



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

GAT 20  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

#### **GRUPO IV**

#### **GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT**

#### **MODELOS DINÂMICOS PARA OS SISTEMAS DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DAS TURBINAS BULBO DAS USINAS DE SANTO ANTÔNIO E JIRAU NO RIO MADEIRA**

**Nilo J.P. Macedo\*    Guilherme D. Cerqueira    Márcio G. Sereno    Paulo M. Portugal**

**Furnas Centrais Elétricas S.A.**

**ELETROBRÁS**

#### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é apresentar os modelos preliminares dos sistemas de Regulação de Potência e Velocidade para as Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio, utilizados nos estudos de avaliação de desempenho dinâmico dessas usinas com o programa de estabilidade eletromecânica ANATEM (1). Neste trabalho são apresentados os diagramas de blocos, com as funções de transferência no domínio de Laplace, do controle em malha fechada representativo do regulador de velocidade em controle de potência ou frequência, mostrando os valores utilizados para os diversos parâmetros envolvidos e os resultados de alguns testes de resposta dinâmica dos equipamentos.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Turbinas Bulbo; Estabilidade Eletromecânica; Controle de Velocidade

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Tendo em vista as características do aproveitamento hidroelétrico do Rio Madeira, composto pelas usinas Santo Antônio e Jirau, que exigem barragens de pequena queda, com alturas entre 13 e 15 m, a tecnologia das turbinas empregada será do tipo “BULBO”, com potências nominais da ordem de 70 a 75 MW.

Os geradores deverão ser convencionais do tipo síncrono com pólos salientes, dotados de sistemas de excitação e reguladores de tensão convencionais de última geração, cujos modelos para a simulação digital em programas de transitórios eletromecânicos são de amplo domínio e desempenho conhecido no âmbito dos engenheiros de sistemas de potência especialistas em comportamento dinâmico.

Porém, a utilização em larga escala da turbina tipo “BULBO” em um único aproveitamento hidroelétrico, aliada ao aspecto do sistema de integração utilizando transmissão de longa distância, caracteriza uma aplicação pioneira destas turbinas. Portanto, os estudos de desempenho dinâmico considerando a integração das UHE’s Santo Antônio e Jirau com Sistema Interligado Nacional, requer uma representação cuidadosa destas unidades geradoras, capaz de reproduzir com fidelidade o desempenho destas máquinas perante as interações com a rede de transmissão, além de um estreito entendimento das limitações estáticas e dinâmicas destas máquinas quando submetidas aos distúrbios impostos pelo sistema elétrico.

A figura 1 apresenta a caracterização eletrogeográfica do empreendimento do Rio Madeira, mostrando as potências e distâncias envolvidas nas possíveis rotas para interligação com o restante do Sistema Elétrico Nacional e a tabela 1 mostra os parâmetros dos geradores fornecidos por fabricantes distintos comparados com os do gerador da usina de Igarapava (CEMIG).

(\*) Rua Real Grandeza, 219 – sala 110 - Bloco E – CEP 22283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Tel: (+55 21) 2528-3602 – Fax: (+55 21) 2528-5528 – Email: nilojpm@furnas.com.br

