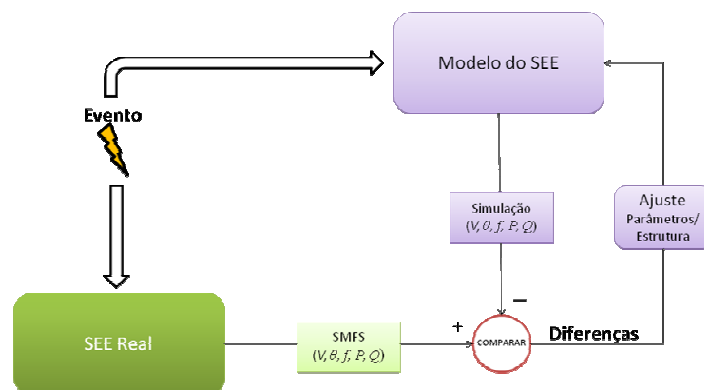


FIGURA 1 – Diagrama Esquemático do Processo de Validação de Modelos de Sistemas Utilizando SPMS

3.2.2 Validação de Modelos de Componentes de SEE.

Para a validação de modelos de componentes de SEE duas estratégias diferentes utilizando dados registrados por SPMS podem ser empregadas. A primeira baseia-se na estratégia tradicional de validar modelos de componentes por meio de sua contínua monitoração, registrando seu desempenho real para eventuais distúrbios que naturalmente venham ocorrer no sistema, para depois serem comparados com os resultados de simulação. A segunda estratégia é baseada no conceito de Simulação Dinâmica Híbrida (13), que consiste na introdução de valores de grandezas elétricas reais no processo de simulação. Dessa forma é possível representar a aplicação de um distúrbio ocorrido em um SEE, no modelo do componente, por meio da reprodução de medidas reais de grandezas elétricas registradas por SPMS, no ponto de conexão do componente com o restante do sistema. Isto permite uma precisa representação do distúrbio na simulação, tornando assim, mais intuitiva e fácil a tarefa de tirar conclusões a respeito dos resultados e identificar problemas com os modelos. Além do que, o conhecimento da seqüência de eventos não é mais necessário, e a tarefa de ajuste do caso de fluxo de potência para a condição pré-evento torna-se simples.

4.0 - VALIDAÇÃO DE MODELOS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Nesta seção é descrita a aplicação da tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada para a validação de modelos e dados do SIN, utilizando a abordagem de validação de modelos de sistemas. Dados para a validação foram obtidos dos registros de duas grandes perturbações ocorridas no SIN, por um protótipo de SPMS de baixa tensão, desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e comparações foram realizadas utilizando o programa ANATEM. As condições de operação anteriores aos eventos foram obtidas de dados fornecidos pelo sistema de supervisão e controle do ONS. Já a sequência de eventos foi obtida dos relatórios de análise de perturbação – RAP (14), elaborado pelo ONS em conjunto com os agentes convidados.

4.1 SPMS utilizado

No Brasil encontra-se em desenvolvimento o Projeto MedFasee, cujos objetivos contemplam o estudo e o desenvolvimento da tecnologia de SPMS para aplicações na monitoração e controle de SEE. No âmbito deste projeto desenvolveu-se um protótipo de um sistema de SPMS, constituído inicialmente por três unidades de medição fasorial e um concentrador de dados (15). Este protótipo foi expandido ao longo dos últimos anos de modo a abranger todas as cinco regiões geográficas do país, por meio da realização de medições em 14 universidades. As PMUs realizam a medição direta dos fasores de tensões trifásica da baixa tensão e enviam dados continuamente ao PDC, localizado no LabPlan/UFSC, por meio da Internet, a uma taxa de 60 fasores por segundo.

4.2 Descrição da Perturbação

Nesta seção apresenta-se uma breve descrição das perturbações simuladas no presente trabalho. Maiores detalhes da topologia do sistema na região de ocorrência dessas perturbações, bem como de toda a sequência de eventos, encontram-se na referência (14).

4.2.1 Abertura das Interligações Norte/Sudeste e Sudeste/Nordeste no dia 07/09/2010

Às 16h41min do dia 07/09/2010 iniciou-se uma sequência de curtos-circuitos monofásicos envolvendo os três circuitos da Interligação Norte/Sudeste, no trecho entre as SE Gurupi e Miracema, provocados por queimada na região, culminando às 16h45min com o desligamento de todos eles. Configurada a perda da Interligação Norte/Sudeste, houve a atuação da Lógica 1 dos SEP desta interligação, desligando a LT 500 kV Serra da Mesa – Samambaia C1 e a LT 500 kV Serra da Mesa 2 – Rio das Éguas, desfazendo também a Interligação Sudeste/Nordeste deixando, assim, o subsistema Norte/Nordeste operando de forma isolada do restante do SIN.

