

# VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA TURBINA BULBO DE CINCO PÁS DA UHE DE SANTO ANTÔNIO PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMECAÑICOS

RAFAEL B. DE PAIVA, LUCAS M. DA SILVA

*Reivax Automação e Controle S/A*

*Rod. José Carlos Daux, nº 600, Tecnópolis | CEP: 88030-904 | Florianópolis | SC | Brasil*

*Telefone: +55 (48) 3027-3700 | Fax: +55 (48) 3027-3735*

[rafael.paiva@reivax.com](mailto:rafael.paiva@reivax.com) / [lucas.manso@reivax.com](mailto:lucas.manso@reivax.com)

ANDRÉ F. DOS SANTOS, SEBASTIÃO S. A. JUNIOR, MÁBIO V. ALHO, JULIO B. NAZARENO

*Santo Antônio Energia S/A*

*Canteiro de Obras UHE Santo Antônio, Margem Esquerda, s/nº, Bloco 1 | CEP 76.805-812*

*Zona Rural, Porto Velho | RO | Brasil | Telefone: +55 (69) 3216-3363*

[andrefsanatos@santoantonioenergia.com.br](mailto:andrefsanatos@santoantonioenergia.com.br) / [sebastiaosanatos@santoantonioenergia.com.br](mailto:sebastiaosanatos@santoantonioenergia.com.br)

[mabioalho@santoantonioenergia.com.br](mailto:mabioalho@santoantonioenergia.com.br) / [julio.bosco@bmgeng.com.br](mailto:julio.bosco@bmgeng.com.br)

**Abstract** — This paper presents the proposal of a mathematical model of Bulb type turbines for studies of electromechanical transients. The model was developed in MATLAB software and transcribed to ANATEM. Field tests were done for mathematical validation of the proposed model in the five blade runner turbines of Santo Antônio Hydropower. The developed model allows a dynamic representation of the conjugation between the blade runner rotor and the wicket gate over the entire operating range of the turbine. There are few available papers that present a model with this type of representation, and no one with validation that proves the adherence of field curves with the simulated model. The objective of this work is to meet this need and fulfill this lack. The overall result obtained will allow a better and full analysis and adjustments of Santo Antônio Hydropower station controllers in the case of black start and will guarantee the best performance of the primary regulation, especially in the events of the HVDC link.

**Keywords** — Bulb Turbines, Validation Testing, Primary Regulation, Electromechanical Transients

**Resumo** — O artigo apresenta a validação de um modelo matemático proposto para a representação da turbina do tipo Bulbo para estudos de transitórios eletromecânicos. O modelo foi desenvolvido no software MATLAB e transcrito para o ANATEM. Os ensaios de campo foram realizados nas turbinas de cinco pás da UHE Santo Antônio. O resultado do modelo permite a representação dinâmica da conjugação entre as pás do rotor e as pás diretrizes do distribuidor ao longo de toda a faixa operativa da turbina. São poucos trabalhos disponíveis que apresentam a modelagem com esse tipo de representação, tampouco com ensaios de validação de campo que comprovem a aderência do modelo simulado ao real. O objetivo deste trabalho é preencher essa lacuna. O resultado obtido permitirá uma melhor análise e ajustes adequados dos reguladores de velocidade da UHE Santo Antônio nas situações de recomposição do sistema (*black start*) e no desempenho da regulação primária, principalmente nos eventos do elo HVDC.

**Palavras-chave** — Turbinas Bulbo, Ensaios de Validação, Regulação Primária, Transitórios Eletromecânicos

## 1 Introdução

A análise da regulação de velocidade das unidades geradoras é fundamental para uma operação adequada da frequência de uma rede elétrica. De acordo com Kundur [1], nos estudos de longa duração, um dos focos é a regulação primária das unidades geradoras na estabilidade da frequência da rede elétrica. Nestes estudos, são investigados eventos em que ocorrem grandes desvios de frequência, sendo que a modelagem adequada de todo o sistema de regulação de velocidade é fundamental para que sejam obtidos resultados coerentes com a realidade. Somente desta maneira é possível a tomada de ações necessárias para a mitigação de possíveis problemas que possam ser detectados mediante as simulações desses tipos de eventos.

É possível encontrar na literatura, como na IEEE [2, 8], modelos matemáticos que representem a dinâmica das turbinas hidráulicas do tipo Francis, mas a modelagem do comportamento dinâmico das pás do rotor de Turbinas do tipo Bulbo e Kaplan em programas de transitórios eletromecânicos ainda é objeto de estudo.

É comum a aproximação do modelo de uma turbina Bulbo/Kaplan pelo modelo da turbina Francis. Esta representação desconsidera os efeitos dinâmicos das pás do rotor e sua conjugação com as pás diretrizes do distribuidor.

As turbinas Bulbos/Kaplan podem vir a operar com um erro de conjugação durante transitórios. Esse erro de conjugação é mais acentuado quanto mais lenta for a abertura e/ou o fechamento das pás do rotor em relação às pás diretrizes do distribuidor.

O erro de conjugação ocorre quando as pás do rotor não acompanham a referência da curva de conjugação. A curva de conjugação é dada por uma tabela de pontos em função do nível (queda) e da posição das pás diretrizes do distribuidor. A saída dessa tabela é a referência de operação das pás do rotor.