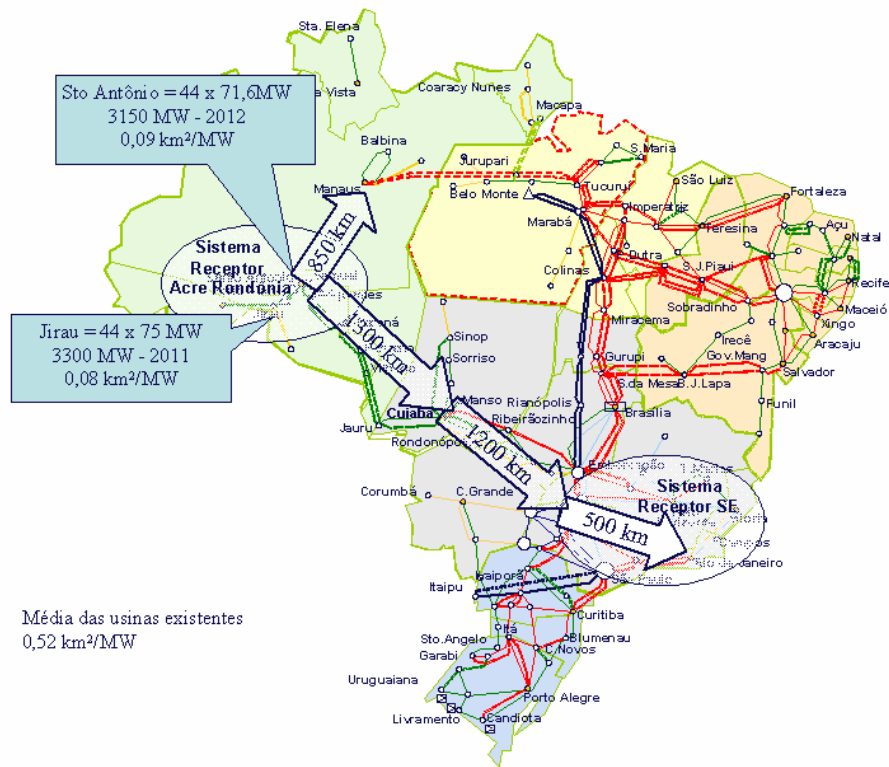


Figura 1 – AHE Madeira - Visão geral das potências e distâncias envolvidas

Tabela 1 – Parâmetros dos Geradores Síncronos de Pólos Salientes

PARÂMETROS DOS GERADORES DAS UNIDADES BULBO				
Fabricantes:	HITACHI	VATECH	ABB (Igarapava)	$\Delta$ máx.
Xd (pu)	1,00	1,10	1,14	14%
Xq (pu)	0,70	0,70	0,73	4%
X'd (pu)	0,45	0,40	0,39	17%
X''d (pu)	0,40	0,32	0,35	25%
Xl (pu)	0,28	0,20	0,21	40%
T'do (s)	2,70	5,00	3,50	85%
T''do (s)	0,04	0,05	0,02	178%
T''qo (s)	0,08	0,09	0,04	143%
H (s)	1,70	1,40	1,20	42%
MVA	84,00	83,00	44,20	-

## 2.0 - SISTEMAS DE REGULAÇÃO DE POTÊNCIA E VELOCIDADE

Apesar de atualmente existirem várias usinas com turbinas tipo “KAPLAN VERTICAL” ou “KAPLAN-BULBO” operando interligadas ao Sistema Elétrico Nacional, não se encontra disponível no banco de dados do ONS um modelo específico para o regulador de velocidade e potência destas usinas. De uma forma geral os modelos disponíveis são os mesmos utilizados para representar os sistemas de controle das usinas com turbinas do tipo “FRANCIS”. Na literatura técnica, artigos ou teses acadêmicas, também não se encontraram sugestões de modelos específicos para este tipo de empreendimento.

A montagem da infra-estrutura de dinâmica para ser utilizada com o programa ANATEM (1) do CEPEL, teve como ponto de partida a infra-estrutura disponível para o sistema existente em operação e previsto até o ano de 2008. Para que fosse utilizada nos estudos de planejamento foi compatibilizada com a infra-estrutura de regime permanente utilizada no Planejamento do Setor Elétrico Brasileiro e, posteriormente, foram incluídos os modelos de todas as novas usinas previstas no plano de geração, com seus sistemas de controle devidamente testados e condicionados aos pontos de operação que deverão ser submetidos.

No que se refere especificamente às usinas de Santo Antônio e Jirau, inicialmente foram adotados os parâmetros para as máquinas “Bulbo” das usinas do rio Madeira informados pela Hitachi, referentes à usina de Tadami, no Japão, porém com reguladores de velocidade e turbina típicos (HYGOV). Posteriormente, foi viabilizado o contato com outros fabricantes, que informaram parâmetros e modelos matemáticos para as unidades geradoras, respectivos sistemas de controle (RAT e RAV) e limitadores, os quais passaram a serem adotados como os mais realistas para o empreendimento em questão.

A figura 2 apresenta a Função de Transferência do Regulador de Potência. A figura 3 mostra a Função de Transferência do Regulador de Velocidade. A figura 4 apresenta as Funções de Transferência dos servomecanismos do distribuidor e das pás do rotor. A figura 5 mostra a função de transferência da Turbina.

As tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam os valores preliminares dos respectivos parâmetros dos modelos utilizados e as faixas de ajuste fornecidas pelos fabricantes.

