



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

UM BANCO DE ENSAIOS COMBINANDO TESTES DE HIL E A COMPARAÇÃO EM TEMPO REAL ENTRE A REALIDADE E UM MODELO QUASI-CLOSED-LOOP DE UMA UNIDADE GERADORA

**MARC LANGEVIN (1); AMINE BAHJAOU (2); MARCELA TRINDADE (3);
OPAL-RT(1); OPAL-RT(2); OPAL-RT(3);**

RESUMO

Modelos digitais de unidades geradoras e seus controladores são necessários para realizar estudos de estabilidade de sistemas de energia elétrica. Os modelos dinâmicos dos geradores são geralmente suficientemente precisos, uma vez que são fornecidos pelos fabricantes e validados no comissionamento. No entanto, os modelos de motores primários, sistemas de excitação e seus controladores podem estar longe da realidade, pois muitas vezes se baseiam em suposições teóricas e não são totalmente validados por testes de campo. Para a validação do modelo do sistema de excitação, a comunicação com as PMUs (Unidades de Medição de Fase) permite uma comparação correta dos comportamentos de potência ativa e reativa. Não é incomum que os AVRs (Regulador Automático de Tensão) e PSSs (Circuito Estabilizador de Potência) não se comportem como esperado devido a defeitos, envelhecimento e/ou modificações de configuração não reveladas. As PMUs podem fornecer informações precisas sobre a energia elétrica, mas não revelarão muito sobre a precisão dos modelos de regulador de velocidade e turbina.

Em um artigo anterior [3], descrevemos um novo banco de provas equipado com um simulador em tempo real, e uma versão combinando recursos de monitoramento e testes locais. A ideia é comparar permanentemente os comportamentos dinâmicos de um hidrogerador e seus componentes auxiliares com seus modelos. Como discrepâncias não desprezíveis entre a realidade e a simulação em tempo real são observadas, seja durante flutuações de estado estacionário normais ou após distúrbios do sistema de potência, uma mensagem é enviada para a sala de controle e/ou para o centro de despacho. Em seguida, os testes locais podem ser rapidamente realizados sem desconectar a unidade simplesmente chaveando do recurso de monitoramento da bancada para a funcionalidade de teste local. Para turbinas hidráulicas e reguladores de velocidade, testes de malha fechada usando o simulador em tempo real integrado para HIL (Hardware-in-the-Loop) permitem emular o comportamento dinâmico da unidade testada como se ela estivesse operando em modo ilhado, mesmo que esteja sincronizada e transmitindo energia para a rede principal.

Neste novo artigo, usamos resultados de simulação em tempo real para comparar a simulação dinâmica em tempo real com comportamentos reais. O processamento foi feito usando o OPAL-RT RT-LAB. Em [2], o processamento foi feito off-line usando o Matlab Simulink® e o Matlab Simscape®. Seções 1 e 2 reproduzem parte do artigo anterior.

PALAVRAS-CHAVE

Simulação, Tempo-Real, Regulador-de-Velocidade, Controlador, Bancada-de-Testes, Regulador-de-Tensão

1.0 - INTRODUÇÃO

Tem-se visto frequentemente como a simulação de um evento real apresenta um comportamento perfeitamente estável e aceitável, enquanto os resultados reais se apresentam bem diferentes e com consequências indesejáveis, como apagões parciais ou até mesmo apagões totais da rede. É por essa razão que muitas autoridades reguladoras responsáveis pela confiabilidade do sistema elétrico recomendam frequentes análises pós-evento e testes de equipamentos no local, especialmente em unidades geradoras [3 5]. Há uma necessidade real de validar

modelos dinâmicos baseando-se em observações reais durante interrupções na rede de energia e testes do controlador do gerador usando distúrbios nos sinais de entrada. A modelagem precisa do sistema de controle do alternador, especificamente reguladores de velocidade e turbinas, teria possibilitado detectar a vulnerabilidade da rede e evitar sua interrupção. De fato, análises posteriores mostraram que várias estações de energia não foram capazes de lidar adequadamente com os distúrbios da rede, algo que não foi mostrado em simulações.

1.1 Uma bancada de testes inovadora

Uma bancada de testes inovadora, especialmente projetada para testar o controle de velocidade e potência em usinas elétricas, tem sido usada com sucesso nos últimos 10 anos por grandes empresas, como Hydro-Québec e Svenska Kraftnät, e por pequenos produtores para fornecer aos TSOs (Operadores do Sistema de Transmissão) modelos validados de seus sistemas de controle de frequência, e garantir sua conformidade com as especificações técnicas necessárias para sua conexão à rede principal. Comparações entre os resultados dos testes e as simulações dos mesmos são usadas para validar e modificar os modelos. A precisão computacional do banco de testes é assegurada por um período de amostragem de 50 μ s, em de tempo real.