4.2.2 Abertura das Interligações Norte/Sudeste e Sudeste/Nordeste no dia 24/09/2010

Às 13h45min do dia 24/09/2010 iniciou-se uma sequência de curtos-circuitos envolvendo os três circuitos da Interligação Norte/Sudeste, no trecho entre as SE Gurupi e Miracema, provocados por queimada na região, culminando às 14h26min com o desligamento de todos eles. Configurada a perda da Interligação Norte/Sudeste, houve a atuação da Lógica 1 dos SEP desta interligação, desligando a LT 500 kV Serra da Mesa – Samambaia C1 e a LT 500 kV Serra da Mesa 2 – Rio das Éguas, desfazendo também a Interligação Sudeste/Nordeste deixando, assim, o subsistemas Norte/Nordeste operando de forma isolada do restante do SIN.

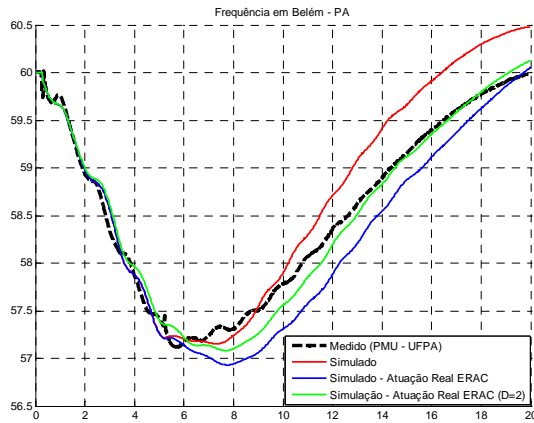
4.3 Análise Comparativa

4.3.1 Avaliação Qualitativa

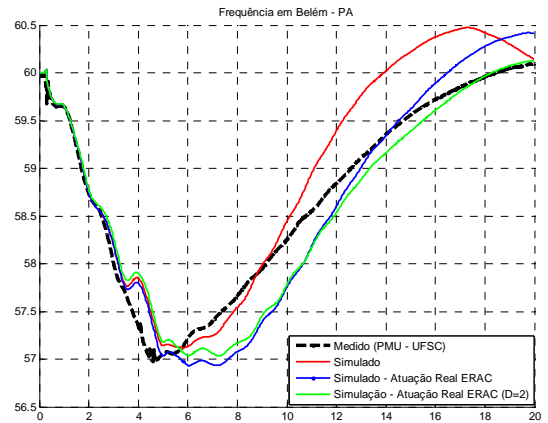
A seguir são apresentados os resultados do comportamento no tempo de grandezas elétricas registradas pelo SMPS, durante a ocorrência das perturbações anteriormente descritas, juntamente com os resultados obtidos da reprodução dessas perturbações em ambiente de simulação, utilizando dados e modelos do SIN.

Na Figura 3 é apresentado o comportamento da frequência do subsistema Norte/Nordeste (N/NE), medida em Belém – PA. Durante as perturbações, o sistema N/NE passou a operar ilhado do restante do SIN, e sua frequência começou a decrescer devido ao desbalanço carga/geração. Isto levou a atuação do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), de modo a garantir sua estabilidade. Nessa figura são mostrados, além do comportamento real da frequência registrado pelo SMPS, resultados dessa grandeza para três diferentes situações de simulação.