Nos modelos considerou-se, provisoriamente, que o regulador comuta automaticamente de controle de potência para controle de velocidade quando o desvio absoluto da freqüência for superior a 0.025 pu (1,5 Hz) ou quando a potência elétrica caia abaixo de 0.05 pu. Estes valores podem ser alterados caso as análises de desempenho dinâmico das usinas indique a necessidade de outros ajustes.

As curvas de “pré-abertura” e de “conjugação” do ângulo do rotor em função da abertura do distribuidor não foram fornecidas pelos fabricantes. As figuras 6 e 7 apresentam algumas curvas típicas, baseadas na usina de IGARAPAVA, que foram consideradas nos modelos das usinas de Jirau e Santo Antônio. A curva de conjugação pode variar em função da queda ou da vazão, porém, nos estudos dinâmicos foi considerada apenas a condição de queda nominal.

O modelo de turbina fornecido pelos fabricantes corresponde ao modelo linear clássico de turbinas hidráulicas, acrescido de um amortecimento que varia em função da velocidade e da abertura do distribuidor. O valor do amortecimento foi ajustado de forma a reproduzir as sobrefreqüências máximas observadas nos testes de rejeição total de carga da usina de IGARAPAVA. Este modelo poderá ser futuramente revisado em função de testes hidráulicos específicos para determinação das curvas características utilizando modelos em escala reduzida das turbinas bulbo.

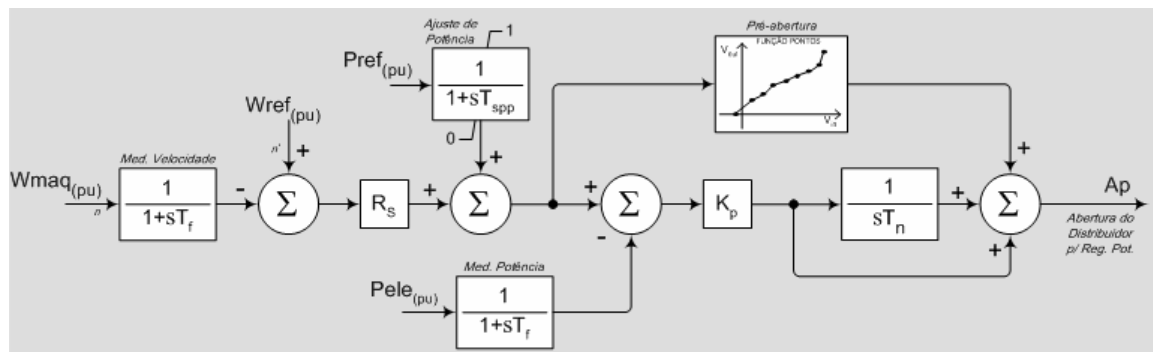


Figura 2 – Diagrama de blocos do Regulador de Potência

Tabela 2 – Parâmetros do Regulador de Potência

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição	Faixa
Wref	1.0	pu	Referência de freqüência ( 1 pu = 60 Hz)	
Pref	-	pu	Referência de potência	[0.0 ... 1.0]
Tf	0.05	s	Const. de tempo dos filtros de medição	[0.02 ... 1.0]
Tspp	10.00	s	Constante de tempo da rampa de carga	[10 ... 120]
Rs	0.05	pu	Estatismo freqüência x potência	[0.01 ... 0.1]
Kp	0.25	pu	Ganho proporcional do regulador	[0.1 ... 10.0]
Tn	5.00	s	Constante de tempo do regulador	[0.1... 100.0]