1.2 Usando HIL para melhorar a eficiência da bancada de testes

Testes convencionais de reguladores de velocidade e tensão consistem em injetar uma perturbação no sinal de *set-point* e registrar a resposta do sistema. Este é um teste de controle de potência em malha fechada, com o controle de frequência em malha aberta, já que o sinal de frequência retornado como feedback é condicionado por toda a rede elétrica. Por exemplo, ao injetar um sinal de erro de frequência no regulador de velocidade para um alternador que esteja sincronizado com a grade principal, estamos de fato afetando o *set-point* de potência. Como a inércia da rede é grande, sua frequência quase não é afetada. Mas a variação da potência mecânica que ocorre como resultado de movimentar o servomotor do distribuidor será transformada em variação equivalente da potência elétrica pelo efeito da sincronização.

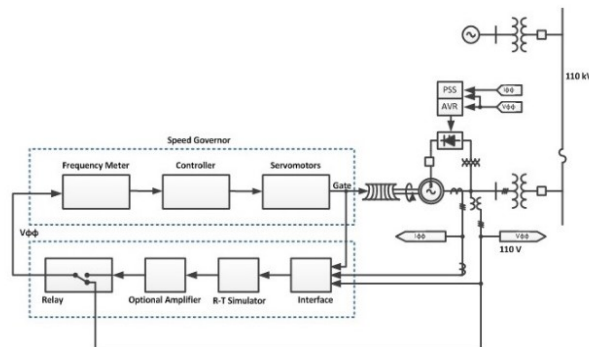


FIGURA 1 – Set-up da Bancada de Testes na Usina

Deseja-se garantir que os modelos usados nas análises de estabilidade de grade reflitam corretamente a realidade e que os controladores sejam ajustados adequadamente para garantir a estabilidade da rede, enquanto respondam rapidamente aos comandos de controle. Mas como se poderia certificar que um regulador de velocidade está configurado corretamente para garantir que a unidade testada contribua para a estabilidade de todo o sistema de potência, em vez de retirar a energia estabilizadora de outros geradores? Confia-se 100% nos modelos dinâmicos?

Usando um simulador em tempo real dentro do banco de testes, é possível gerar e injetar no regulador de velocidade um sinal que é calculado a cada passo de tempo (*time step*), de acordo com a variação de potência instantânea do gerador. A resposta do sistema poderia, portanto, ser considerada como a resposta natural a um distúrbio externo, na verdade, uma variação de carga, como se a unidade geradora estivesse fornecendo essa carga sozinha, como se estivesse operando em modo ilhado.

Se um teste em malha fechada emulando o modo de operação ilhado revelar instabilidade ou oscilações abaixo do amortecimento, isso significa que a unidade testada de fato deteriora toda a estabilidade do sistema de potência. Se muitas unidades geradoras apresentarem comportamentos semelhantes, toda a estabilidade do sistema de potência estará ameaçada. Repetir este teste em simulação off-line e alcançar resultados idênticos aumenta a confiança na adequação dos modelos.

No padrão internacional #60308 sobre testes de sistemas de controle de turbinas hidráulicas, a IEC (*International Electro-technical Commission*) define muitos procedimentos que devem ser realizados para testar os controles de turbinas hidráulicas, entre os quais alguns para validar a capacidade de operação em redes ilhadas. A IEC sugere: “Ao invés de realizar testes de campo com redes isoladas reais, desenvolver um método intermediário, baseado em um simulador de rede isolado *on-line*”. [6]

2.0 - TESTES DO REGULADOR DE VELOCIDADE NA UNIDADE GERADORA REAL

2.1 Exemplo de Teste em Malha Aberta

A Figura 2a mostra um sinal de desvio de frequência, que foi injetado na porta de entrada do feedback de frequência do regulador de velocidade, sobreposto na frequência da tensão real que aciona o regulador de velocidade. A Figura 2b mostra as respostas reais e simuladas do desvio de potência. A simulação foi feita utilizando modelos *Matlab Simulink*, com os parâmetros listados na Tabela 1, de acordo com as informações disponíveis no momento dos testes. Nada leva a crer que os modelos e os parâmetros utilizados na simulação não refletem a realidade, exceto pelo desvio observado em aproximadamente 2000 segundos, onde a queda de potência é ligeiramente maior que na simulação.

Tabela 1 : Parâmetros do modelo do regulador de velocidade e da turbina. Teste em malha aberta.