A eficiência da turbina é alterada em um evento em que ocorra um erro de conjugação e, como consequência, em que a potência mecânica entregue pela turbina ao gerador também seja alterada. Ao ignorar o erro de conjugação, o resultado de um estudo de estabilidade pode não refletir a realidade.

Foi demonstrado por Gustaffson [7] que o erro de conjugação em eventos que requeiram grande

movimentação dos atuadores pode tornar o controle de velocidade instável, corroborando a importância da correta modelagem destes tipos de turbinas para avaliação da estabilidade do sistema.

Muitas centrais hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN) utilizam turbinas do tipo Kaplan e Bulbo, sendo que as maiores turbinas Bulbos do mundo estão instaladas no Rio Madeira atualmente. Estes fatos reforçam a importância da representação matemática adequada para análise dos resultados de estudos de transitórios eletromecânicos.

O presente trabalho visa a suprir essa necessidade de modelagem de turbinas Bulbo e Kaplan. No capítulo 2, é analisada a representação matemática convencional da turbina Francis para estudos de transitórios eletromecânicos. No capítulo 3, é apresentada a proposta do modelo de turbinas Bulbo/Kaplan. No capítulo 4, é aplicado o modelo proposto na turbina bulbo de cinco pás. Por fim, o capítulo 5 compara os resultados de um modelo típico versus o modelo proposto e as conclusões deste trabalho são dadas no capítulo 6.

## 2 Modelo Não Linear Convencional

Na Figura 1, é apresentado o modelo não linear clássico de turbinas tipo Francis, que conta com apenas um único atuador (*Gate*) em sua entrada. Esse modelo dinâmico é descrito pela IEEE [2]. Variações topológicas são propostas na IEEE [8] para a representação de outros fenômenos hidráulicos como, por exemplo, o escoamento elástico, o compartilhamento do conduto e as chaminés de equilíbrio.

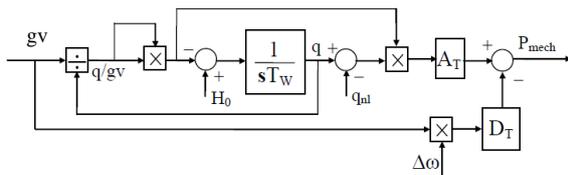


Figura 1. Modelo não linear de uma turbina hidráulica.

A unidade das variáveis é dada por unidade (pu):

- $gv$  = Atuador (*Gate*)
- $P_{mech}$  = Potência Mecânica (*PM*)
- $\Delta w$  = Desvio de velocidade
- $q$  = Vazão

Os parâmetros do modelo são:

- $H_0$  = Queda
- $q_{ni}$  = Vazão em vazio
- $A_t$  = Transformação de base da turbina – gerador
- $D_t$  = Coeficiente de amortecimento

Na IEEE [2] também há uma abordagem mais adequada do modelo clássico com a representação da relação não linear existente entre a posição do Atuador e a Potência por meio de um bloco tabela. A Figura 2 apresenta esse modelo em questão. Em Paiva [3], são apresentados ensaios de campo para validação de turbinas do tipo Francis utilizando este tipo de abordagem. A representação deste bloco tabela reproduz os efeitos que ocorrem na prática, em que o ganho estático do conduto e turbina é um ganho variável em função do ponto de operação, que é intrínseco da turbina

hidráulica e que, por sua vez, afeta o desempenho da regulação de velocidade.

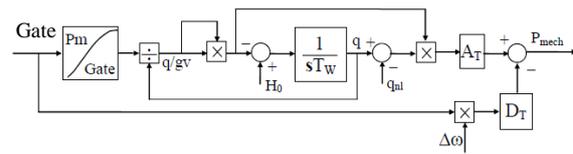


Figura 2. Modelo não linear de uma turbina hidráulica considerando a relação abertura versus potência.

A novidade deste modelo é o bloco tabela *Pm versus Gate*, que reproduz essa relação do atuador pela potência da unidade.

Todavia, no caso de turbinas Bulbo e Kaplan, são dois atuadores que definem a vazão da água turbinada. O impacto no torque mecânico causado por erros de conjugação dos atuadores das pás do rotor com as pás diretrizes do distribuidor são bastante relevantes, não sendo reproduzido por este modelo convencional.

## 3 Modelo Não Linear para Turbinas Bulbo

Duas abordagens de modelo de turbinas Kaplan e Bulbo foram propostas em Paiva [4]. A primeira tem foco na representação de um modelo que considera o erro de conjugação e seu efeito na potência mecânica. Esta abordagem foi desenvolvida para ser aplicada em programas de simulação de transitórios eletromecânicos. A segunda abordagem apresenta um modelo mais complexo, desenvolvido para estudos de eficiência, mas que também poderia ser utilizado em estudos de transitórios eletromecânicos. Porém, dada a complexidade do modelo, sua aplicação é bastante restritiva.

A primeira abordagem proposta por Paiva [4] apresentou resultados satisfatórios na validação de modelos de turbinas Kaplan. Todavia, não foram apresentados resultados para as turbinas Bulbo. Essa lacuna é preenchida com os resultados de validação apresentados no presente trabalho. Foram realizados ensaios de campo para a validação dinâmica da turbina Bulbo de cinco pás da UHE de Santo Antônio, utilizando-se o modelo proposto pela primeira abordagem. A Figura 3 apresenta esse modelo em questão.