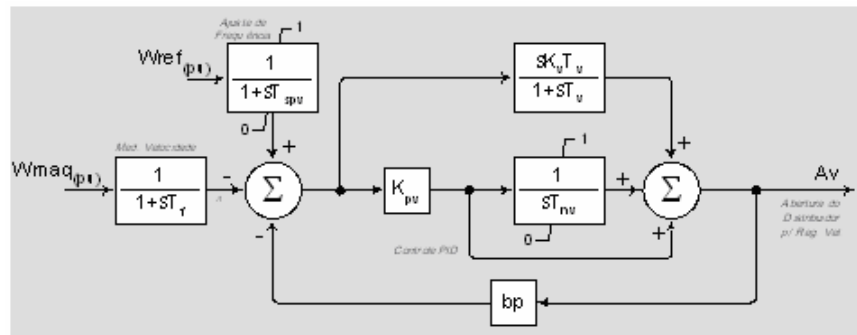


Figura 3 – Diagrama de blocos do Regulador de Velocidade

Tabela 3 – Parâmetros do Regulador de Velocidade

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição	Faixa
Wref	1.0	pu	Referência de frequência ( 1 pu = 60 Hz)	
Tf	0.05	s	Const. de tempo dos filtros de medição	[0.02 ... 1.0]
Tspv	10.00	s	Constante de tempo da referência de frequência	[10 ... 120]
Kpv = 1/bt	1.5	pu	Ganho proporcional do regulador ( inverso do estatismo transitório)	[0.8 ... 1.5]
Tnv	10.00	s	Constante de tempo do regulador de velocidade	[0.1... 100.0]
Kv	0.0	pu	Ganho derivativo do regulador de velocidade	[0.0 ... 10.0]
Tv	1.0	s	Constante de tempo do derivador	[0.0 ... 10.0]
bp	0.05	pu	Estatismo permanente	[0.01 ... 0.1]

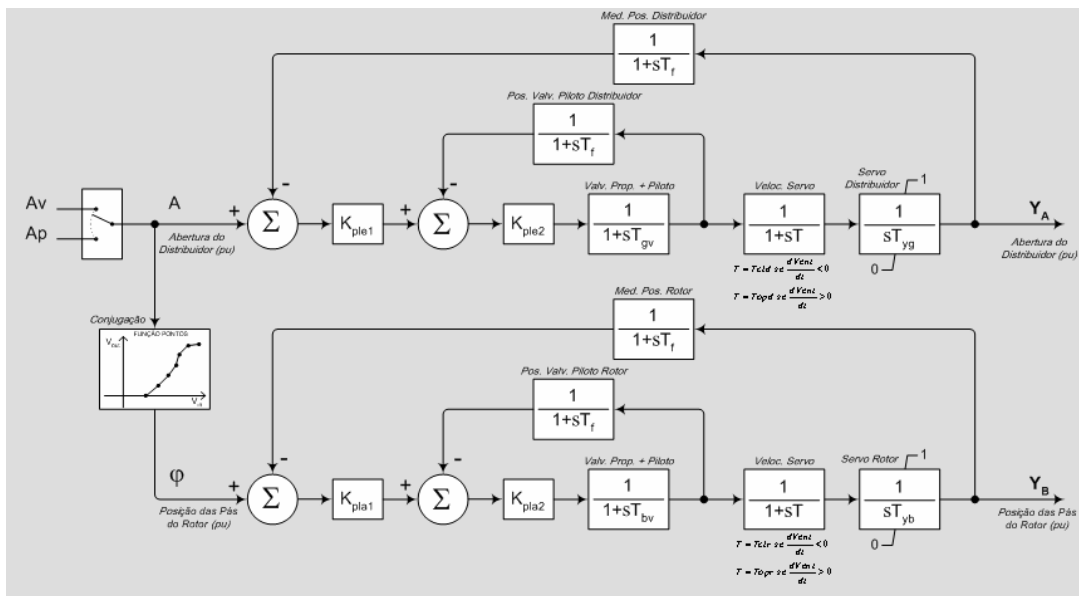


Figura 4 – Diagrama de blocos das Servoválvulas e Servomotores do Distribuidor e das Pás do Rotor

Tabela 4 – Parâmetros das Servoválvulas e Servomotores do Distribuidor e das Pás do Rotor

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição	Faixa
Kple1	3.0	pu	ganho prop. malha servomotor do distribuidor	[0.1 ... 10.0]
Kple2	1.0	pu	ganho prop. malha válvula piloto do distribuidor	[0.1 ... 10.0]
Tgv	0.05	s	const. de tempo da válvula piloto do distribuidor	-
Tyg	1.5	s	const. de tempo do servomotor do distribuidor	-
Tf	0.05	s	const. de tempo dos filtros de medição	[0.02 ... 1.0]
Kpla1	3.0	pu	ganho prop. malha servomotor do rotor	[0.1 ... 10.0]
Kpla2	1.0	pu	ganho prop. malha válvula piloto do rotor	[0.1 ... 10.0]
Tbv	0.05	s	const. de tempo da válvula piloto do rotor	-
Tyb	15.0	s	const. de tempo do servomotor do rotor	-