Kp	Ki	Bp	Tw (s)	Phi (1/pu)	Ksm (pu/s)
1.5	0.09	5%	3.16	0.045	3.08

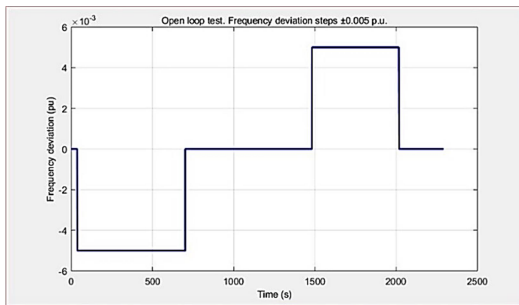


FIGURA 2a – Teste em Malha Aberta. Desvio de Frequência

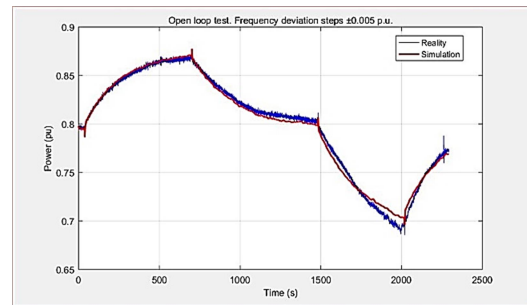


FIGURA 2b – Resposta de Potência

2.2 Exemplo de Teste em Malha Fechada

Apesar de ter dados dos testes em malha aberta para a potência da turbina em estado estacionário e a resposta do servomotor do distribuidor a um comando de entrada, além de parâmetros calculados como o tempo de partida da água, os engenheiros nem sempre conseguem reproduzir o comportamento real de movimento do sistema através da simulação off-line. Os testes em malha fechada, em particular, muitas vezes revelam comportamentos não lineares que não foram previstos através de simulações off-line baseadas em modelos não validados. Os engenheiros precisam investigar por que seu modelo não corresponde à realidade. No entanto, esses tipos de testes de campo demonstram como as simulações feitas com os modelos de reguladores e motores primários nem sempre fornecem resultados que refletem a realidade.

A emulação do modo de operação ilhado é particularmente relevante para a validação de modelos de turbinas hidráulicas. Por exemplo, o parâmetro de tempo de partida da água T_w no modelo de uma turbina hidráulica, representando a inércia da água, é mais bem identificado por testes em malha fechada porque a relação da inércia da água sobre a inércia rotativa determinará uma frequência natural e o grau de estabilidade da unidade hidráulica. A simulação off-line deste modo de operação levará a uma melhor aproximação do valor de T_w do que a repetição de um teste em malha aberta.

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos do rotor, regulador de velocidade e turbina. Teste em malha fechada.

H (MJ/MVA)	Kp	Ki	Bp	Tw (s)	Phi (1/pu)	Ksm (pu/s)
2.5	2.0	0.09	5%	3.16	0.045	3.08

Em um teste real conduzido com um hidrogerador, foi aplicada uma perturbação na carga, como um degrau de 5%, através de uma carga virtual no simulador em tempo real que compõe a bancada de testes (ver Figura 3). O comportamento real parecia ser instável e a perturbação foi interrompida. No entanto, as simulações offline mostraram um comportamento estável. Um ajuste muito bom foi finalmente obtido melhorando o modelo do servomotor do distribuidor e aumentando ligeiramente o parâmetro de tempo de partida da água. O modelo utilizado não representa a complexidade real de um sistema de controle de um servomotor do distribuidor. Conclui-se que os resultados de tal teste indicam que configurações que poderiam causar oscilações devem ser evitadas em um sistema mecânico cujo modelo é simplificado em comparação com a realidade.

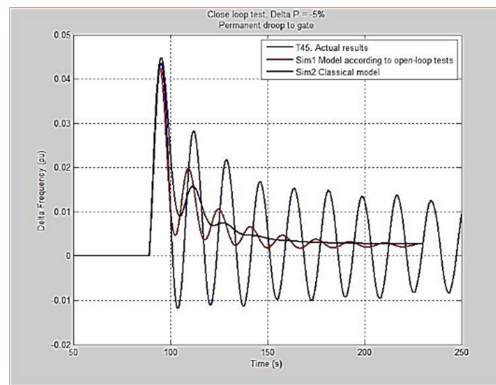


FIGURA 3 – Teste em Malha Fechada. Diminuição Súbita de 5% da Carga. Desvio de Frequência.

3.0 - MONITORAMENTO PERMANENTE

3.1 Alerta de Limite

Em um modo de monitoramento permanente, como em qualquer sistema de gravação/armazenamento digital de sinais, a bancada de testes começa a registrar os sinais necessários para análises pós-evento quando um limiar de tensão e/ou frequência é atingido. Os sinais são medidos ou calculados em tempo real: sequências de tensão e corrente (direta, reversa e zero), potência ativa e reativa, frequência, velocidade de rotação, corrente de excitação, tensão de excitação, nível de água (*water head*), curso do servomotor do distribuidor e, quando disponíveis, sinais internos do regulador de velocidade e do AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

3.2 Simulação Permanente em Tempo Real com Sinalizadores de Discrepâncias da Simulação para a Realidade

Para melhorar a bancada de testes, um novo recurso está sendo investigado, que resultaria em uma instalação permanente dentro da usina. A ideia é detectar um erro de modelagem de excitação ou do sistema de controle de velocidade/frequência.

3.2.1 Critérios para Gerar um Alerta de Perturbações

A Tabela 3 mostra os critérios que podem ser implementados para gerar um alerta de perturbação e, assim, iniciar a gravação.

Tabela 3 – Critérios para o Alerta de Perturbação

Sinal	Função	Limite
Frequência	Desvio Absoluto	0.1 Hz
Sequência de Tensão Zero	Desvio Absoluto	0.005 p.u.
Sequência de Tensão Direta	Desvio Absoluto	0.05 p.u.
Sequência de Tensão Reversa	Desvio Absoluto	0.005 p.u.

