



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GAT/23

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - IV

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

**MODELAGEM DINÂMICA NÃO LINEAR DE TURBINA FRANCIS A PARTIR DE DADOS DE ENSAIO DE
MODELO REDUZIDO**

**Guilherme D. de Cerqueira(*)
FURNAS**

**Pedro Paulo de C. Mendes
Consultor Independente e
Prof. Voluntário na UNIFEI**

**Nilo José P. de Macedo
Consultor Independente**

RESUMO

Este trabalho apresenta alguns resultados da dissertação de mestrado, onde foi desenvolvido um modelo matemático não linear, baseado em seis famílias de curvas características de uma turbina hidráulica, do tipo Francis, e seu regulador de velocidade, para uma determinada usina de concessão de FURNAS, a partir de dados obtidos em ensaios de modelo reduzido em laboratório de hidráulica, validados por oscilografias de testes de comissionamento da modernização da usina.

PALAVRAS-CHAVE

Turbina Hidráulica Francis, Modelagem Dinâmica Não Linear, Ensaio de Modelo Reduzido de Turbina

1.0 - INTRODUÇÃO

No passado, devido às limitações computacionais impostas pelos programas de estabilidade eletromecânica (TRANSDIR e MICRODIN), geralmente se utilizavam modelos linearizados ou não lineares mais simples, do tipo "HYGOV", para representar a dinâmica das turbinas hidráulicas.

Hoje, com a utilização de programas de estabilidade mais modernos, tais como o ANATEM, sem limitação de número de blocos e com maior capacidade de representação de elementos de controle, outros modelos mais elaborados de turbinas hidráulicas podem ser implementados.

O modelo matemático mais completo de turbina foi inspirado na modelagem criada pela UHE Itaipú durante os estudos de projeto executivo da usina e dos sistemas de transmissão associados, e que foram apresentados na dissertação de mestrado de Marcelino Almeida em 1987, pela UNIFEI (1).

Na ocasião, o modelo mais completo de turbina elaborado por Almeida para as unidades de 50Hz e 60Hz de Itaipú, em software de programação científica CSMP/IBM, teve que ser simplificado e linearizado em algumas partes, para se adequar a limitação do número máximo de blocos disponíveis para uso nos programas TRANSDIR e MICRODIN, bastante utilizados pelas equipes de estudos das empresas do Setor Elétrico da época.

Esse modelo mais completo e bastante não linear é tão útil quanto maior for a variação do nível da água na barragem, como por exemplo, nas usinas a fio d'água. Ou quando a usina é conectada por elos de corrente contínua (HVDC) ao resto do sistema, tendo possibilidade de ser submetida a interrupções abruptas de potência e, por isso, a representação mais fiel da dinâmica das turbinas torna-se mais importante para os estudos.

(*) Rua Real Grandeza, 219, Bloco E, sala 101 – CEP 22281-900 Rio de Janeiro – RJ - Brasil
Tel: (+55 21) 2528-6033 – Fax: (+55 21) 2528-5528 – Email: gdc@furnas.com.br

2.0 - TURBINA FRANCIS

Em 1847 o inglês James Bicheno Francis (1815-1892), trabalhando nos EUA, melhorou uma máquina de escoamento centrípeta desenvolvida em 1838 por Samuel Dowd (1804-1879), de modo que, a partir disso, esse modelo de turbina passou a receber o nome de Turbina Francis.

As turbinas Francis são o tipo mais difundido nas usinas hidrelétricas brasileiras, sendo mais adequadas para desníveis de 40 a 400 m. Possuem um rotor na forma de um cilindro vazado com a parede lateral formada por palhetas curvas. A água de entrada é dirigida por uma caixa em espiral e um sistema pré-distribuidor de palhetas estáticas que a forçam a atravessar radialmente a parede do rotor, empurrando as palhetas deste. A água sai pela base do rotor praticamente com pressão e velocidade muito reduzidas. O distribuidor é um conjunto de pás móveis, responsável pelo controle da quantidade de água (vazão) que entra no rotor, variando assim a potência gerada. A Figura 1 apresenta dois exemplares de turbinas do tipo Francis de grande porte.