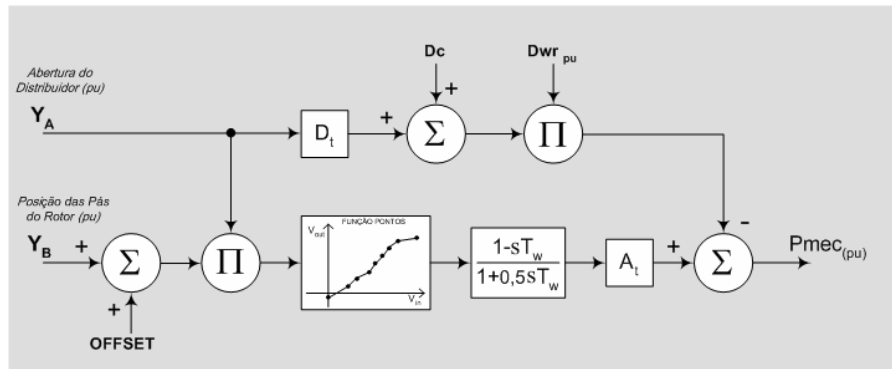


Figura 5 – Diagrama de blocos da Turbina Bulbo

Tabela 5 – Parâmetros dos modelos da Turbina Bulbo

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição	Faixa
offset	-	pu	offset	[0.0 ... 1.0]
Dt	0.9	pu	Amortecimento da turbina (depende da abertura)	[0.0 ... 1.0]
Dc	0.3	pu	Amortecimento da carga (independe da abertura)	[0.0 ... 1.0]
Dwr	-	pu	Varição da velocidade	-
Tw	0.80	s	Constante de tempo da água	-
At	1.0	pu	Ganho da turbina	[1.0 ... 2.0]

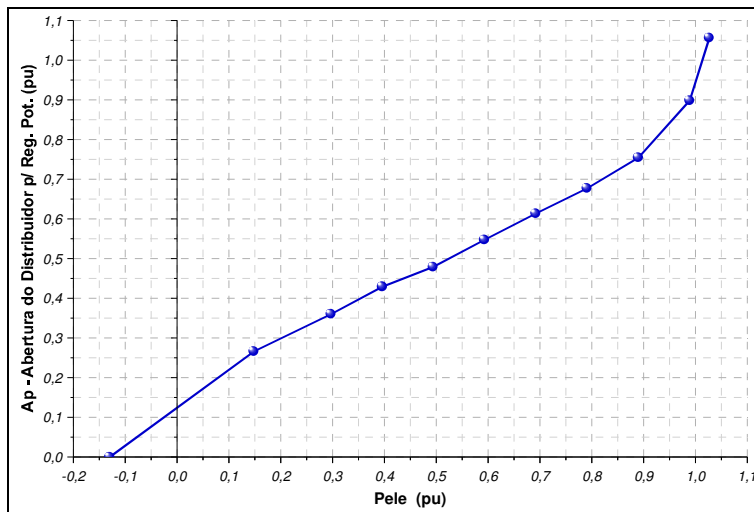


Figura 6 – Curva de “pré-abertura” considerada no modelo do Regulador de Potência

