



**GRUPO - IV**

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

**CONTRIBUIÇÃO PARA MODELAGEM E VALIDAÇÃO DA MALHA HIDRÁULICA DE REGULADORES DE VELOCIDADE: ESTUDO DE CASO EM IRAPÉ**

<b>Adinã M. Pena (*)</b> CEMIG GT	<b>Gustavo H. C. Oliveira</b> UFPR	<b>João A. Souza</b> COPI	<b>Gideon V. Leandro</b> UFPR	<b>Emerson Donaisky</b> PUCPR
--------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

**RESUMO**

Os mecanismos de acionamento de regulação de velocidade das turbinas hidráulicas possuem dinâmicas que afetam a performance do Sistema Elétrico de Potência (SEP), durante e após distúrbios. A modelagem precisa da malha hidráulica, turbina e conduto, levam a resultados, nas simulações, mais próximos da realidade.

Afim de obter uma modelagem detalhada da malha hidráulica e do conduto/turbina da Usina Irapé, são abordados neste artigo, os ensaios elétricos realizados para identificação e estimação dos modelos, por meio de um programa computacional especialmente desenvolvido, cujos resultados foram validados.

**PALAVRAS-CHAVE**

Turbinas Hidráulicas, Identificação, Modelagem, Regulação de Velocidade, Ensaios Elétricos

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A condição estável da frequência é atingida quando se tem o balanço entre potência mecânica no eixo da turbina versus a potência elétrica de saída. Para manter esta condição é necessário dotar a turbina de sistemas de controle de velocidade. Nas Usinas Hidroelétricas (UHE), este controle envolve dispositivos mecânicos/hidráulicos de grandes dimensões que, possuem folgas e não linearidades (histereses, zona morta e limites).

Para estudos e simulações do sistema elétrico de potência (SEP), é necessária a representação das malhas de controle de velocidade das turbinas das usinas geradoras na forma de modelos de simulação digital. Estes modelos são úteis para estudar a operação segura do SEP, no âmbito dos estudos do planejamento da operação, na análise das ocorrências/perturbações e utilizada nos estudos do planejamento da expansão.

As dinâmicas do sistema hidráulico e da turbina afetam o desempenho da UHE e do SEP, em rede interligada, sob perturbação ou em rede isolada. A malha hidráulica aciona as turbinas hidráulicas, tais como válvulas atuadoras, servo motores e distribuidor. A modelagem precisa da malha hidráulica é aquela que considera todas as características lineares e não lineares do controle e do sistema hidráulico, como faixa morta, histerese, saturação, assimetria de comportamento (comando de abrir diferente do comando de fechar), ganho da turbina e inércia do conduto em cada ponto de trabalho.

A modelagem precisa dos componentes do sistema de controle de velocidade é obtida através de um procedimento conhecido como identificação de sistemas. Neste procedimento, através de ensaios elétricos, são extraídos dados para a modelagem, que neste trabalho foi classificada como de dois tipos: a) malha hidráulica (válvula proporcional, válvula distribuidora e distribuidor), representados através de modelos do tipo Afins por Partes; b) conjunto conduto forçado e turbina, representado através de uma descrição não linear. Após a identificação, os modelos estimados são validados através de uma comparação entre o comportamento dinâmico do ambiente de simulação e dos dados de medição em campo para as condições de máquina a vazio e em carga.

Neste artigo, descreve-se o processo de identificação, modelagem/validação da malha hidráulica, conduto forçado e turbina da UHE Irapé da CEMIG GT, em Minas Gerais.

## 2.0 - DESCRIÇÃO DAS VÁLVULAS PROPORCIONAL, DISTRIBUIDORA E DISTRIBUIDOR

Sistemas de acionamentos hidráulicos promovem a amplificação de potência de grandes equipamentos mecânicos-hidráulicos para regular a rotação do rotor das turbinas de UHE's, comandados pelo regulador de velocidade (RV). O diagrama de blocos da Figura 1 ilustra a malha de controle de velocidade de Usinas Hidroelétricas.

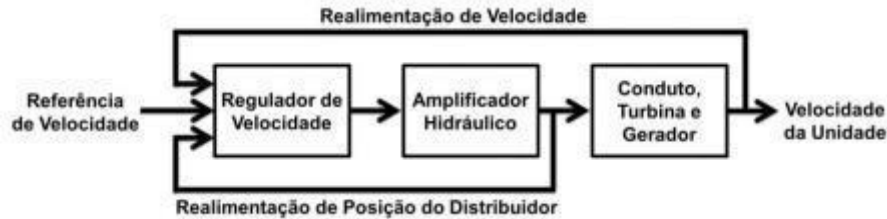


FIGURA 1 – Sistema de Controle de Velocidade.