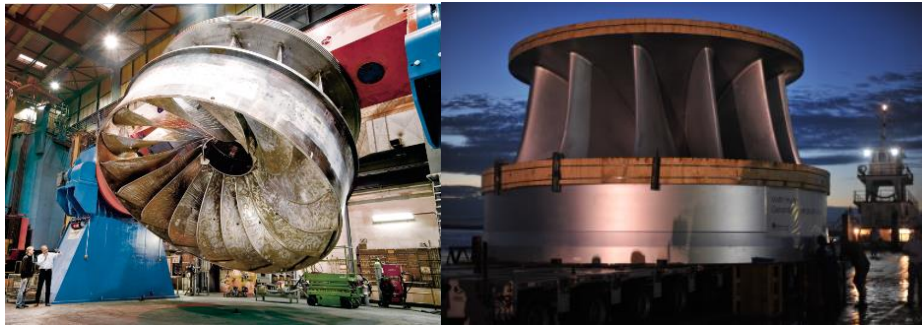


Figura 1 – Exemplares de turbinas Francis das usinas Guri e Belo Monte, respectivamente. Refs. (2) e (3)

3.0 - ENSAIOS DE MODELO REDUZIDO E CURVAS DE COLINA

Entre as etapas de projeto de engenharia que envolvem a construção de grandes empreendimentos de geração de energia hidrelétrica, existem os ensaios em laboratório de hidráulica dos modelos em escala reduzida das turbinas hidráulicas para estudos e avaliações. A figura 2 apresenta o detalhe de um modelo reduzido de turbina sendo ensaiado em laboratório.



Figura 2 – Vista de um laboratório de ensaios de modelo reduzido (Andritz, Araraquara/SP)

As avaliações das características operativas hidro mecânicas de uma turbina, ainda não são possíveis de serem feitas com exatidão somente através de modelos matemáticos computacionais, devido à complexidade dos fenômenos relacionados ao escoamento do fluido no circuito hidráulico completo, além disso, com os ensaios em laboratório de modelo reduzido é possível realizar inúmeros testes que não são viáveis em campo.

Mantendo-se normalmente uma queda bruta fixa em um metro, varia-se a abertura do distribuidor combinada com diversas frenagens no eixo, e através de instrumentação específica, são medidos o torque na ponta do eixo, a vazão, a rotação e calculado o rendimento da turbina, para diversos pontos operacionais.

Dos dados levantados experimentalmente nesses ensaios são construídas as curvas de colina das turbinas e definidas as faixa operativas das turbinas, assim como as faixas proibitivas devido a cavitação e vibração.

A figura 3 apresenta o diagrama de colina da UHE Itaipú já referenciado ao protótipo, utilizada por Almeida (1) em sua dissertação de mestrado para modelagem não linear de turbina Francis em programação CSMP da IBM. Em cor vermelha encontram-se as curvas de mesmo rendimento da turbina, em azul as curvas de mesma potência e em amarelo de mesma abertura do distribuidor, para variações da vazão (eixo das ordenadas) e da queda líquida (eixo das abscissas).