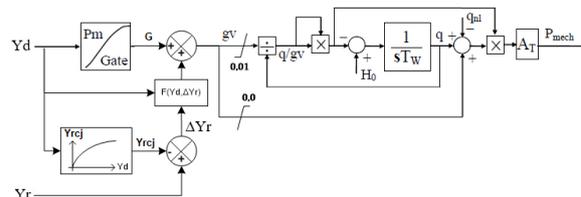


Figura 3. Modelo de Turbinas Kaplan/Bulbo [4]

A unidade das variáveis é dada por unidade (pu):

- $Y_d$  = Posição das pás diretrizes (ou distribuidor)
- $Y_r$  = Posição das pás do rotor (ou roda)
- $Y_{rcj}$  = Referência conjugada das pás do rotor
- $\Delta Y_r$  = Erro da relação  $Y_{rcj} - Y_r$
- $G$  = Variável de saída da relação abertura vs. potência

Os parâmetros do modelo são:

- Curva  $Y_{rcj}$  vs.  $Y_d$ : curva de conjugação do rotor
- $F(Y_d, \Delta Y_r)$ : Função quadrática

A diferença deste modelo em relação ao da Figura 2 está na representação da curva de conjugação das pás do rotor com as pás diretrizes do distribuidor.

A curva de conjugação é utilizada no modelo para definir a posição conjugada das pás do rotor e o cálculo do erro de conjugação. A posição conjugada das pás do rotor é uma variável ( $Y_{rcj}$ ) de saída da tabela de conjugação, da qual, a posição atual das pás diretrizes é a variável de entrada.

O erro de conjugação ( $\Delta Y_r$ ) é calculado pela diferença entre a posição conjugada das pás do rotor com a posição atual das pás do rotor ( $Y_r$ ). O erro de conjugação também é referenciado pelo termo *desconjugação*.

O erro de conjugação passa por uma função quadrática  $F(Y_d, \Delta Y_r)$ , que possui seus coeficientes do polinômio adaptativos de acordo com o ponto de operação das pás diretrizes do distribuidor ( $Y_d$ ). Essa adaptação dos coeficientes do polinômio é fundamental para se reproduzir os efeitos de eficiência e vazão nos diferentes pontos de carga. A saída da função quadrática é somada à variável  $G$ .

No modelo da Figura 2, também foram introduzidas no somador, após o integrador, as perdas nas situações em que a variável  $gv$  pudesse assumir valores negativos em virtude da função  $F(Y_d, \Delta Y_r)$ .

As alterações descritas no modelo permitem, por exemplo, a reprodução de eventos de motorização com um erro de conjugação bastante acentuado, como é o caso real do registro de campo da Figura 4 de uma turbina Kaplan. As perdas de eficiência causaram uma motorização de 70% de potência ativa pela turbina.

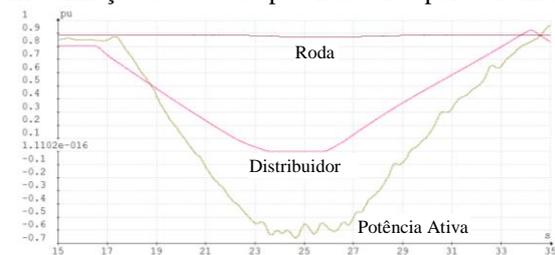


Figura 4. Motorização Severa de uma Kaplan desconjugada.

## 4 UHE Santo Antônio

### 4.1 Descrição da UHE Santo Antônio

A UHE Santo Antônio (UHE SA) localiza-se no Rio Madeira, no município de Porto Velho, estado de Rondônia. As características principais desta UHE estão resumidas na Tabela 1:

Tabela 1. Características Gerais da UHE Santo Antônio

Quantidade de Unidades	50	
Potência Instalada Contratual	3.568,0 MW	
Tensão de Conexão	500 kV e 230 kV	
Regime de Operação	Permanente	
<b>Turbina</b>		
Nº de pás	4	5
Quantidade	24	26
Potência Nominal	74,8 MW	71,05 MW
Velocidade Nominal	100 rpm	100 rpm
<b>Gerador</b>		
Potência Nominal	82,25 MVA	
Tensão Terminal	13,8 kV	
Fator de Potência	0,9	
Frequência	60 Hz	

A UHE SA possui três casas de força, a saber:

- Casa de força da margem direita (Grupo 1): com 8 unidades geradoras;
- Casa de força da margem esquerda (Grupos 2 e 3): com 24 unidades geradoras, sendo 12 unidades em cada grupo de geração;
- Casa de força do leito do rio (Grupos 4 e 5): com 18 unidades geradoras, sendo 12 no grupo 4 e 6 no grupo 5.

O sistema de transmissão em 230 kV, dedicado ao Grupo 5, é constituído por uma conexão ao Sistema Rondônia Acre por meio da SE Porto Velho 1.

Os ensaios de validação foram realizados nas unidades #45 e #47, que fazem parte do grupo 5. Os dados de placa da turbina são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Informações da Turbina

Fabricante	ANDRITZ
Turbina tipo	Bulbo
Número de pás da turbina	5
Orientação	Horizontal
Velocidade nominal	100 rpm
Potência Nominal	86.000kW
Queda líquida nominal	16,22m
Vazão Nominal	590,5 m <sup>2</sup> /s
Queda líquida máxima	25,15 m
Vazão	56,21 m <sup>2</sup> /s
Queda líquida mínima	8,40 m
Vazão	369,45 m <sup>2</sup> /s
Distribuidor: ângulo nominal mín. de abertura	0,0 Gr
Distribuidor: ângulo nominal máx. de abertura	79,0 Gr
Rotor Bulbo: ângulo nom. mín. de abertura	0,0 Gr
Rotor Bulbo: ângulo nom. máx. de abertura	28,5 Gr

### 4.2 Ensaios de Validação da Turbina de 5 pás

Os ensaios de validação apresentados são referentes ao da UG #45 da UHE SA. O diagrama genérico que representa um sistema de regulação de velocidade de uma turbina hidráulica é apresentado na Figura 5.