Na primeira, representada pela curva em vermelho, temos o comportamento da frequência para a atuação do ERAC, conforme sua representação convencional no modelo de simulação para estudos de planejamento. Observa-se nessa situação que, apesar do comportamento similar das formas das repostas, a taxa de recuperação da frequência é maior que a apresentada na frequência medida. Isto pode ser atribuído a um maior montante de corte de carga realizado pelo ERAC na simulação, ao que foi realizado na prática, por exemplo, 1235 MW contra 860 MW para a perturbação do dia 24/09/2010, e de 1745MW contra 1260 MW para a do dia 07/09/2010. Na segunda situação, representada pela curva em azul, temos o comportamento da frequência para uma atuação do ERAC, conforme ocorrida na prática. Nota-se que a taxa de recuperação da frequência, para as duas perturbações, já é mais similar à verificada na frequência medida, contudo há uma maior excursão no valor da frequência até que seu mínimo seja atingido. Na terceira situação, além da mesma consideração feita anteriormente, é também realizada uma alteração no valor do parâmetro que representa o comportamento da carga com a frequência (D). O valor de D utilizado nos modelos de simulação para o subsistema N/NE que é igual a 1 p.u.MW/p.u.Hz, foi alterado para 2 p.u.MW/p.u.Hz. Os resultados apresentados para esse caso, das três situações simuladas, é o que apresenta maior aderência com a resposta da frequência medida, o que pode indicar que a representação do amortecimento da carga com a frequência nessas regiões seja um ponto que necessite de estudos mais detalhados, para a sua correta representação.



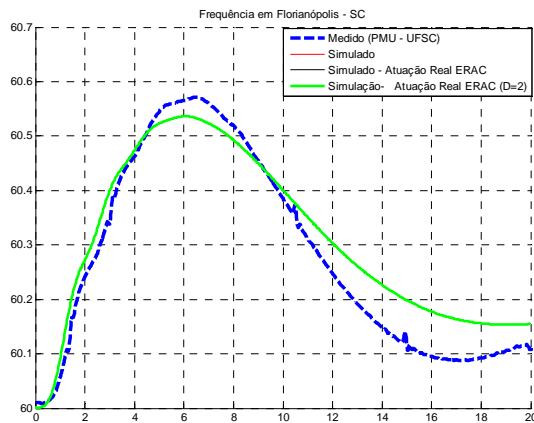
a) Ocorrência de 24/09/2010



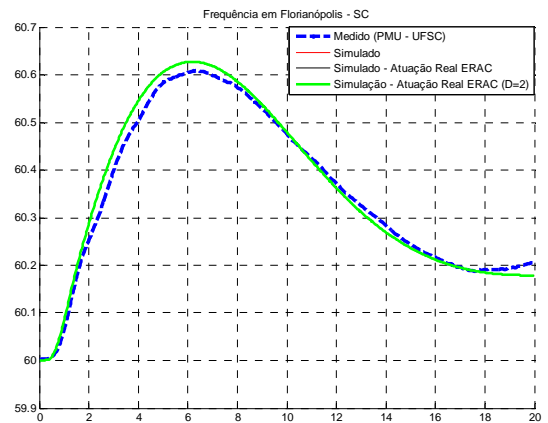
b) Ocorrência de 07/09/2010

FIGURA 3 – Frequência no Subsystema N/NE

Na Figura 4 é apresentado o comportamento da frequência para o restante do SIN, medida em Florianópolis – SC. Os resultados confirmam o comportamento similar da frequência medida e simulada para os dois eventos, e sua correta reprodução pelos modelos de simulação.



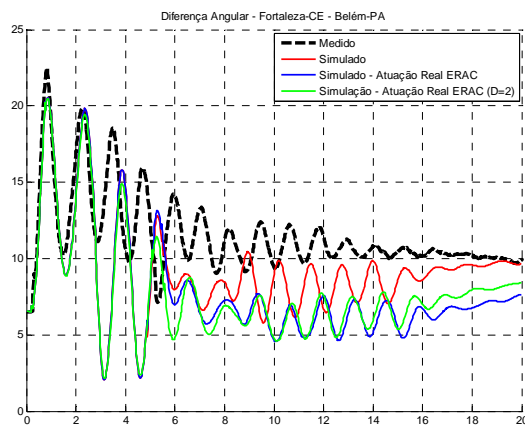
a) Ocorrência de 24/09/2010



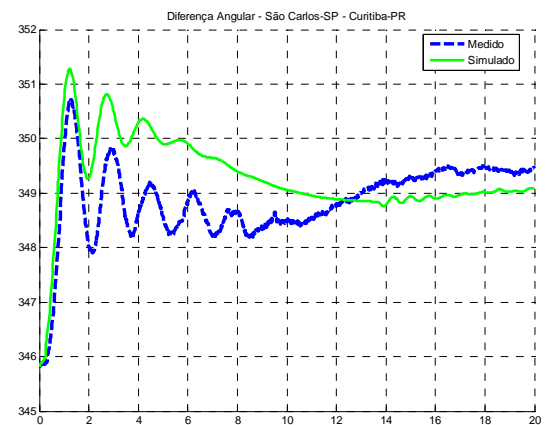
b) Ocorrência de 07/09/2010

FIGURA 4 – Frequência no Subsystema S/SE/CO

Na Figura 5 são apresentadas as diferenças angulares entre os subsistemas Sul e Sudeste (S-SE) e Norte e Nordeste (N-NE), simuladas e medidas pelo SMPS, para a perturbação do dia 24/09/10. Para a diferença angular N-NE, as mesmas três situações de simulação consideradas na análise do comportamento da frequência são apresentadas. Os resultados mostram que mais uma vez os modelos representaram adequadamente a forma das respostas e a faixa de variação angular.