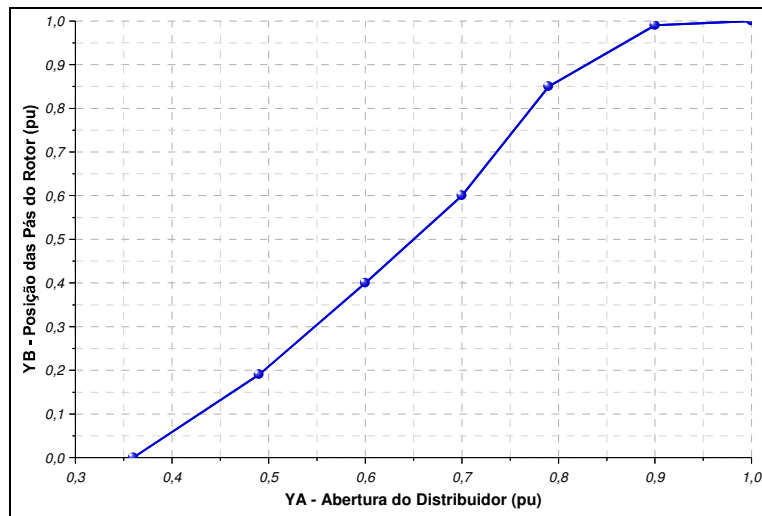


Figura 7 – Curva de “conjugação” considerada no modelo da Turbina

### 3.0 - TESTES DE DESEMPENHO DINÂMICO DOS MODELOS

#### 3.1 Degrau na Referência do regulador de Potência

Para avaliar o desempenho do Regulador de Potência foram realizadas simulações de aplicação de degrau de -20% na referência de potência da UHE Jirau, considerando 44 unidades geradoras com uma carga total de 3300 MW e uma das configurações analisadas para o sistema de transmissão (2 LTs de 500 kV e 2 Bipolos CCAT de 600 kV). A figura 8 apresenta as variações da potência ativa e das posições do distribuidor e do rotor, considerando a constante de tempo da rampa de carga (Tsp) ajustada no valor mínimo fornecido pelo fabricante (10 s) e os demais parâmetros apresentados nas tabelas 2, 3 e 4 e 5.

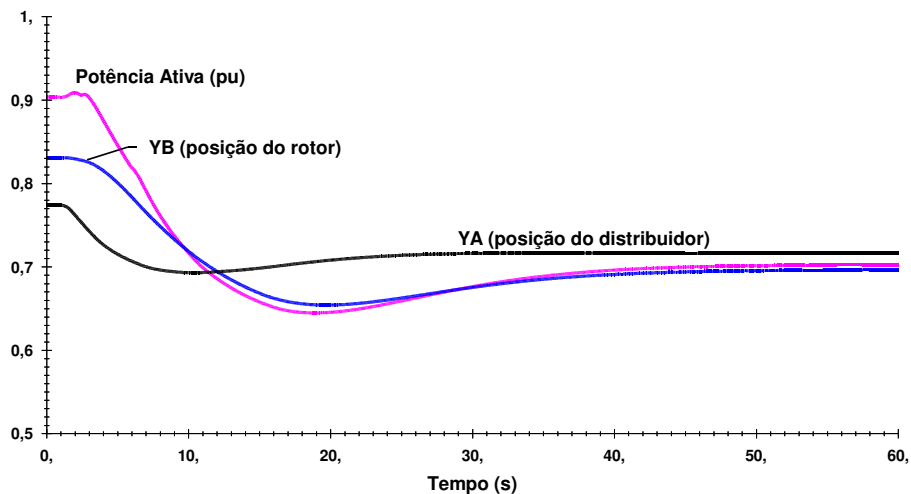


Figura 8 – Rampa de Carga na UHE Jirau - Potência Ativa e Posições do Distribuidor e do Rotor

#### 3.2 Rejeição Total de Carga

A figura 9 apresenta as variações da frequência, da potência ativa e das posições do distribuidor e do rotor da UHE Jirau, considerando os ajustes apresentados nas tabelas 2, 3, 4 e 5, para uma rejeição total de carga da usina. Inicialmente a usina operava em controle de potência e com a rejeição de carga ocorreu a comutação automática para controle de velocidade para limitar a sobrefreqüência máxima.