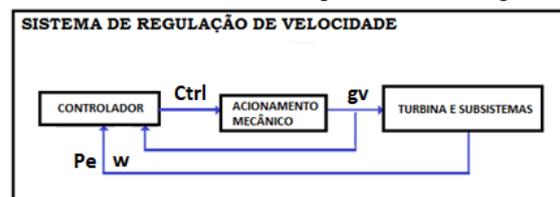


Figura 5. Sistema de Regulação de Velocidade – Genérico

Em que:

- $w$  = Velocidade
- $Pe$  = Potência Ativa do Gerador
- $Ctrl$  = Sinal de controle do Atudor
- $gv$  = Atuador (Gate)

O Regulador de Velocidade (RV) é responsável por controlar o torque mecânico de saída da turbina. O RV de turbina hidráulicas comanda a movimentação dos atuadores, responsáveis pelo fluxo d'água, por meio de um sinal de controle que vai direto para uma válvula proporcional que, por sua vez, passa pelo estágio de amplificação de força pela válvula distribuidora que, por fim, movimenta o atuador principal. No caso de uma turbina Bulbo, há dois atuadores: as pás diretrizes do distribuidor e as pás do rotor.

O diagrama de blocos da Figura 6 apresenta uma visão geral do RV da unidade #45 da UHE SA. O processo controlado é apresentado na Figura 7.

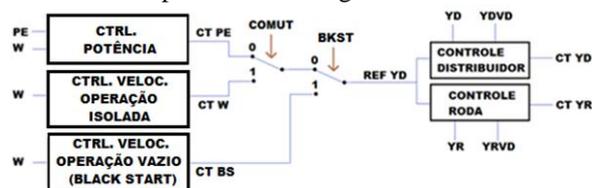


Figura 6. Regulador de Velocidade da unidade #45 da UHE SA



Figura 7. Processo Controlado – Atuadores e Turbina da unidade #45 da UHE SA

Em que:

- $w$  = Velocidade
- $Pe$  = Potência Ativa do Gerador
- $Pm$  = Potência Mecânica do Gerador
- $CT PE$  = Sinal de controle da Malha de Potência
- $CT W$  = Sinal de controle da Malha de Velocidade
- $CT BS$  = Sinal de controle da Malha de Black Start
- $Yd$  = Posição do Distribuidor
- $Yr$  = Posição da Roda
- $Ydvd$  = Posição da Válv. Distrib. do Distribuidor
- $Yrvd$  = Posição da Válv. Distrib. da Roda
- $CT Yd$  = Sinal de controle de Posição do Distribuidor
- $CT Yr$  = Sinal de controle de Posição da Roda
- $CT PE$  = Sinal de controle da Malha de Potência
- $CT W$  = Sinal de controle da Malha de Velocidade
- $COMUT$  = Chave automática para comutação de malha
- $BKST$  = Chave Manual para comutação de malha
- $H_0$  = Nível

#### 4.3 Característica Estática do Modelo da Turbina

Os parâmetros estáticos do conduto forçado e turbina estão relacionados às curvas de conjugação e à relação de abertura versus potência ativa.

Todas essas curvas são dependentes do nível ( $H_0$ ). No caso da UHE SA, as curvas obtidas são referentes às turbinas de 5 pás. Ressalta-se que o nível é um parâmetro importante nesta UHE, uma vez que ele varia bastante ao longo do ano e que as máquinas estão preparadas para operar com diferentes valores de nível, desde 9m até 25m.

O modelo não linear tradicional equivalente do conduto forçado (Figura 1) já possui uma entrada para o nível. Quando  $H_0$  é alterado, automaticamente a relação potência versus abertura é modificada. Não há necessidade de inclusão de inúmeras curvas do tipo potência abertura no modelo da turbina para diferentes quedas.

A Figura 8 apresenta a curva abertura versus potência para o nível de 24m da Turbina #45 da UHE SA.

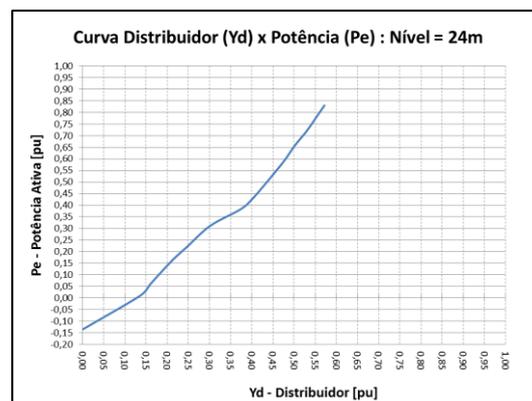


Figura 8. Curva Abertura versus Potência Ativa para queda de 24m

A curva de conjugação é uma tabela de pontos fornecida pelo próprio fabricante da turbina. Essa curva também depende do nível. A Figura 9 apresenta a curva de conjugação para a queda de 24m.