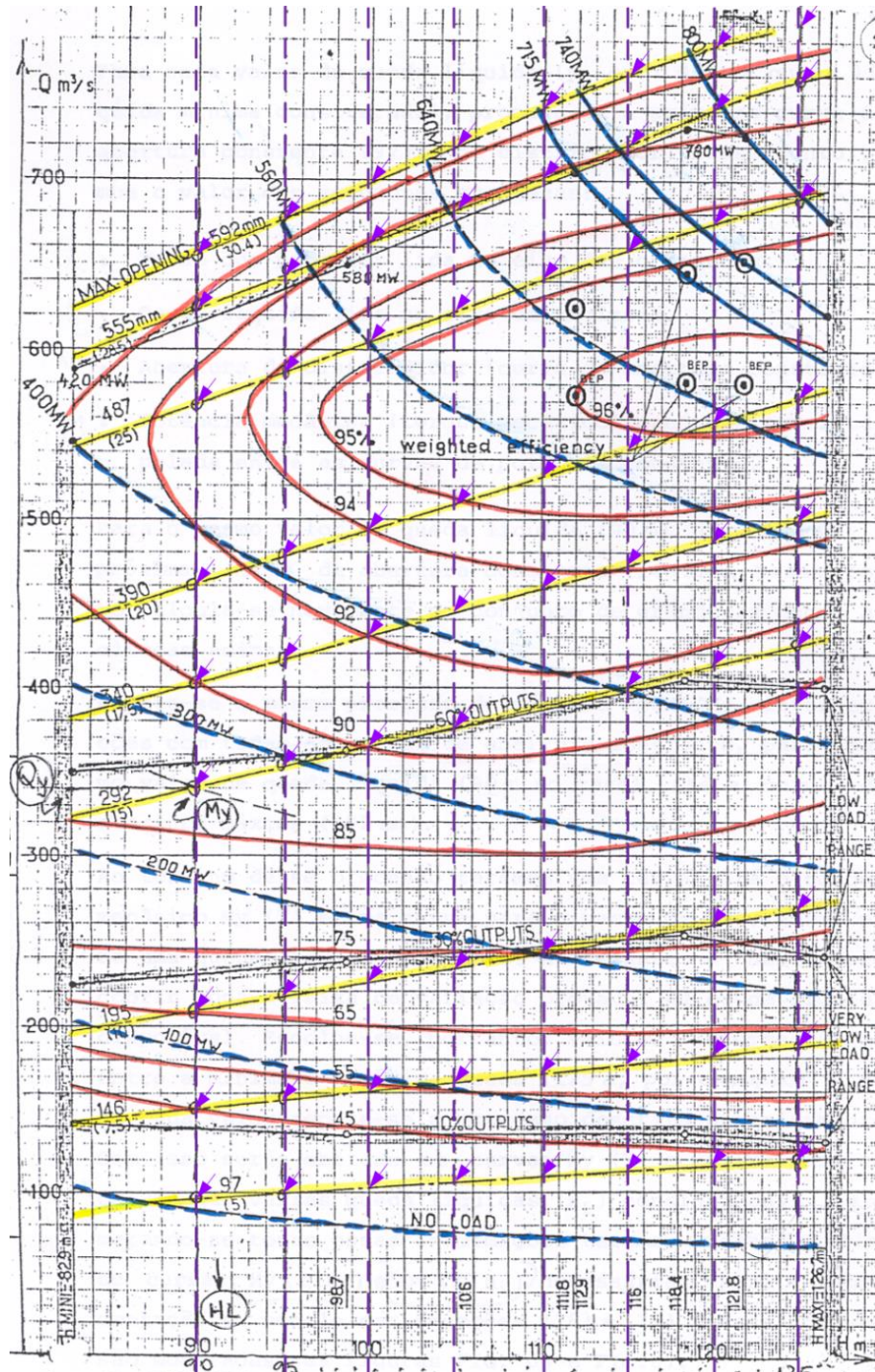


Figura 3 – Diagrama de colina do protótipo, UHE Itaipú 50 Hz

Além do diagrama de colina clássico apresentado na figura 3, a partir dos dados obtidos nos ensaios do laboratório de hidráulica, podem ser construídos também diagramas adicionais que consideram a rotação variável em torno do valor nominal, conforme figuras 4 e 5.

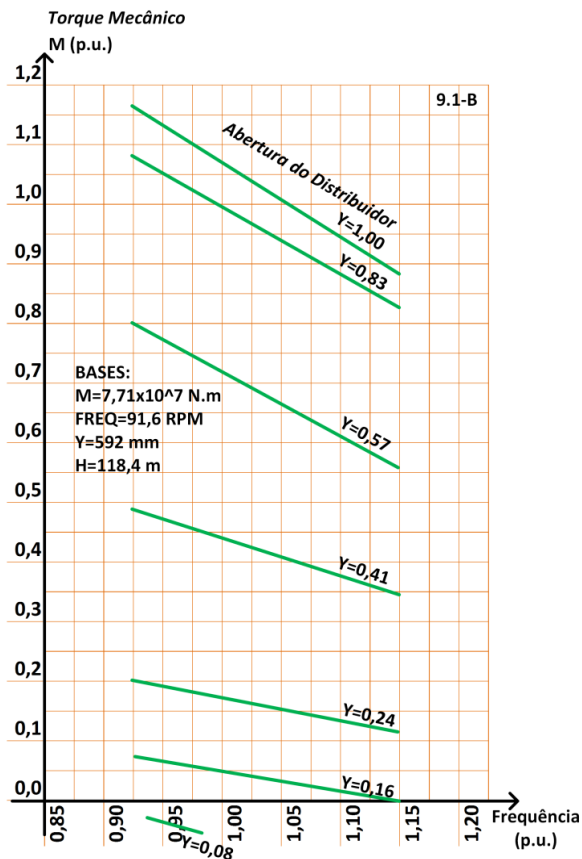


Figura 4 – Diagrama do torque em função da rotação e da abertura do distribuidor em p.u., UHE Itaipu 50 Hz