3.2.2 Critérios para Gerar um Alerta de Precisão do Modelo

Para o propósito desta investigação, o critério selecionado é o erro quadrático médio entre os resultados da simulação e os sinais reais. O valor de erro é redefinido como zero após um período predeterminado (definido como 50 segundos). O usuário pode selecionar critérios diferentes e redefinir este período. A Tabela 4 mostra os critérios que podem ser implementados para gerar um alerta de precisão do modelo.

Tabela 4 – Critério para Alerta de Precisão do Modelo

Sinal	Limite
Tensão de Excitação	0.1 p.u.
Velocidade/Frequência	0.1 Hz
Servomotor do distribuidor	0.01 p.u.

3.2.3 Modelos Usados para Comparação

Uma grande melhoria nos modelos da referência [2] é o uso de um modelo de gerador de pólo saliente que gerará o sinal de velocidade do rotor, a tensão terminal e o torque elétrico. Os modelos do controlador e da turbina usados para comparação são idênticos aos usados para acionar os modelos dos geradores síncronos 1 e 2 do sistema de potência simulado (ver Figura 5). Na vida real, é claro, os sinais reais da unidade monitorada/testada são medidos

ou calculados a partir de medições. Os modelos do regulador de velocidade, turbina e sistema de excitação são similares àqueles em referência [2].

3.2.4 Modelo da Unidade Geradora

A Figura 4 mostra um esquema do modelo do gerador. Os sinais de entrada são a potência mecânica do modelo da turbina, a tensão de excitação vinda da saída do excitador e as correntes dos eixos direto e de quadratura calculadas a partir da corrente real medida. Neste ponto do projeto, a saturação é negligenciada. Esse modelo é inspirado no modelo de máquina síncrona mostrado na referência [1]. Somente a sequência direta é modelada.

O sinal de frequência que induz o regulador de velocidade se origina do sinal de velocidade/frequência de acordo com a Equação 1), que é a solução correta.

$$\Delta\omega = \int \frac{(T_{mm} - T_e)}{2H} dt \quad 1)$$

Onde T_{mm} = Torque mecânico em valor unitário (pu), a partir do modelo utilizado para comparação;
 T_e = Torque elétrico do modelo do gerador em valor unitário;
 H = Inércia rotativa constante em segundos ou MJ / MVA;
 $\Delta\omega$ = Desvio de velocidade calculado em valor unitário para comparação com valores reais.

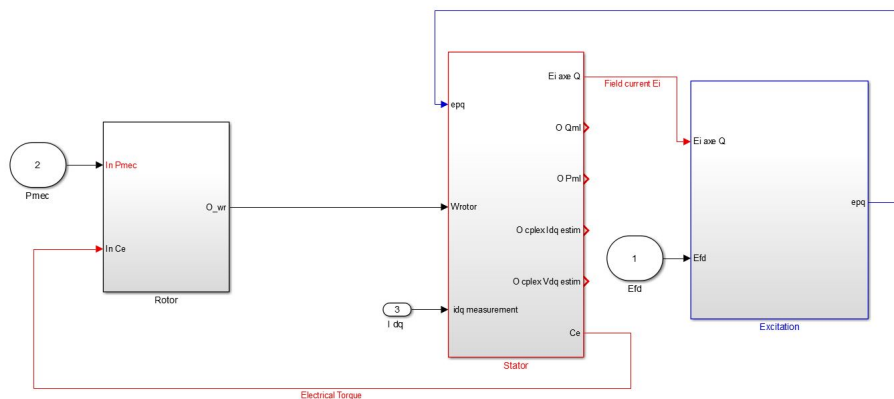


FIGURA 4 – Modelo do Gerador de Pólo Saliente

3.2.5 Modelo para Simulação do Sistema de Potência

Para o propósito deste estudo de viabilidade e como uma opção para atividades de treinamento, um modelo matemático de sistema de potência foi implementado, como é o caso da bancada de teste em questão. O sistema de potência foi modelado na plataforma Matlab Simscape ® e seu esquema é mostrado na Figura 5. A rede principal é modelada como um gerador síncrono gigante, com classificação de 10.000 MVA. Sua constante de inércia $H = 3,5$ MJ-s / MVA. Seu sistema de excitação é modelado como um simples controlador PI com $P = 200$ e $I = 10$, e o controlador de potência/frequência é modelado como mostrado na Figura 6.

A unidade monitorada/testada é conectada à rede principal através de um transformador de potência de 100 MVA e dois circuitos de transmissão de 300 km, 230 kV. Duas unidades do mesmo tamanho operam em paralelo e são modeladas como uma unidade equivalente de 200 MVA. Observe que, no modo de monitoramento real, os sinais monitorados são originados da unidade testada/monitorada real e das PMU remotas, se disponíveis.

Seria então possível calcular a tensão e corrente do alternador monitorado e validar o modelo da rede entre os barramentos B1 e B2. Os exemplos incluídos neste artigo usam apenas sinais locais, o que é suficiente para detectar um erro de modelagem ou uma anomalia do sistema de controle de velocidade/potência, mas que pode ser menos preciso para modelos de sistemas excitadores ou alternadores.