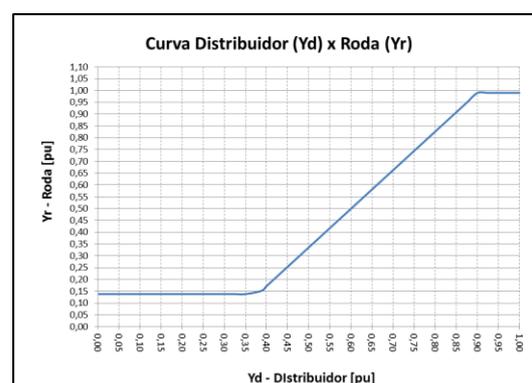


Figura 9. Curva de Conjugação Distribuidor versus Roda para queda de 24m

Os parâmetros do polinômio da função quadrática  $F(Yd, \Delta Yr)$  que reproduz os efeitos da desconjugação são obtidos por ensaios de rampa de potência em diferentes patamares de carga com o RV operando no modo de controle de abertura. Nesse modo de controle, somente as pás do rotor são movimentadas conforme um valor determinado por um comando direto pela Interface Homem Máquina (IHM) do RV.

Registra-se o comportamento da potência ativa na medida em que a posição das pás do rotor varia em relação à posição fixa das pás diretrizes.

A Figura 10 apresenta o resultado deste ensaio que relaciona a potência ativa versus a posição da roda para seis patamares de posição fixa das pás diretrizes do distribuidor.

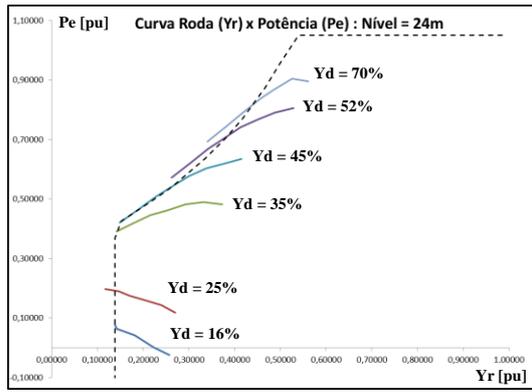


Figura 10. Curva de Eficiência – Erro de Conjugação

#### 4.4 Característica Dinâmica do Modelo – Ensaio em Malha Aberta

As simulações em malha aberta são obtidas com a injeção das curvas de campo do distribuidor ( $Y_d$ ) e da roda ( $Y_r$ ) no modelo equivalente da turbina.

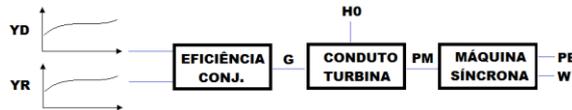


Figura 11. Ensaio de Injeção da Curva de Campo no Modelo Simulado

A Figura 12 e a Figura 13 apresentam o resultado da validação em carga baixa e carga alta do ensaio do erro de conjugação com as pás diretrizes do distribuidor paradas e apenas a pás do rotor se movimentado. Observa-se que, estaticamente, a potência ativa simulada (azul) está aderente com a curva de campo (vermelho).

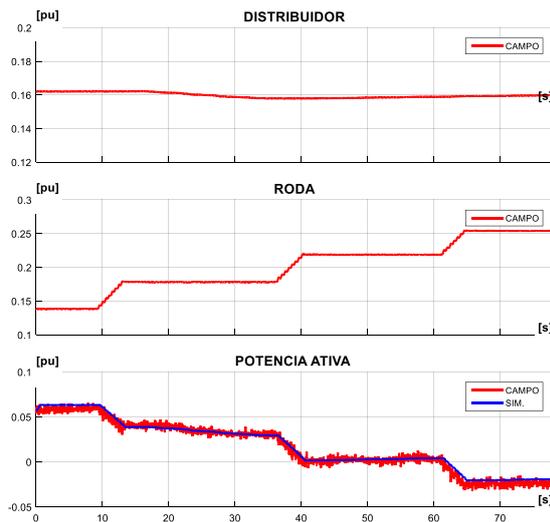


Figura 12. Ensaio do Erro de Conjugação em Carga Baixa

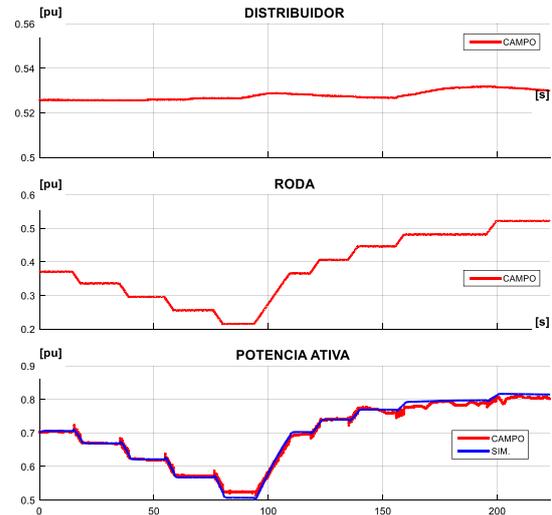


Figura 13. Ensaio do Erro de Conjugação em Carga Alta

#### 4.5 Característica Dinâmica do Modelo – Ensaio em Malha Fechada

O ensaio em malha fechada busca reproduzir nas simulações os mesmos estímulos e/ou perturbações realizados nos ensaios de campo. Nesses ensaios, o sistema de controle de velocidade está sendo representado.