a) Diferença Angular entre Fortaleza e Belém



b) Diferença Angular entre São Carlos e Curitiba

FIGURA 5 – Diferenças Angulares para a Ocorrência de 24/09/2010

Por fim, na Figura 6, comportamentos medidos e simulados para tensões do SIN, em Brasília – DF e em Belém – PA, são apresentados. Apesar dos resultados fornecidos pelos modelos de simulação serem razoavelmente satisfatórios, realizar uma avaliação da qualidade desses modelos através da comparação do módulo de tensões medidas na baixa tensão contra resultados de simulações realizados na alta tensão, pode não ser adequado. Visto que do ponto de alta tensão até chegar aos níveis de distribuição disponíveis para as PMUs utilizadas neste trabalho, muitos equipamentos que influenciam no comportamento dessa grandeza estão presentes, e seus comportamentos não são representados nas simulações, uma vez que a rede de distribuição também não é representada.

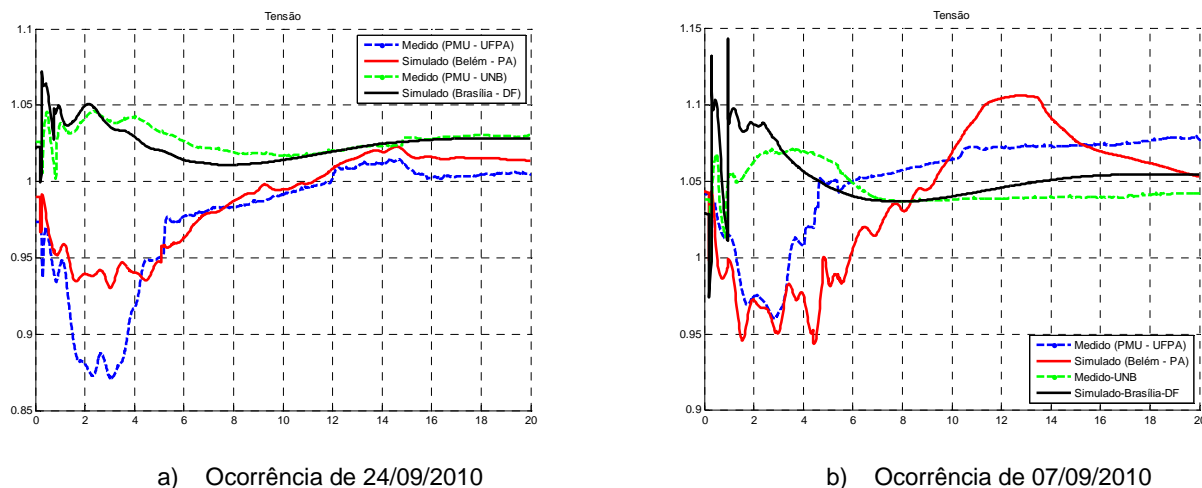


FIGURA 6 – Tensões no SIN

4.3.2 Avaliação Quantitativa

Na Tabela 1 os valores da frequência de oscilação e do amortecimento de alguns modos de oscilações eletromecânicos, observados na simulação e nos registros do SMPS para a perturbação do dia 24/09/201, são apresentados e comparados. O Método de Prony foi empregado para o cálculo desses parâmetros, a partir das curvas de diferenças angulares entre áreas do SIN apresentadas na Figura 5. Para o modo observado na diferença angular N-NE foi utilizada uma janela de tempo compreendendo os instantes de 14 a 20 segundos, uma vez que para essa janela, o sistema não é mais afetado por eventos externos, e o desvio de frequência em relação à frequência nominal, já não é tão grande. Já para o modo observado na resposta da diferença angular S-SE, a janela de tempo utilizada foi de 0 a 8 segundos.