Em um esforço para evitar confusão, os sinais da simulação da rede são identificados como "Real" ou "Medido". Os sinais dos modelos de comparação são identificados como "Comparados".

4.0 - LIMITAÇÃO DEVIDO À INSTABILIDADE E OPERAÇÃO EM MODO ILHADO

Usando a corrente real ou a potência real como sinais de entrada para o modelo da unidade geradora, ela se comporta como se a unidade fosse operada no modo ilhado: o torque elétrico não reage ao deslocamento do ângulo do rotor como é o caso da unidade real sincronizada à rede. Portanto, se o sistema de controle de

velocidade/potência não estiver configurado corretamente para operação ilhada, o sistema modelado ficará instável, mesmo que o sistema real seja mantido estável por meio da conexão síncrona à rede.

As Figuras 7 e 8 mostram como a velocidade e a potência mecânica do modelo se comportam quando os ganhos do regulador de velocidade PI, originalmente definidos como ($K_p = 1.8$; $K_i = 0.3$), são comutados para ($K_p = 5$; $K_i = 1$) alguns segundos após o início da simulação, e então retornando para as configurações originais em torno de $T = 150$ segundos. Os ganhos PI do sistema real foram definidos para ($K_p = 5$; $K_i = 1$) o tempo todo.

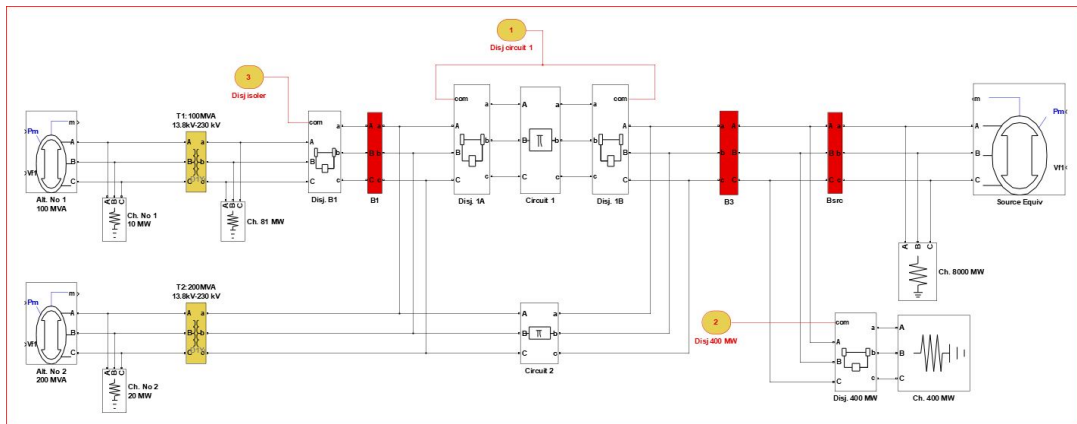


FIGURA 5 – Esquema do Sistema de Potência Simulado – Matlab Simscape Power Systems ®

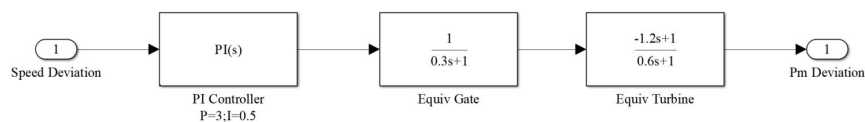


FIGURA 6 – Controlador de Frequência Equivalente da Rede

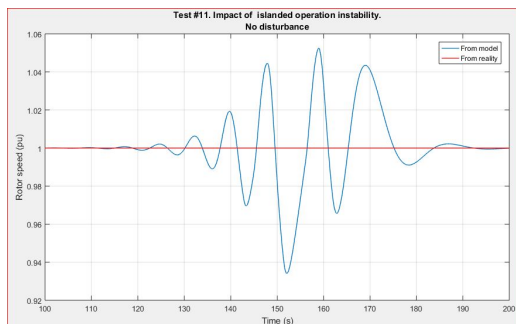


FIGURA 7 – Velocidades do Rotor Reais e Simuladas

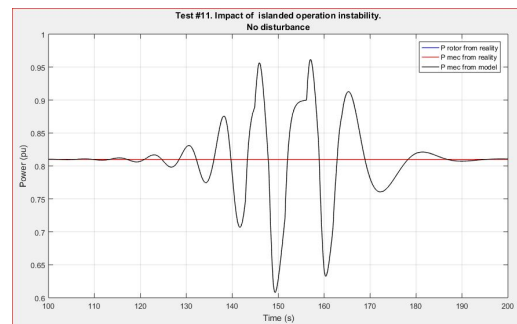


FIGURA 8 – Potências Reais e Simuladas

Esta é uma limitação da metodologia, pois o sistema real é estável, enquanto parece instável quando se baseia na modelagem. No entanto, é uma limitação que indica que a unidade geradora monitorada não está contribuindo para a estabilidade da frequência do sistema de potência. Portanto, esse tipo de observação deve levar à recomendação de modificar as configurações do regulador de velocidade.