A Figura 14 é o resultado da simulação da tomada de carga. O estímulo aplicado é uma rampa gradativa de carga aplicada na referência de potência ativa do RV. O mesmo estímulo foi reproduzido na simulação. O controle habilitado era o modo de potência.

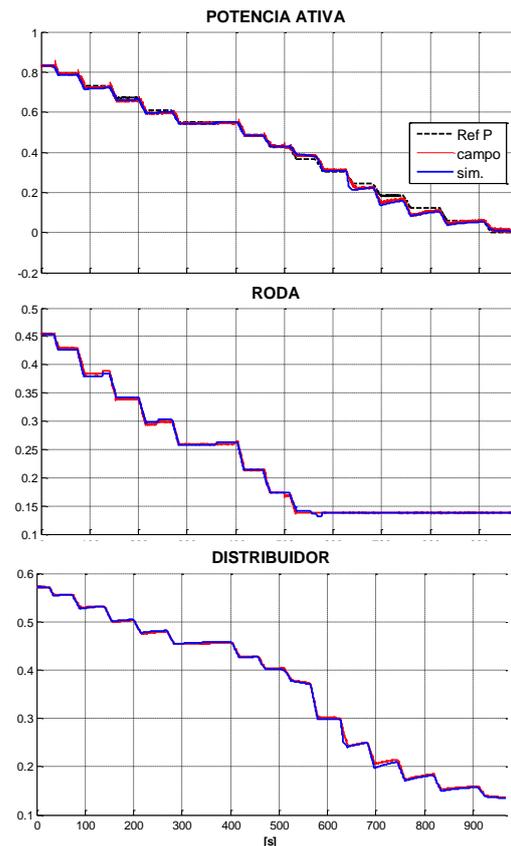


Figura 14. Validação do Ensaio de Tomada Gradativa de Carga

Nota-se a aderência do modelo nas variáveis do distribuidor (pás diretrizes), da roda (pás do rotor) e da potência ativa em toda a faixa operativa da turbina.

A Figura 15 é a reprodução do ensaio de estatismo com o controle em modo de potência. Para reprodução desse ensaio foi aplicado um desvio fixo na leitura de velocidade feita pelo RV. É possível validar os parâmetros do estatismo transitório e permanente com esse ensaio. Ele é repetido em diferentes patamares de carga e também com diferentes valores de desvios de frequência. Apenas o ensaio em carga média está sendo apresentado pela Figura 15.

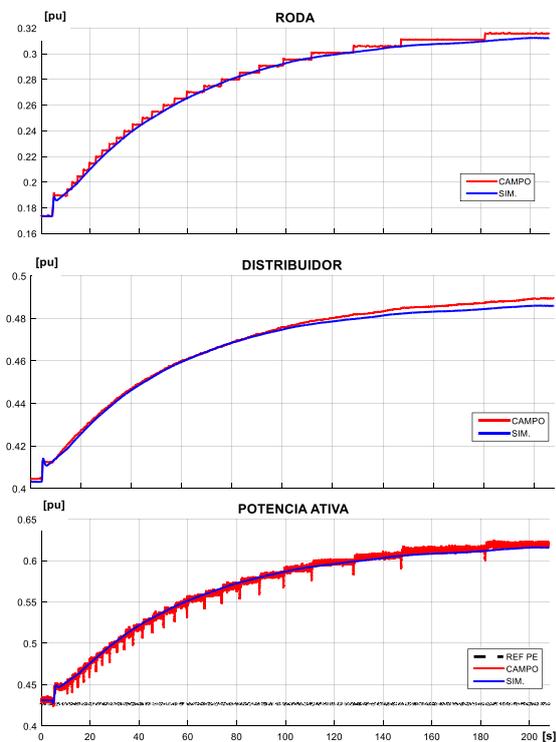


Figura 15. Ensaio de Estatismo Permanente

Destaca-se que existe uma histerese móvel na referência de posição da roda, proveniente da saída da curva de conjugação do RV. Esta é uma tática de controle para minimizar o número de movimentações da roda. Todavia, para fins de modelagem em estudos de transitórios eletromecânicos, não há necessidade desse tipo de representação matemática.

A Figura 16 e a Figura 17 apresentam o degrau de potência em cargas média e alta com o controle em modo de potência.