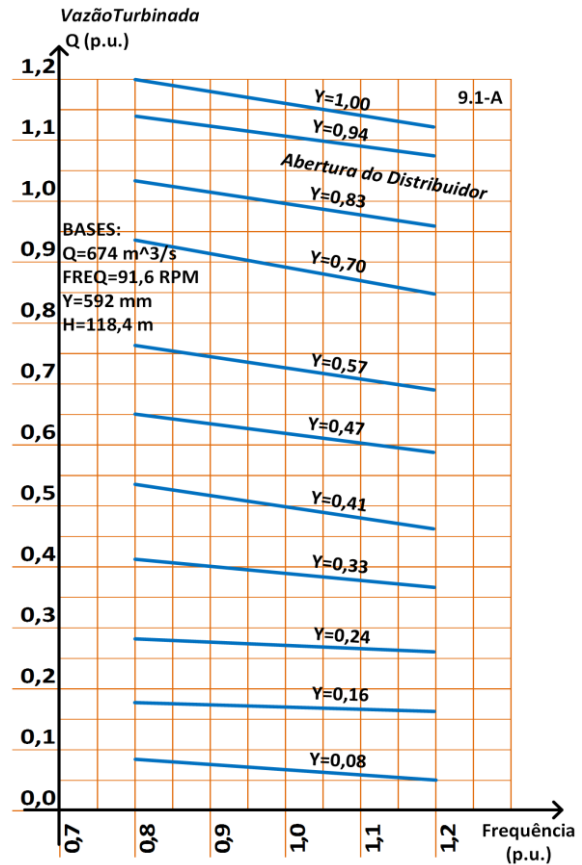


Figura 5 – Diagrama da vazão em função da rotação e da abertura do distribuidor em p.u., UHE Itaipu 50 Hz

4.0 - MODELOS DINÂMICOS DE TURBINAS

Para este estudo foram aplicadas duas modelagens da turbina e regulador de velocidade da UHE Furnas para fins de comparação: o modelo clássico da Base de Dados do programa TRANSDIR, que foi transferido para a Base de Dados do ONS no programa Anatem, chamado de HYGOV (6) na biblioteca de modelos do programa PSSE; e o modelo de Seis Coeficientes Variáveis inspirado nos trabalhos de Almeida (1).

4.1 Modelo 1 – HYGOV (PSSE)

A figura 6 apresenta o modelo não linear HYGOV, onde, em consequência a uma dada abertura do distribuidor (g), uma constante de inércia da água no conduto de adução (T_w), uma vazão de *speed no load* (q_{NL}), um ganho da turbina (A_t), e seu amortecimento com o desvio de rotação (D_{turb}), é gerada uma potência mecânica no eixo da máquina.

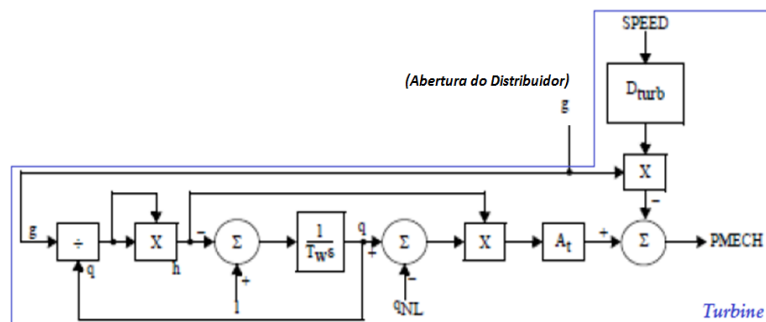


Figura 6 – Diagrama em blocos do modelo não linear HYGOV de turbina hidráulica
 4.2 Modelo 2 - Seis Coeficientes Variáveis

Foi aplicado às unidades geradoras da UHE Furnas a mesma metodologia de Almeida (1). As demonstrações de equacionamento e de como extrair os dados da curva de colina encontram-se em (1). A figura 7 apresenta o diagrama de blocos representativo desse modelo.