Tabela 1 – Modos de Oscilações Eletromecânicos

Dif. Angular	Fonte	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
N-NE	Registro – SMPS	0,8221	11,47
	Simulação – Padrão	0,7656	15,74
	Simulação – Atuação Real ERAC	0,7583	13,98
	Simulação – Atuação Real ERAC / D = 2	0,8171	11,40
S-SE	Registro – SMPS	0,6251	9,25
	Simulação – Padrão	0,6051	14,52

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 1 nota-se que os valores da frequência de oscilação e amortecimento para os modos eletromecânicos observados nas respostas simuladas e medidas, têm valores muito próximos, reforçando a confiança nos modelos e dados do SIN. E, assim como observado na avaliação qualitativa, a alteração do valor do parâmetro que representa o comportamento da carga com a frequência no subsistema N/NE, resultou em maior aderência entre a simulação e o registro do comportamento real do sistema.

5.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma visão geral da validação de modelos e dados em SEE, bem como sua importância para a qualidade e credibilidade dos resultados dos estudos de planejamento e operação desses sistemas. Nele também foram abordados princípios relacionados ao processo de validação de modelos utilizando a tecnologia de medição fasorial sincronizada, tais como: ideia geral, requisitos para se garantir uma válida comparação entre os registros de SMPS e resultados de simulação, bem como a utilização de critérios para avaliar se as respostas fornecidas pelos modelos de simulação são satisfatórias. Os principais aspectos e características das práticas atuais para a validação de modelos de sistemas e de componentes de SEE utilizando essa tecnologia também foram descritos. Por fim, uma análise comparativa foi realizada, a fim de demonstrar sua aplicação na validação de modelos e dados do SIN.

Os resultados da comparação entre as respostas medidas pelo SPMS e as simuladas, para as duas perturbações ocorridas no SIN, mostram que as respostas apresentam um comportamento qualitativo similar e também apresentaram valores muito próximos para indicadores quantitativos. Os eventos foram simulados com sucesso, e os modelos foram capazes de prever a estabilidade do sistema, bem como faixa de valores e forma das respostas para as variáveis observadas, o que ajuda a aumentar a confiança nos modelos, dados e programas de simulação atualmente utilizados para o planejamento e operação do SIN. Os resultados também confirmam o valor da tecnologia de medição fasorial sincronizada para a validação de modelos em SEE, uma vez que apenas monitorando a baixa tensão, o SPMS foi capaz de prover importantes informações para a realização desse estudo.