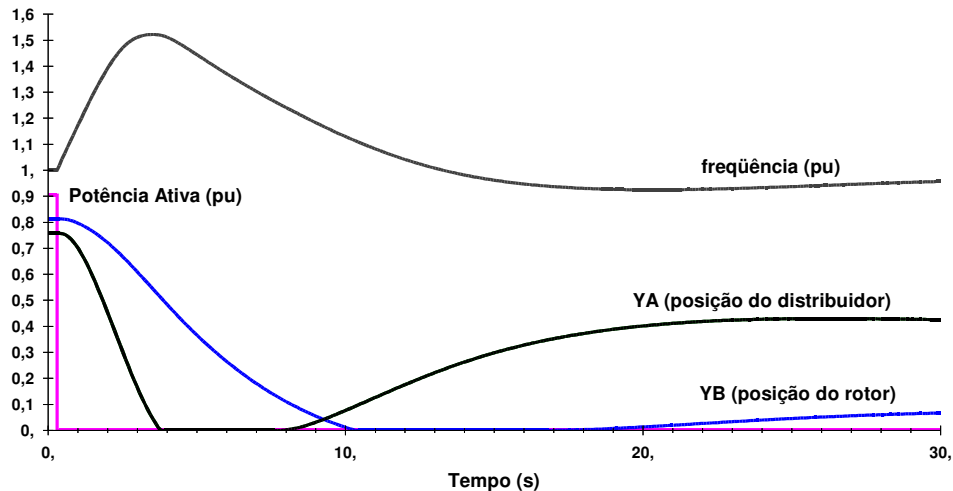


Figura 9 – Variação da Freqüência, Potência Ativa e das Posições do Distribuidor e do Rotor da UHE Jirau

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Os modelos preliminares para o sistema de regulação de potência ou velocidade das turbinas tipo bulbo de Jirau e Santo Antônio foram desenvolvidos em CDU para o programa de estabilidade eletromecânica ANATEM (1). Os parâmetros utilizados foram, em geral, os sugeridos pelos fabricantes, sem a preocupação de otimizá-los. As curvas de pré-abertura e de conjugação do ângulo do rotor em função da abertura do distribuidor não foram fornecidas pelos fabricantes e as curvas preliminares utilizadas nos modelos precisam ser reavaliadas nos estudos de detalhamento.

Os modelos apresentaram resultados satisfatórios para os testes realizados, sendo necessária uma confirmação, por parte dos fabricantes, dos modelos e parâmetros utilizados nos estudos preliminares. Para uma representação mais realista dos equipamentos de regulação da turbina tipo bulbo é necessário que os fabricantes ainda forneçam as seguintes informações complementares:

- O valor estimado para constante de tempo da água para o modelo de turbina+conduto tipo bulbo, considerando as potências nominais dos geradores e quedas líquidas nominais de Jirau (15,2 m) e Santo Antônio (13,9 m). Provisoriamente considerou-se um valor de  $T_w=0,8s$ ;
- O modelo de turbina fornecido pelos fabricantes é um modelo linear bastante simples. Como a constante de tempo  $T_w$  da água pode variar com a queda ou a vazão, é necessário que os fabricantes forneçam estes valores ou um modelo não linear mais completo da turbina que leve em conta estas variações;
- Valores típicos de faixas de operação para as turbinas tipo bulbo de Jirau e Santo Antônio (Curvas Colina) levantadas através de testes dinâmicos em modelos reduzidos.

Destaca-se também que o projeto do Rio Madeira representará uma grande oportunidade de aplicação da tecnologia das turbinas "BULBO" em grande escala, consolidando uma experiência que poderá servir como referência para estudos de outros aproveitamentos com características semelhantes.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Programa ANATEM, Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário, V09-12/05a, Cepel 2005.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Nilo José Pereira de Macedo

Nascido em Macaé, RJ em 01 de outubro de 1954.

Mestrado (1992) na COPPE-UFRJ e Graduação (1979) em Engenharia Elétrica na PUC-Rio de Janeiro.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1980.

Engenheiro da Divisão de Estudos de Especiais do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação.

Participante do Grupo de Estudos CE B4 do CIGRÉ-Brasil e WG B4-34 do CIGRÉ-Internacional.

Guilherme Domingues de Cerqueira

Nascido em Santos, SP em 29 de julho de 1977.

MBA Gestão Empresarial (2005) na FGV e Graduação (2002) em Engenharia Elétrica na UFJF-Juiz de Fora/MG.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 2004.

Engenheiro da Divisão de Estudos de Especiais do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação.

Márcio Goldemberg Sereno

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 27 de abril de 1953.

Pós-graduado (1983) em Sistemas de Potência na PUC-RJ e Graduação (1977) em Engenharia Elétrica na UERJ-Rio de Janeiro.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1978.

Chefe da Divisão de Estudos do Sistema de Transmissão do Departamento de Planejamento de Transmissão.

Paulo Max Maciel Portugal.

Nascido em Nilópolis, RJ em 09 de outubro de 1977.

Graduação (2002) em Engenharia Elétrica na UERJ – Rio de Janeiro.

Empresa: Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., desde 2003.

Engenheiro da Divisão de Estudos Elétricos da Transmissão.

Participante do grupo de estudos do CE B4 do CIGRÉ-Brasil.