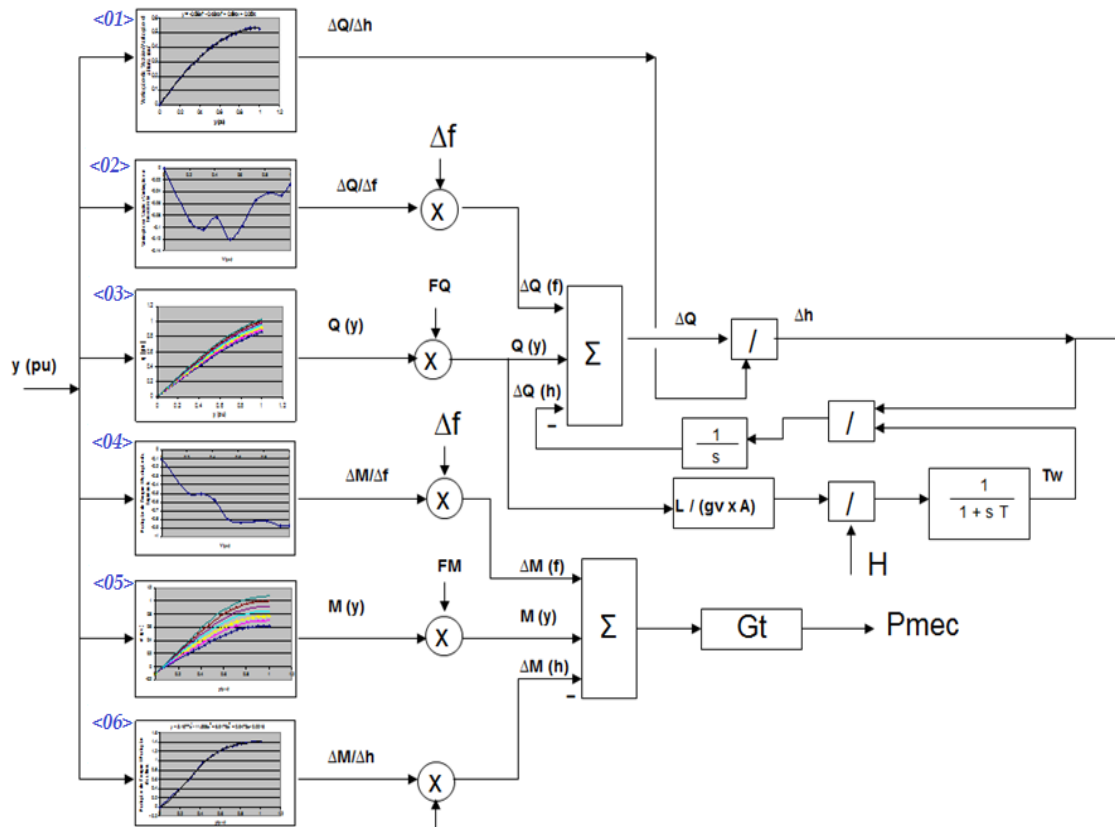


Figura 7 – Modelo de turbina de seis coeficientes variáveis para UHE Furnas

Esse modelo de turbina estabelece a dependência das seguintes grandezas em relação à abertura do distribuidor (Y): vazão (Q); torque (M); variação da vazão pela variação da pressão ($\Delta Q/\Delta h$); variação da vazão pela variação da rotação ($\Delta Q/\Delta f$); variação do torque pela variação da pressão ($\Delta M/\Delta h$); variação do torque pela variação da rotação ($\Delta M/\Delta f$). Possui como saída o torque mecânico que em subtração ao torque elétrico oriundo do gerador síncrono estabelece o torque acelerante da equação de oscilação eletromecânica, mais conhecida como *equação swing* (7).

As famílias de curvas <03> e <05> da figura 7 foram reduzidas para uma curva mediana para evitar dificuldades numéricas de inicialização no programa Anatem, sem prejuízo para a resposta final de simulação.

5.0 - REGULADOR AUTOMÁTICO DE VELOCIDADE E DE TENSÃO

Em todas as simulações foi utilizado o modelo de regulador de tensão digital UNITROL 5000, da ABB, conforme está detalhado em (5).

Nas simulações do modelo 1 de turbina, HYGOV, utilizou-se o regulador de velocidade clássico mais difundido na Base de Dados do ONS. Já nas simulações do modelo 02, de Seis Coeficiente Variáveis utilizou-se o modelo conforme o fornecimento da Alstom, atual GE, o regulador digital de velocidade NEYRPIC 1500, descrito em (5).

6.0 - VALIDAÇÃO DE COMISSIONAMENTO

Para realizar a comparação entre os diversos modelos, aproveitaram-se as simulações para validação de rejeição de carga do modelo 2, e foram sobrepostas as simulações com o modelo 1, HYGOV, do item 4.1, em duas situações com queda bruta nominal (1 pu=95 m), assim como a queda bruta igual à informada no instante de cada um dos testes de campo.