5.0 - TESTES EM TEMPO REAL

5.1 Abertura do circuito #1

No tempo $T = 20$ segundos, os disjuntores em ambas as extremidades do circuito # 1 são abertos. A Figura 9 mostra a velocidade do rotor e os comportamentos dos sinais de frequência. A resposta do sistema mostra um amortecimento muito fraco, pois a excitação é estática e os ganhos PI do AVR são definidos como ($K_p = 100$; $K_i = 10$), sem PSS. A frequência natural de oscilação é de cerca de 1,15 Hz. Apesar dessa configuração voluntária ruim, os modelos que contribuem para gerar o sinal de velocidade comparado parecem representar a realidade corretamente.

Um zoom em dois períodos de oscilação mostra que podemos confiar no cálculo da velocidade com base na frequência computada da tensão por trás da reatância do eixo de quadratura X_q . Também pode ser observado que o sinal de velocidade do modelo é suficientemente preciso.

Outros sinais como os de potências elétrica e mecânica, tensão de excitação E_{fd} , voltagem terminal, potência reativa mostram uma aderência muito boa com a realidade. A Figura 11 mostra uma aderência muito boa dos sinais de potência reativa, considerando tanto o aumento da magnitude no estado estacionário quanto a amplitude das oscilações (ver Figura 12). É claro que isso é bastante óbvio, uma vez que a entrada para o modelo do gerador é o sinal de corrente DQ vetorizado da corrente real. Isso significa que estamos analisando a resposta forçada do modelo. Para gerar a resposta natural, é necessário modelar todo o sistema, o que está fora do escopo do projeto.

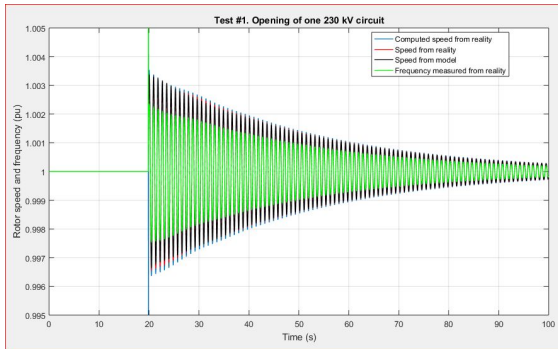


Figura 9: Abertura do Circuito #1

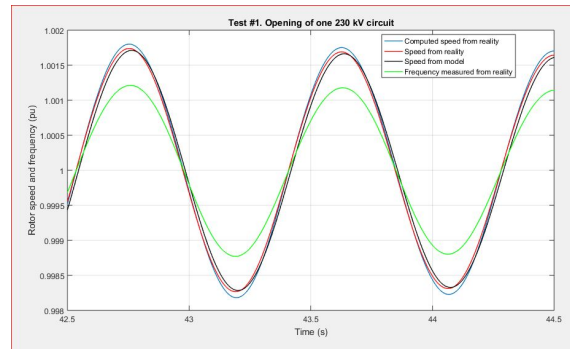


FIGURA 10 – Zoom em Dois Períodos

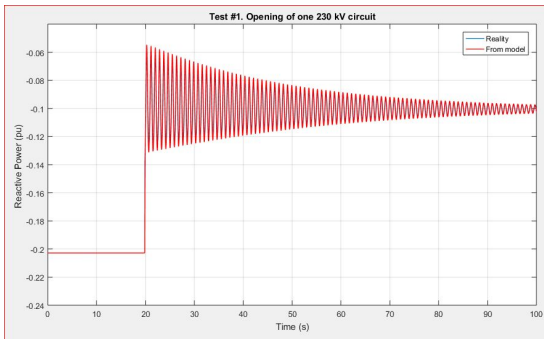


FIGURA 11 – Potência Reativa

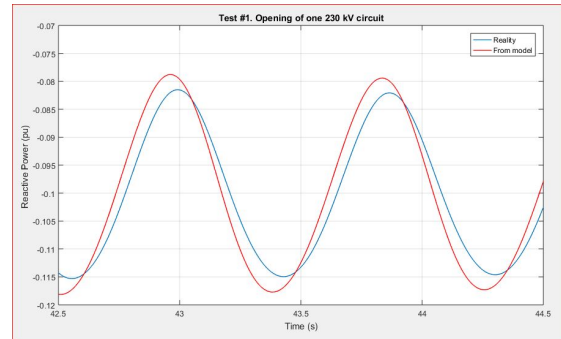


FIGURA 12 – Zoom em Dois Períodos

Tabela 5 – Configurações do AVR

	Ganho Proporcional	Ganho Integral	P.S.S.
Realidade	20	0	Off
Modelo	100	0	On

A Figura 13 mostra que modelar a excitação com o PSS ativado e com um alto ganho do excitador resulta em amplitudes de tensão do excitador muito maiores do que a realidade. Lembra-se que o sinal de entrada para o modelo do gerador é semelhante à realidade. Assim, a frequência de oscilação permanece a mesma no modelo. No entanto, um zoom no início da resposta mostra um deslocamento de fase devido à ação do PSS (Figura 14).