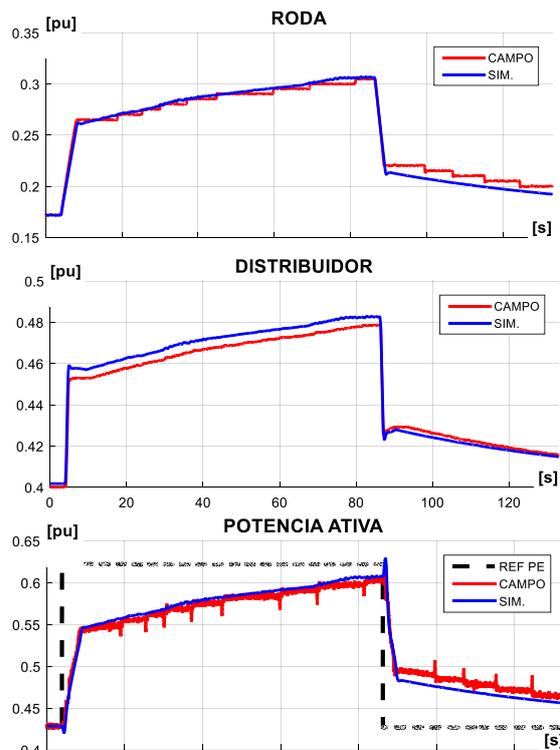


Figura 16. Degrau de Potência - Carga Média

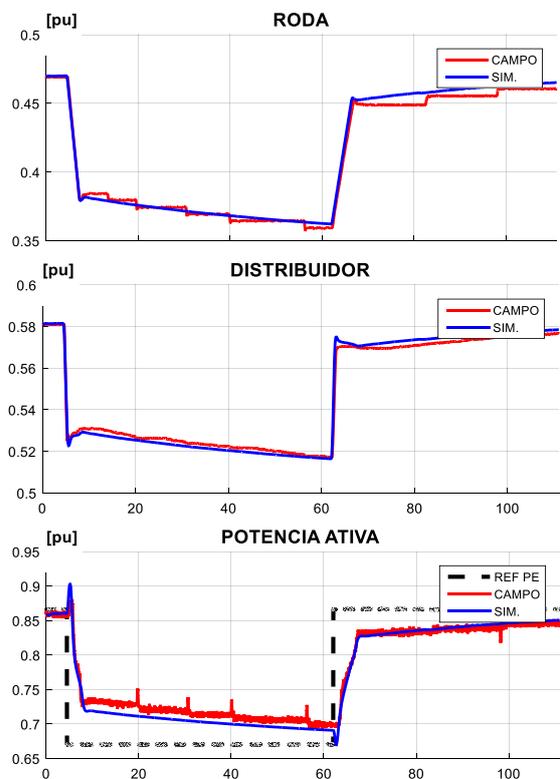


Figura 17. Degrau de Potência - Carga Alta

#### 4.6 Característica Dinâmica do Modelo – Teste de Simulação de Rede Isolada

O teste de isolamento simulada é um ensaio padronizado pela IEEE 1207 [5] e pela IEC 60308 [6] para análise da regulação primária da unidade e para a sintonia ótima do estatismo transitório do RV de turbinas

hidráulicas. Este teste consiste em fechar a malha do RV com uma frequência resultante de uma simulação, em que o RV entende que a máquina está operando em um sistema isolado. Simula-se uma perturbação de carga nesse sistema que possa causar um desvio de frequência, somado à frequência real lida pelo RV.

Esse teste foi aplicado na unidade #45. Os resultados do teste em cargas baixa, média e alta são apresentados a seguir. O Modo de controle é o de velocidade isolado.

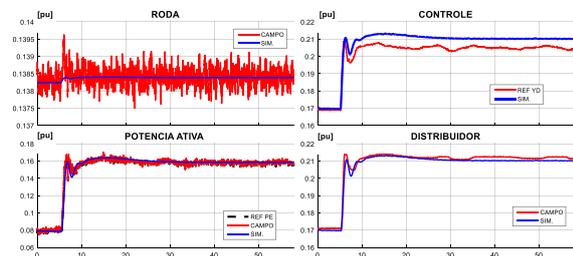


Figura 18. Ensaio de Simulação de Rede Isolada - Carga Baixa

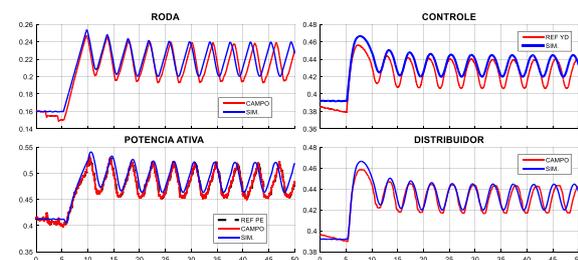


Figura 19. Ensaio de Simulação de Rede Isolada - Carga Média

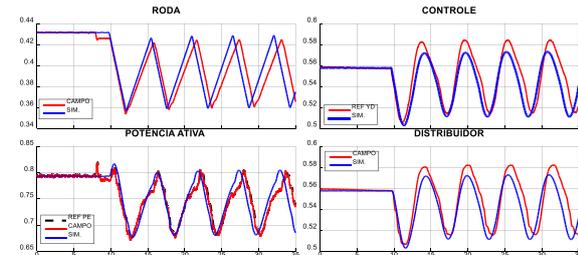


Figura 20. Ensaio de Simulação de Rede Isolada - Carga Alta

Observa-se que, com esse ensaio em campo, é possível se atestar se o RV está bem sintonizado ou não. No caso da UHE SA, os ganhos do estatismo transitório estão bastante altos, exigindo-se uma revisão dos seus ajustes.

Percebe-se que há um erro de fase entre o modelo simulado e o real. Porém, esse erro não vai interferir em um possível reajuste do controle de velocidade mediante simulações.

## 5 Importância do Modelo Dedicado

A importância de um modelo dedicado para representação das turbinas Bulbo é avaliada mediante a comparação de simulações utilizando o modelo proposto de turbina Bulbo versus o modelo típico de Turbinas Francis da Figura 2. Para isso, basta assumir que a variável  $\Delta Y_r$  do modelo da turbina Bulbo da Figura 3 é equivalente a zero.

A simulação apresentada na Figura 21 é de um degrau de potência do modelo completo proposto para representação das turbinas Bulbo. Já a Figura 22 apresenta a simulação do mesmo ensaio, mas desconsiderando os efeitos da desconjugação, assumindo-se que  $\Delta Y_r$  é zero, ou seja, que o resultado prático é o mesmo que utilizar um modelo convencional de uma turbina Francis.