6.1 Rejeição de Carga

Foram realizadas simulações (curvas em vermelho) para validar as oscilografias (curvas em azul), registradas durante o comissionamento da UG06 da UHE Furnas, considerando rejeições totais de carga, com abertura do disjuntor principal do gerador, nos patamares de 100%, 75% e 25%, referentes à potência máxima do grupo gerador de 152 MW. As curvas tracejadas em preto e em verde referem-se as simulações do modelo HYGOV, com queda bruta nominal e a queda bruta verificada, respectivamente.

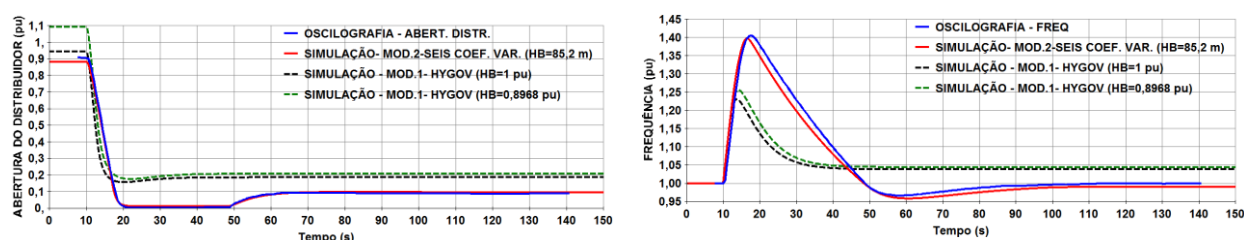


Figura 8 – Rejeição de 100% de carga, com HB=85,2 m– Abertura do Distribuidor / Frequência

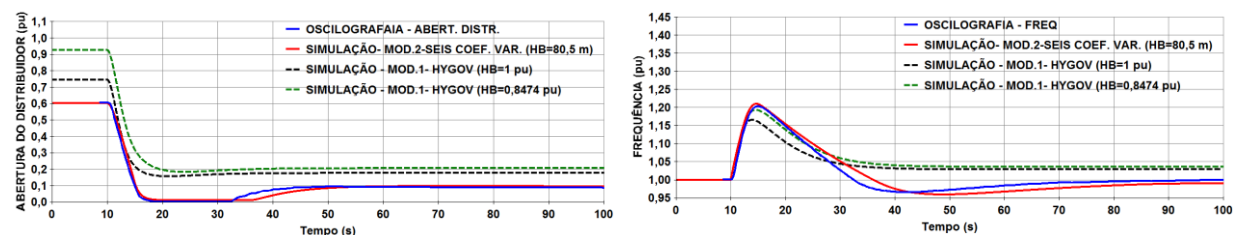


Figura 9 – Rejeição de 75% de carga, com HB=80,5 m– Abertura do Distribuidor / Frequência

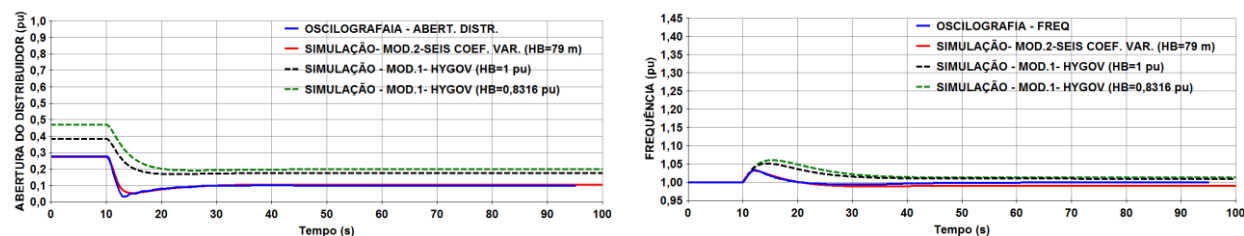


Figura 10 – Rejeição de 25% de carga, com HB=79 m– Abertura do Distribuidor / Frequência

Das figuras de 8 a 10, observa-se que o novo modelo baseado em dados de modelo reduzido apresenta melhor validação que o modelo HYGOV anterior.

6.2 Degrau na referência de abertura do distribuidor

Foram realizadas simulações (curvas em vermelho) para validar as oscilografias (curvas em azul) referentes à aplicação de degrau de aproximadamente $\pm 0,0023$ p.u. no erro de controle do regulador de velocidade, operando em modo de potência, para verificar o tempo de resposta da malha de controle com os ajustes da planta, sendo a queda bruta observada de 77,5 m. As curvas tracejadas em preto e em verde referem-se as simulações do modelo HYGOV, com queda bruta nominal e a queda bruta verificada, respectivamente.