Os resultados do modelo não refletem qual seria a realidade se as configurações reais fossem semelhantes às do modelo. Eles nos dizem que há um erro de modelagem. Como este erro é principalmente observável no sinal de tensão de excitação, então o foco deve estar nas configurações do AVR.

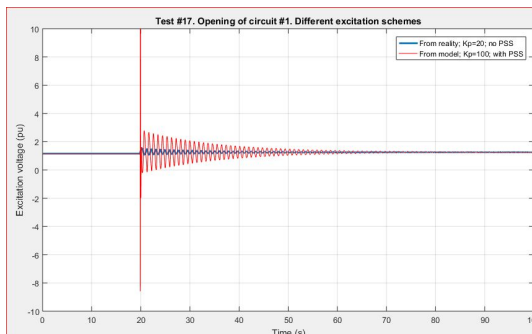


FIGURA 13 – Tensão de Excitação

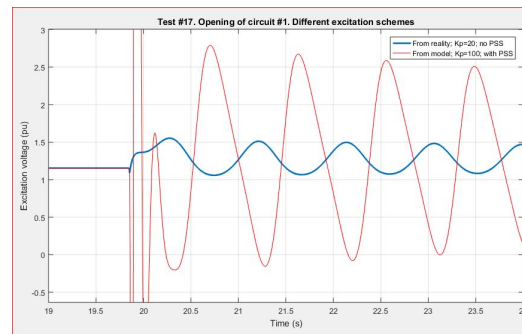


FIGURA 14 – Zoom no Início da Simulação

A Figura 15 mostra o erro de tensão de excitação calculado a partir do erro de desvio padrão móvel entre o sinal de tensão de excitação do modelo e a realidade. Este sinal foi calculado através do pós-processamento, uma vez que ainda não foi implementado no algoritmo em tempo real.

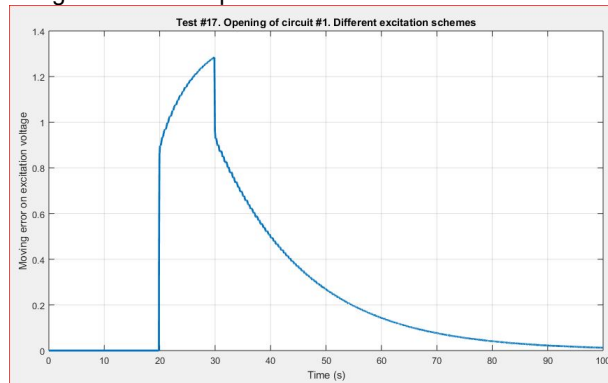


FIGURA 15 – Erro de Desvio Padrão na Tensão de Excitação

5.2 Grandes Perturbações de Frequência na rede

Para gerar uma grande perturbação de frequência na rede, a carga de 400 MW - 230 kV é eliminada no tempo $T = 20$ segundos. Como foi o caso do disparo do circuito, o sinal de velocidade comparado resultante do modelo do rotor é bastante semelhante à realidade. No entanto, como pode ser visto na Figura 16, um erro de + 10% na constante de inércia, de 2,5 MJ / MVA a 2,75 MJ / MVA, leva a um comportamento diferente observável.

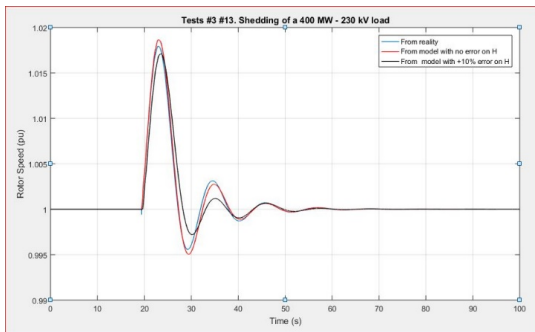


FIGURA 16 – Velocidade do Rotor

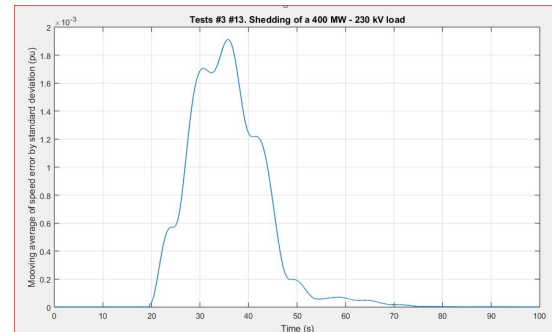


FIGURA 17 – Desvio Padrão

A Figura 17 mostra o erro de velocidade calculado a partir do erro de desvio padrão móvel entre o sinal de velocidade do modelo e o real. O erro não parece muito grande, pois seu valor máximo é de 0,0019 p.u. Mas esse valor corresponde a 0,114 Hz, o que pode ser considerado importante o suficiente para verificar a validade do coeficiente de inércia. Um limiar definido de 0,1 Hz teria levantado uma bandeira indicando uma incompatibilidade entre realidade e simulação.

O erro também pode ser observado na potência mecânica (ver Figura 18). Mas não é observável na potência elétrica, uma vez que este sinal é calculado de acordo com o sinal de corrente real.