Contudo, para que a validação de modelos, utilizando medição fasorial sincronizada, possa ser incorporada com sucesso às práticas de análise do SIN, algumas dificuldades inerentes ao seu processo precisam ser superadas. A montagem do caso de fluxo de potência para se representar as condições anteriores ao distúrbio é uma delas. Seu maior obstáculo está na transferência dos dados com as condições de operação do sistema real para um modelo de estudo. Esse processo geralmente é manual, propenso à erros e consome uma grande quantidade de tempo. Alguns sistemas de supervisão e controle são capazes de fornecer casos de fluxo de potência com as condições de operação do sistema, contudo, nesses casos, a representação da rede não é, usualmente, compatível com os casos utilizados nos estudos de planejamento e operação de SEE. Outra questão importante, diz respeito à disponibilização de dados sincronizados na ocorrência de perturbações no sistema. Devido à grande dimensão dos SEE, SPMS com grande abrangência, capazes de registrar grandezas elétricas em vários pontos do sistema e que garantam também o registro da seqüência exata de eventos, são necessários. Entretanto por ser uma tecnologia recente, a aplicação da tecnologia de medição fasorial sincronizada está atualmente ainda movendo-se do campo da pesquisa ou de projetos experimentais para implementação em larga escala de SPMS pelo mundo. No Brasil, sob responsabilidade do ONS, o desenvolvimento de um grande SPMS para o SIN encontra-se em andamento. A operacionalização desse sistema será de grande relevância para o processo de validação de modelos, e claro para o planejamento e operação do SIN.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LIMA, L.T.G.; Dynamic model validation for compliance with NERC standards. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, vol., no., pp.1-7, 26-30 July 2009.
- (2) NERC Model Validation Task Force of the Transmission Issues Subcommittee. Power System Model Validation, May 28, 2010. [Online]. Disponível: <http://www.nerc.com>
- (3) ALLEN, E.; KOSTEREV, D.; POURBEIK, P.; Validation of power system models. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, vol., no., pp.1-7, 25-29 July 2010.
- (4) POURBEIK, P.; Approaches to validation of power system models for system planning studies. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, vol., no., pp.1-10, 25-29 July 2010.
- (5) FELTES, J.W.; LIMA, L.T.G.; Validation of Dynamic Model Parameters for Stability Analysis: Industry Need, Current Practices and Future Trends. Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, vol.3, no., pp. 4 vol. 2666, 13-17 July 2003.
- (6) POURBEIK, P.; Automated Parameter Derivation for Power Plant Models from System Disturbance Data. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, vol., no., pp.1-10, 26-30 July 2009.
- (7) POURBEIK, P.; BOSTROM, A.; JONH, E.; BASU, M.; Operational Experiences with SVCs for Local and Remote Disturbances. Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, vol., no., pp.444-450, Oct. 29 2006-Nov. 1 2006.
- (8) KOSTEREV, D.; MEKLIN, A.; UNDRILL, J.; LESIEUTRE, B.; PRICE, W.; CHASSIN, D.; BRAVO, R.; YANG, S.; Load modeling in power system studies: WECC progress update. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, vol., no., pp.1-8, 20-24 July 2008.
- (9) HUANG, Z.; YANG, B.; KOSTEREV, D.N.; Benchmarking of Planning Models Using Recorded Dynamics. Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES, vol., no., pp.1-6, 15-18 March 2009.
- (10) DECKER, I.C.; SILVA, A.S.; SILVA, R.J.G.; AGOSTINI, M.N.; MARTINS, N.; PRIOSTE, F.B.; System Wide Model Validation of the Brazilian Interconnected Power System. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, vol., no., pp.1-8, 25-29 July 2010.
- (11) KOSTEREV, D.N.; TAYLOR, C.W.; MITTELSTAD, W.A.; Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage. IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 3, pp. 967-979, August 1999.
- (12) AGRAWAL, B.; KOSTEREV, D.; Model Validation Studies for a Disturbance Event That Occurred on June 14 2004 in the Western Interconnection. Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, vol., no., pp.1-5, 24-28 June 2007.
- (13) HUANG, Z.; NGUYEN, T.; KOSTEREV, D.; GUTTROMSO, R.; Model Validation of Power System Components Using Hybrid Dynamic Simulation. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, vol., no., pp.153-160, 21-24 May 2006.
- (14) ONS. Relatório de Análise de Perturbação – RAP. ONS RE 3/205/2010 e 3/228/2010, Novembro de 2010.
- (15) DECKER, I.C.; AGOSTINI, M.N.; DOTTA, D.; ZIMATH, S.L.; Sistema de Medição Fasorial Sincronizada: Desenvolvimentos e Aplicação na Monitoração de Frequência do Sistema Elétrico Brasileiro. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Curitiba, PR, Outubro de 2005.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



George Arthur Gavioli é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007). Atualmente trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e encontra-se cursando o curso de mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina.



José Mario Mamfrin Capano Jr. é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina no ano de 1987. Pós-graduado / Especialista em Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência pela UFSC em 1993. Atua na área de Planejamento Elétrico da Operação do setor elétrico brasileiro desde 1988. Atualmente é Gerente de Planejamento e Programação do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS para os Sistemas da região Sul e Mato Grosso do Sul.



Ildemar Cassana Decker é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Pelotas (1980), mestre (1984) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica (1993) pela Universidade Federal de Santa Catarina e pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, respectivamente. Desde 1985 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina. Suas áreas principais de interesse são métodos computacionais para análise e controle de sistemas de energia elétrica e o desenvolvimento e aplicação de sistemas de medição fasorial sincronizada.



André Della Rocca Medeiros é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina no ano de 1992, obteve pela mesma instituição nos anos de 1994 e 2003, os títulos de mestre e doutor em Engenharia Elétrica, respectivamente. Desde 2000 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Aguinaldo S. e Silva Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná (1977), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1982), doutorado pela University of Manchester Institute of Science and Technology (1990) e pós-doutorado pela Brunel University (2002). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Santa Catarina e revisor de periódicos da IEEE Transactions on Power Systems. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atuando principalmente nos seguintes temas: Controle e Estabilidade de Sistemas de Potência, Projeto de Controladores para Dispositivos FACTS, Estabilidade de Tensão, Controle Robusto Aplicado a Sistemas de Potência e Aplicação de Computação Algébrica a Sistemas Elétricos.