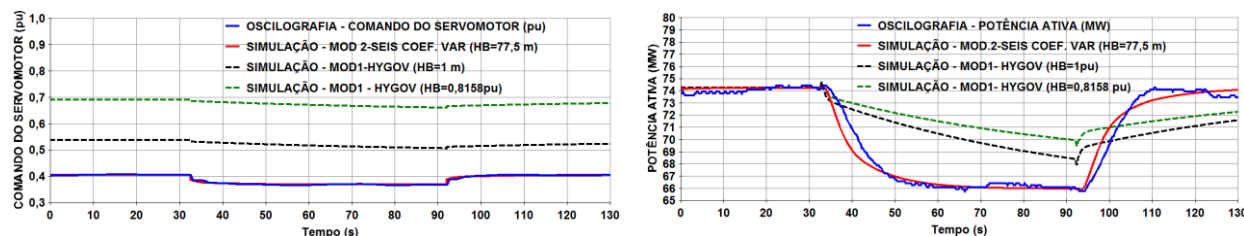


Figura 11 – Degrau no erro de controle do RV–sinal de controle de abertura / potência elétrica (MW)

7.0 - SIMULAÇÕES ADICIONAIS

7.1 –Influência da Queda Bruta (HB)

Com o modelo de seis coeficientes já validado, realiza-se a análise do comportamento dinâmico da unidade geradora 6, da UHE Furnas perante uma rejeição total de 114 MW de carga (75%), em vários cenários de queda bruta (HB=80, 85, 90, 95 e 98m; do verde ao vermelho). Os resultados são apresentados na figura 12. Foi utilizada a constante de inércia, H, igual a 5 segundos em todos os casos, conforme consta na Base de Dados do ONS.

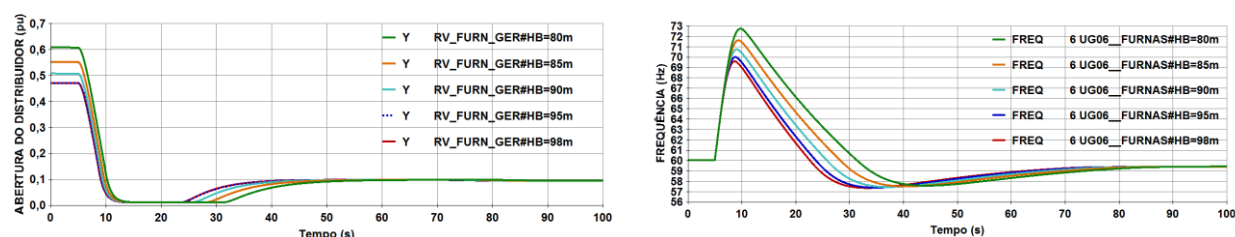


Figura 12 – Rejeição de 75% de carga, com variação da queda bruta– Abertura do Distribuidor / Frequência

Da figura 12 pode-se observar que quanto menor a queda bruta na barragem, maior será a abertura do distribuidor para manter a mesma geração de potência e, devido a essa abertura maior, após a rejeição de carga será demandado um tempo um pouco maior para fechar totalmente o distribuidor, levando a uma maior sobrefrequência.

Durante as simulações no programa Anatem deve-se ter cuidado para escolher uma queda bruta coerente com a realidade hidráulica da usina. Os seis diagramas de coeficientes variáveis são gerados a partir dos dados das curvas de colina dos ensaios de laboratório de hidráulica. Se o caso importado do programa Anarede estiver com despacho de potência ativa muito alto e a queda bruta escolhida no código definido pelo usuário (CDU) for muito baixa, corre-se o risco de cair em um ponto de operação hidráulico inexistente no mundo real. Neste caso costuma surgir erro de inicialização com interrupção da simulação no programa Anatem.

É boa prática consultar o diagrama de colina do protótipo da turbina (escala real) para conferir quais são os conjugados mecânicos ou potências ativas possíveis de serem geradas com a queda hidráulica disponível.

8.0 - CONCLUSÃO

O modelo não linear de turbina elaborado para a UHE Furnas seguindo a filosofia utilizada por Almeida (1) para o projeto da UHE Itaipú apresentou um desempenho bastante satisfatório, mostrando uma boa aderência com as curvas dos ensaios realizados na planta. Foi aprovado pelo ONS e considerado válido para realização de estudos com o programa Anatem.