O amplificador hidráulico transforma o sinal elétrico do RV em sinal de potência capaz de deslocar os grandes componentes mecânicos da turbina, mesmo com fortes pressões do fluxo de água no conduto e com relativa rapidez. Geralmente são compostos por três partes principais: válvula proporcional ou piloto, válvula distribuidora, servo motor e distribuidor, conforme pode ser visto na Figura 2 e no diagrama de blocos da Figura 3 [1].

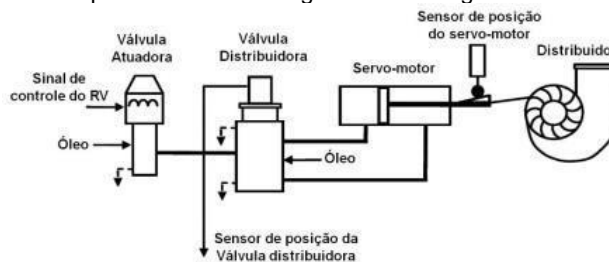


FIGURA 2 – Amplificador Hidráulico [2].

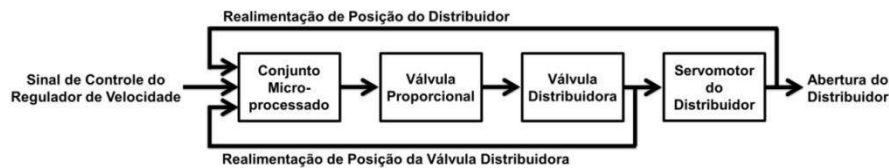


FIGURA 3 – Diagrama de Blocos do Amplificador Hidráulico.

As válvulas e sistemas envolvidos na malha hidráulica possuem dinâmica não-linear e, são oriundas de fatores como: a compressibilidade dos fluidos hidráulicos, o complexo fluxo de óleo através das válvulas, a influência da temperatura na dinâmica dos fluidos, o atrito do cilindro hidráulico durante movimentos, o desgaste natural por uso e os limites físicos impostos, assim como em suas respectivas faixas de variação.

O artigo [3] é um dos primeiros a citar a não linearidade tipo *backlash* presente no controle de velocidade em usinas elétricas e a presença de oscilações não amortecidas na frequência da máquina. Na década de 70, Ramey e Skooglund [4] apresentaram modelos detalhados de atuador hidráulico e do controlador para estudo de estabilidade de sistemas de potência. O *IEEE Committee* [5] também apresentou modelos para sistemas de controle de velocidade em usinas elétricas, incluindo, a malha hidráulica e suas não-linearidades que, neste trabalho, estavam definidas na forma de limites em suas variáveis. Mais tarde, Kundur e Bayne [6] exploraram o efeito das válvulas em amplificadores hidráulicos no controle de velocidade e na estabilidade do sistema elétrico. Para tanto, descreveram as válvulas envolvidas contendo limitações de velocidade, posição, atrasos e *backlash*. Além disso, indicaram tempos diferentes para a abertura e fechamento destas válvulas, ou seja, velocidades máximas diferentes, conforme ilustrado pela Figura 4.

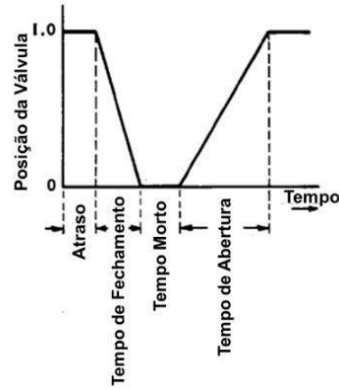


FIGURA 4 – Comportamento típico de válvulas em atuadores hidráulicos (Adaptado de [6]).

No fim dos anos 70 e década de 80, as oscilações sustentadas foram associadas ao fenômeno de ciclo limite gerado por não-linearidades tipo *backlash*, introduzidas para representar a malha hidráulica. Neste sentido, Wu e Dea [7] descreveram uma análise de sensibilidade dos parâmetros de um sistema de controle de velocidade em uma área isolada. Em [8] foi descrito um método para prever e analisar as oscilações sustentadas tipo ciclo limite, geradas devido ao *backlash*, no sistema de controle de velocidade. A partir dos anos 2000, Tsay [10] realizou a análise de um sistema interligado, com modelos não lineares do tipo *backlash* na malha hidráulica. Resultados mostraram que estas não linearidades tendem a produzir oscilações sustentadas na frequência da área.