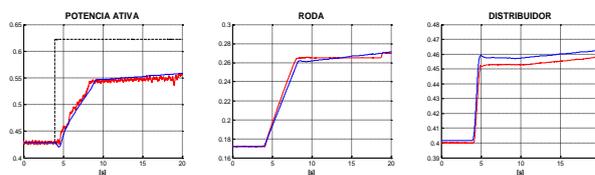


Figura 21- Degrau de Potência. Simulação da Turbina Bulbo usando o Modelo Proposto (azul) versus a Curva de Campo (vermelho)

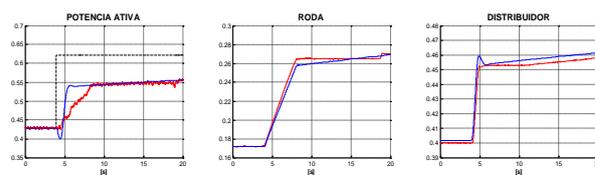


Figura 22. Degrau de Potência. Simulação da Turbina Bulbo Aproximada pelo Modelo de um Turbina Francis (azul) versus a Curva de Campo (vermelho)

Observa-se que a discrepância é bastante significativa quando os efeitos da desconjugação não são considerados. Essa não representação do erro de conjugação pode causar uma aproximação errônea do parâmetro  $T_w$  da turbina. No modelo em que foi desconsiderado o efeito do erro de conjugação, a estimação do  $T_w$  levaria a valores mais altos.

Esse problema da representação correta do modelo fica mais evidente quando são comparados os resultados de simulação de rede isolada com e sem os efeitos da desconjugação. Os resultados são apresentados nas Figura 23 e Figura 24, respectivamente, para os dois casos.

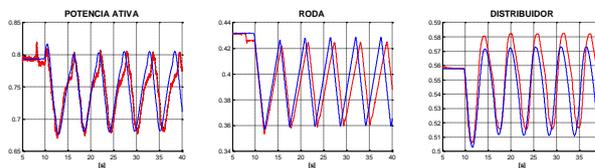


Figura 23 - Simulação de Rede Isolada. Simulação da Turbina Bulbo usando o Modelo Proposto (azul) versus a Curva de Campo (vermelho)

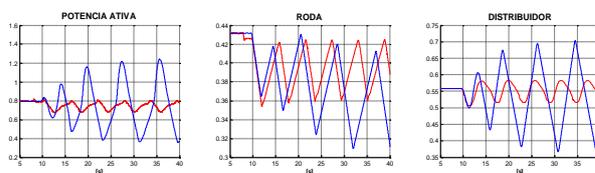


Figura 24. Simulação de Rede Isolada. Simulação da Turbina Bulbo Aproximada pelo Modelo de um Turbina Francis (azul) versus a Curva de Campo (vermelho)

Nota-se que a aproximação da turbina do tipo Bulbo pelo modelo da turbina do tipo Francis acarreta um

resultado bem diferente em relação ao real, enquanto que para o modelo proposto o resultado é satisfatório para análise da regulação primária. Um estudo, com ênfase na regulação primária, com o modelo inadequado, pode levar a recomendações e resultados errôneos.

## 7 Conclusão

São poucos os trabalhos técnicos que apresentam abordagens de modelagem de turbinas Bulbo/Kaplan. Mesmo nos poucos trabalhos disponíveis na literatura, há raras simulações de validação com ensaios de campo. Neste contexto, o presente informe é de grande contribuição técnica e acadêmica, pois nele foi apresentado um modelo capaz de reproduzir com a fidelidade necessária a dinâmica das turbinas Bulbo para estudos de transitórios eletromecânicos. Os ensaios de campo reproduzidos via simulação corroboraram a validade do modelo proposto.

O modelo proposto foi aplicado na validação da turbina de cinco pás da UHE Santo Antônio. Esse novo modelo permite que estudos mais criteriosos possam ser realizados, contribuindo para as ações corretivas necessárias na sintonia dos controladores de velocidade de forma a se buscar resultados mais robustos mediante os eventos de frequência.

## Referências Bibliográficas

- [1] KUNDUR, P. Power Systems Stability and Control, McGraw-Hill, jan. 1994.
- [2] IEEE. Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies. IEEE Power & Energy Society, Technical Report, PES-TR1, jan. 2013.
- [3] PAIVA, R. B.D., et al – Importância Da Validação De Modelos Através De Ensaios Em Campo Para Estudos De Regulação Primária E Repotencialização Em Usinas Hidrelétricas, XXIII SNPTEE, 2015
- [4] PAIVA, R. B.D., et al – Modelagem de Turbinas Hidráulicas Tipo Kaplan e Bulbo em Regime Permanente e Transitório. XXIV SNPTEE, 2017
- [5] IEEE Std 1207-2011, IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units. EUA.
- [6] IEC60308 – Hydraulic Turbines – Testing of control systems. CEI/IEC 60308:2005. Suíça.
- [7] GUSTAFSSON, M. Improved Governing of Kaplan Turbine Hydropower Plants Operating Island Grids. Dissertação de Mestrado – KTH Royal Institute of Technology – Estocolmo, Suécia. 2013.
- [8] IEEE. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. IEEE Transactions on Power Systems, v. 7, n. 1, p. 167-179, fev. 1992.