A realização das diversas simulações com o modelo validado permite a obtenção de experiência e sensibilidade em relação aos diversos parâmetros envolvidos nos modelos. Pode-se chegar inclusive a sugestões para ajustes ótimos de parâmetros para os reguladores, que potencialmente podem melhorar o desempenho dos reguladores perante distúrbios.

Por se tratar de um modelo com bastante valor agregado da área da engenharia mecânica e hidráulica, torna-se inicialmente um enorme desafio para os eletricitistas durante a elaboração dos conceitos, aquisição e tratamento dos dados.

No caso de usinas mais antigas, de até cinquenta anos atrás, os relatórios de modelo reduzido costumam se encontrar em papel bastante deteriorado e com baixa resolução nas imagens, já apagadas. Em particular os registros de diagramas de colina costumam ser bem difíceis de se obter, sendo necessária a digitalização da imagem e a obtenção dos valores numéricos é bastante trabalhosa, praticamente artesanal. Espera-se que para novos empreendimentos seja possível a obtenção dos diagramas em arquivo numérico, facilitando sobremaneira o tratamento dos dados para o levantamento dos seis diagramas de coeficientes variáveis.

A proposta de modelo de turbina apresentada neste estudo é altamente recomendável para usinas a fio d'água submetidas a grandes variações de queda bruta, pois possui como parâmetro de entrada a queda bruta (HB). Também é interessante para usinas isoladas do SIN por conversoras de Corrente Contínua, como no caso do projeto Itaipú e Madeira, onde é importante representar melhor as dinâmicas da turbina e regulador de velocidade, devido à interação destas dinâmicas com as malhas de controle do sistema HVDC, principalmente os blocos estabilizadores de frequência.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Almeida, Marcelino Pereira de, 1987. "Modelos não lineares de turbina e regulador de velocidade para simulação de grandes variações de carga em unidades geradoras sob diversas condições operativas: desenvolvimento, aferição e desempenho prático". Dissertação de mestrado, EFEI.
- (2) Fonte da foto: <<http://www.andritz.com/gr-ar2009-guriii-2-47-2.jpg>>
- (3) Fonte da foto: <http://norteenergiasa.com.br/site/wp-content/uploads/2015/01/DSC_5026.jpg>
- (4) Fonte da foto: <<http://emc.araraquara.com/dbimagens/bcb08db8-8a6c-4c41-88e3-05c158533c4e.jpg>>
- (5) Macedo, Nilo José P. e Cerqueira, Guilherme D. de, "Relatório de Comissionamento da UG06 da UHE Furnas e Validação do Modelo do Sistema de Excitação e de Regulação de Velocidade para o programa ANATEM©", Nota Técnica GEO.O.030.2014, FURNAS, setembro de 2014.
- (6) *Model Library*, PSSE 33.5, PTI-Siemens.
- (7) Manual do programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM (CEPEL), V11.00.01, Agosto 2016.
- (8) Cerqueira, Guilherme D. de, "Modelagem Dinâmica Não Linear de Turbina Francis a partir de Dados de Ensaios de Modelo Reduzido", Estudo Dirigido do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UNIFEI, maio de 2015.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Guilherme Domingues de Cerqueira

Nascido em Santos/SP em 29 de julho de 1977. Graduado (2002) em Engenharia Elétrica: UFJF, Juiz de Fora/MG; Pós-Graduado (2005) em MBA – Gestão Empresarial: FGV, Juiz de Fora/MG; Pós-graduado (2009) em Sistemas Elétricos de Potência: CESE Transmissão – UNIFEI, Itajubá/MG; Engenheiro da Divisão de Estudos Elétricos da Operação de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (desde 2004). Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNIFEI.



Pedro Paulo de Carvalho Mendes

Nascido em Itajubá/MG em 02 de julho de 1956. Graduado (1977) em Engenharia Elétrica: EFEI, Itajubá/MG; Mestrado (1989): EFEI, Itajubá/MG; Doutorado (1999): COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro/RJ. Engenheiro da Balteau Produtos Elétricos Ltda., atual General Electric Company (1978-1980). Professor do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (1989-2015). Professor voluntário da UNIFEI e consultor independente (desde 2015).



Nilo José Pereira de Macedo

Nascido em Macaé/RJ em 01 de outubro de 1954. Graduado (1979) em Engenharia Elétrica: PUC, Rio de Janeiro/RJ; Mestrado (1992): COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro/RJ; Engenheiro da Divisão de Estudos Elétricos da Operação de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (1980-2013). Consultor independente (desde 2013). Membro ativo do CE B4 do CIGRE BRASIL.