A representação mais simples não-linear utiliza zona-morta (*backlash*) para representar o amplificador hidráulico da Figura 3 [3,7]. Este modelo foi aprimorado incluindo-se um sistema de primeira ordem em série com a não linearidade do tipo *backlash* [8,10]. Outra representação não linear do diagrama da Figura 3 é encontrada em [4,5,11,12] e reproduzido na Figura 5. As válvulas proporcional e distribuidora são representadas por um sistema de 1ª ordem com limitação de velocidade na saída da válvula distribuidora. O distribuidor é representado por um integrador também limitado na saída.

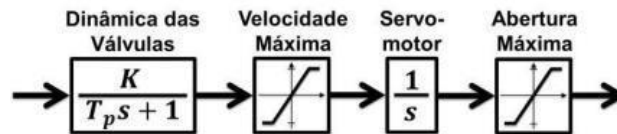


FIGURA 5 – Representação do Amplificador Hidráulico (Adaptado de [4]).

Em [13] a representação descrita por [4] é expandida adicionando-se uma zona morta no amplificador hidráulico, como pode ser observado na Figura 6.

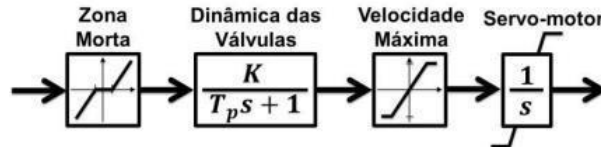


FIGURA 6 – Representação do Amplificador Hidráulico com zona morta.

Uma forma um pouco diferente do amplificador hidráulico da Figura 3 é encontrada em [9], onde considera-se apenas a válvula proporcional como amplificador hidráulico e esta é modelada com as não linearidades do tipo atraso de transporte, zona morta e saturação, apresentado na Figura 7.

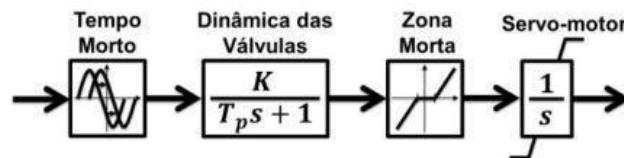


FIGURA 7 – Representação do Amplificador Hidráulico com tempo morto e zona morta (Adaptado de [9]).

### 2.1 Modelos Afins por Partes – PWA

A malha hidráulica do controle de velocidade de UHE's geralmente é modelada por sistemas dinâmicos contínuos. Sistemas dinâmicos contínuos lineares são normalmente representados por funções de transferência. Quando não-lineares, esta propriedade é representada pela adição de características como saturação, zona morta, etc. Alguns sistemas possuem dinâmica definida por eventos e não pelo tempo, são os chamados sistemas a eventos discretos. Quando se tem uma relação entre sistemas dinâmicos contínuos e sistemas a eventos discretos, temos os chamados sistemas híbridos. Uma classe dos sistemas híbridos são aqueles onde existe um chaveamento

definido por eventos entre modelos dinâmicos contínuos distintos. Dentre os sistemas híbridos chaveados, existe uma classe que são os Sistemas Afins por Partes (PWA) [14]. Nestes sistemas, regiões são definidas por pontos de operação e a cada região, associa-se um sistema linear (ou afim).

## 2.2 Modelagem Proposta para Malha Hidráulica

Para este caso específico da UHE Itaipu, optou-se por modelar a malha hidráulica considerando uma representação PWA que pudesse referir às variáveis físicas das válvulas. Assim, a válvula proporcional foi modelada como uma configuração em série de um sistema de primeira ordem, um ganho, blocos não lineares de histerese e saturação, ilustrado na Figura 8 [2]. O sistema de primeira ordem e o ganho representam a dinâmica da válvula e a saída destes dois blocos representa o deslocamento da válvula em mm. Os blocos na sequência representam as não-linearidades tipo *backlash* e limitação de curso da válvula.

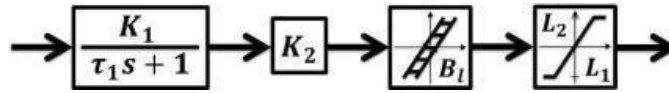


FIGURA 8 – Representação da Válvula Proporcional.