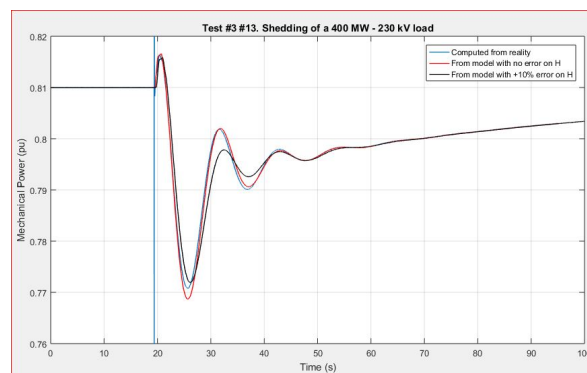


FIGURA 18 – Grande Perturbação de Frequência na Rede. Potência Mecânica

6.0 - CONCLUSÃO

Uma bancada de testes que combina recursos de monitoramento e testes locais para unidades geradoras foi desenvolvida e usada com frequência recentemente. Um simulador em tempo real dentro da bancada de provas

permite a realização de testes em malha fechada em turbinas hidráulicas, emulando o modo de operação ilhado do gerador, porém sincronizado com a rede principal. Um novo recurso está em desenvolvimento, que permitirá comparar os resultados da simulação em tempo real com a realidade.

Utilizando um processador para desenvolver o modelo matemático do sistema de potência e um outro processador para o monitoramento em tempo real e validação dos modelos, demonstrou-se a viabilidade da bancada de testes que poderia informar imediatamente ao operador do sistema que os modelos dinâmicos atuais da unidade e dos controladores monitorados não refletem a realidade, seja qual for a razão para isso.

Ocorrendo durante a operação normal, distúrbios no sistema de energia ou durante testes locais, comportamentos das unidades geradoras que não correspondam às expectativas significam que algo está errado com o equipamento, e precisa ser corrigido e/ou a configuração foi alterada; portanto, o modelo deve ser atualizado.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P. Kundur, "Power System Stability and Control", The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, Inc
- (2) M. Langevin, Amine Bahjaoui, "A Test Bench Combining Real-time Comparison Between Reality and Dynamic Models of Hydro-generators, and HIL Testing", Hydro Power Conference, Gdansk, Poland, October 2018
- (3) North American Electric Reliability Corporation, "Reliability Guideline – Power Plant Model Verification and Testing for Synchronous Machines", NERC, julho de 2018
- (4) M. Langevin, J-N Paquin, "Pruebas especializadas y nueva herramienta para definir con precisión los modelos de reguladores de velocidad y turbinas", XVII ERIAC, CIGRÉ, Ciudad del Este, Paraguai, maio de 2017
- (5) North-American Electric Reliability Corporation, "Verification of Models and Data for Turbine/Governor and Load Control or Active Power/Frequency Control Functions", NERC's Standard MOD-027-1
- (6) International Electrotechnical Commission, "Hydraulic turbines – Testing of control systems", IEC's International Standard 60308, segunda edição 2005-01
- (7) M. Langevin, S. Guindon, E. Agneholm, C. Löfqvist, "Testing a Power System Frequency Control Product", Hydro Review, outubro de 2014

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marc Langevin recebeu seu diploma de engenharia elétrica da École Polytechnique de Montréal em 1975, e seu doutorado na École Centrale de Lyon (França) em 1987. Tem mais de trinta anos de experiência no campo da análise de sistemas de potência. Na Hydro-Québec, como especialista em estudos de estabilidade de sistemas de potência, propôs novas estratégias para ajuste de reguladores de velocidade e estabilizadores de sistema de potência (PSSs). Também trabalhou como consultor, enquanto desenvolvia uma bancada de testes para testes no local em reguladores de velocidade. Hoje, trabalha para a OPAL-RT Technologies. Dr. Langevin é um engenheiro profissional registrado na província de Quebec, no Canadá.



Amine Bahjaoui recebeu seu diploma de bacharel pela Université Laval, Québec, em 2009. Especializou-se em equipamentos de energia e usinas elétricas. Iniciou sua carreira como especialista em diagnóstico de equipamentos elétricos de alta tensão na Exact-DMI em 2009. Entrou para a OPAL-RT Technologies em 2015, como engenheiro de modelagem e testes, onde também trabalha para melhorar um banco de testes para testes de excitação e reguladores de velocidade para geradores de energia. O Sr. Bahjaoui é engenheiro profissional registrado na província de Quebec, no Canadá.



Marcela Trindade recebeu seu diploma de engenharia eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2005, e seu mestrado na mesma universidade, em 2008. Trabalhou por mais de 5 anos como pesquisadora na instituição, com desenvolvimento de sistemas de aquisição, condicionamento e processamentos de sinais. Desde 2014 atua desenvolvendo projetos e negócios especialmente no setor elétrico, hoje trabalhando na OPAL-RT Technologies como Gerente de Desenvolvimento de Negócios, e é uma engenheira profissional registrada na cidade do Rio de Janeiro.