A Válvula Distribuidora foi modelada como uma configuração em série composta por um ganho variável e um bloco integral com não linearidade tipo saturação, visualizado na Figura 9 [2]. O sinal da Válvula Proporcional define a abertura ou fechamento da Válvula Distribuidora, com isso tem-se dois ganhos, sendo cada um correspondente ao sentido do deslocamento da válvula (conforme Figura 4).

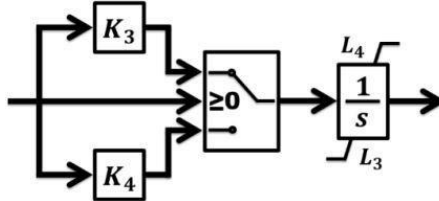


FIGURA 9 – Representação da Válvula Distribuidora.

O distribuidor foi modelado numa configuração em série composta por um bloco não linear tipo zona morta, ganho variável e um bloco integral com não linearidade tipo saturação, como pode ser visto na Figura 10 [2]. Após a não linearidade tipo zona morta, representando o recobrimento da válvula, o sinal de saída após a zona morta define a abertura ou fechamento do Distribuidor, com isso tem-se dois ganhos, relativos ao sentido do deslocamento.

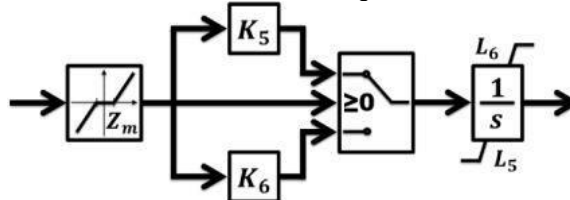


FIGURA 10 – Representação do Distribuidor.

## 3.0 - DESCRIÇÃO DO CONJUNTO CONDUTO TURBINA

Alguns modelos dinâmicos para turbinas e conduto foram introduzidos anteriormente para programas de simulação e outras finalidades na literatura, [5], [13]. A turbina hidráulica possui uma grande variedade de formas e tamanhos, e dividem-se entre quatro tipos principais: Pelton, Francis, Kaplan, Bulbo. Cada um destes tipos é adaptado para funcionar em usinas, como uma determinada faixa de altura de queda. As vazões volumétricas podem ser igualmente grandes em qualquer uma delas, mas a potência será proporcional ao produto da queda (H) e vazão volumétrica (Q). Em todos os tipos há princípios de funcionamento comuns, onde a água entra pela tomada d'água, que está numa nível maior, e é levada através de um conduto até a entrada da turbina. Lá a água passa por um sistema de palhetas móveis (gate), que controlam a vazão volumétrica fornecida à turbina. As turbinas hidráulicas apresentam características não-lineares, que variam de forma significativa com a carga, isto requer um controle de diferentes posições do gate e do erro de velocidade. Na prática, o modelo da turbina é linear na condição nominal. Porém, modelos não lineares são necessários quando as mudanças de velocidade e potência são grandes em um ilhamento, condições de rejeição de carga e de restauração do sistema.

### 3.1 Modelos do conjunto turbina hidráulica-conduto forçado

Os modelos podem ser classificadas em lineares e não-lineares. Os modelos ainda podem levar ou não em consideração o efeito da elasticidade da coluna de água. As equações matemáticas dos modelos podem ser apresentadas de diferentes maneiras.

São descritos na literatura 3 modelos lineares de turbinas hidráulicas, a saber: Modelo linear simplificado [13], Modelo linear não-ideal [13] e Modelo linear elástico não-ideal [13]. Modelos lineares são geralmente úteis para estudos de sistemas de controle utilizando técnicas de análise linear (lugar das raízes, resposta de frequência, etc.) e proporcionar uma boa visão sobre as características básicas da dinâmica do sistema hidráulico. Estes modelos são inadequados para grandes variações de potência ou frequência do sistema [11].

São encontrados 2 modelos não-lineares de turbinas hidráulicas na literatura: Modelos não-lineares simplificado (considera o conduto inelástico, para condutos curtos e médios, onde é negligenciada a onda de pressão e a compressibilidade da água) [13] e Modelos não-lineares considerando a coluna elástica da água (para condutos longos) [13].

#### 4.0 - RESULTADOS DE ESTIMAÇÃO DAS VÁLVULAS E DISTRIBUIDOR

No ensaio em água morta (sem água na turbina) e em malha aberta é injetado um degrau na entrada e mede-se a saída da válvula proporcional (saída real). De forma análoga é feito com o modelo estimado (Figura 8), onde a saída do modelo estimado (saída identificada) pode ser visto na Figura 11.

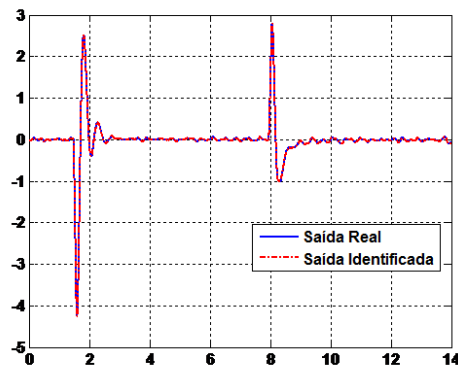


FIGURA 11 – Sinal de saída da Válvula Proporcional (Real e Modelo Identificado).

No mesmo ensaio em água morta e em malha aberta, aproveitando o degrau injetado na entrada, mede-se a saída da válvula proporcional e mede-se a saída da válvula distribuidora (saída real). De forma análoga é feito com o modelo estimado (Figura 9), cuja saída do modelo (saída identificada) é vista na Figura 12.

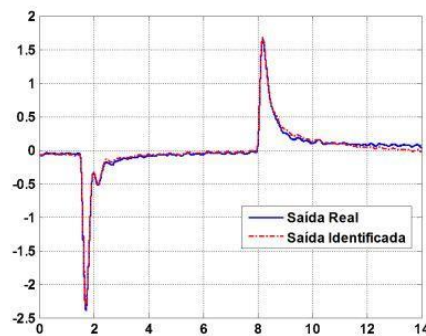


FIGURA 12 – Sinal de saída da Válvula Distribuidora (Real e Modelo Identificado).

No ensaio em água morta e em malha fechada é injetado um degrau na entrada da válvula proporcional e mede-se a posição do distribuidor (saída real). De forma análoga é feito com o modelo estimado (Figura 10), registrando a saída do modelo estimado (saída identificada) conforme pode ser visto na Figura 13.

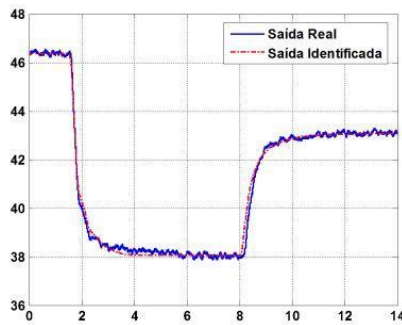


FIGURA 13 – Sinal de saída do distribuidor (Real e Modelo Identificado).

Foi utilizado um aplicativo especialmente desenvolvido que estima a parametrização a partir de modelos pré-definidos. Ele utiliza os resultados de ensaios realizados em campo. Na estimação considera o vetor tempo associado às colunas entrada versus saída de cada conjunto. Para identificação de parâmetros do modelo estimado da malha hidráulica, ver Figura 14, obtêm-se os parâmetros da Tabela 1, que permitem a validação das saídas identificadas do modelo em relação aos ensaios de resposta ao degrau das válvulas (V.V.) proporcional, distribuidora e distribuidor.

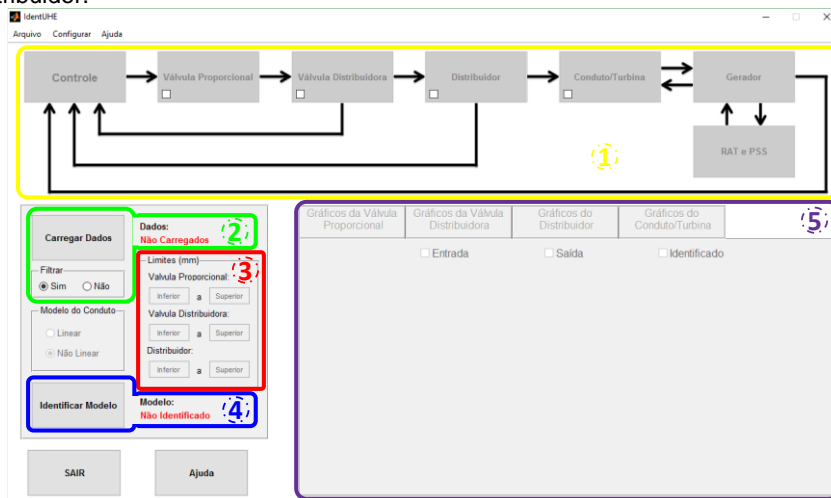


Figura 14 - Tela Inicial do Programa para Estimar os Parâmetros das V.V. Proporcional, Distribuidora e Distribuidor.

Tabela 1 – Ganhos Identificados

VP	VD1	VD2	ZM	D1	D2
0,6411	4,4280	4,2099	0,0678	7,0216	7,8527

## 5.0 - ESTIMAÇÃO DO CONJUNTO CONDUITO TURBINA

A UHE Irapé utiliza turbina tipo Francis e conduto considerado médio, então, foi escolhido o modelo não-linear simplificado, proposto pelo IEEE-WG-1992 [11], conforme diagrama da Figura 15.

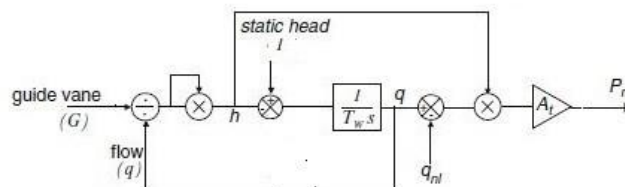


FIGURA 15 – Modelo não-linear simplificado, conduto inelástico (Modelo IEEE).

## 6.0 - VALIDAÇÃO COM ENSAIO A VAZIO

Adotando-se o sinal de frequência medido, proveniente do ensaio a vazio, como entrada para o aplicativo de identificação, tem-se a saída do modelo estimado validado, como mostrado na Figura 16.

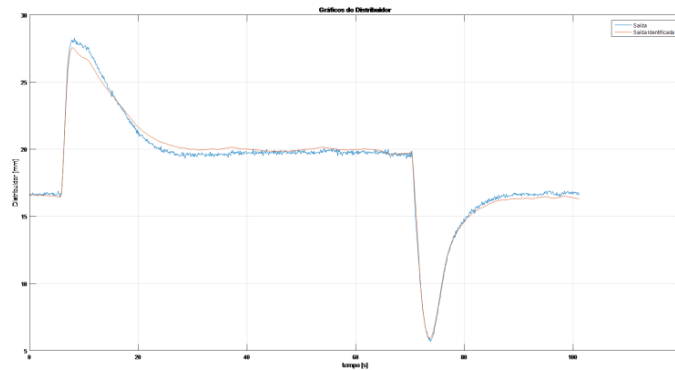


Figura 16 – Sinais: medido (azul) e do modelo estimado (vermelho), para o degrau de frequência.

#### 7.0 - VALIDAÇÃO COM ENSAIO COM DEGRAU DE POTÊNCIA

Adotando-se o sinal de potência elétrica medido, proveniente do ensaio em carga, como entrada para o aplicativo de identificação, tem-se a saída do modelo estimado validado, como mostrado na Figura 17.

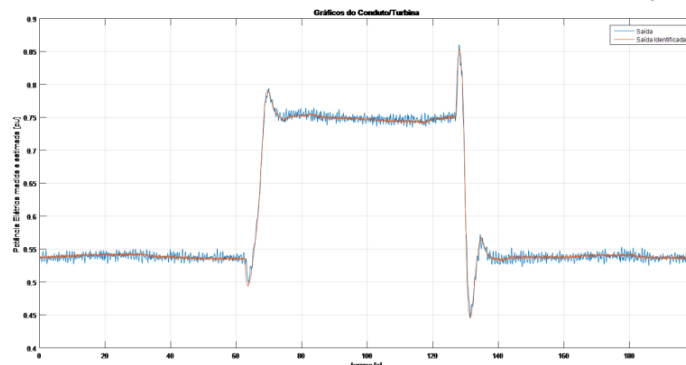


Figura 17 – Sinais: medido (azul) e modelo estimado (vermelho), para o degrau de potência elétrica.

#### 8.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado um método para estimação de parâmetros e modelagem precisa da malha hidráulica, parte do sistema de controle de velocidade de usinas hidroelétricas. O objetivo principal é a construção de modelos de simulação digital para análise de ocorrências, planejamento da expansão e operação do SEP. Portanto, uma revisão detalhada da evolução dos modelos dinâmicos da malha hidráulica dos sistemas de controle de velocidade, descrevendo suas não linearidades, foi abordada e a validação dos modelos e seus parâmetros em relação a resposta de ensaios em campo, foi apresentada. Uma nova parametrização usando conceitos de modelos Afins Por Partes ou PWA foi empregada e seus impactos na modelagem foram verificados, através de validação com sinais de saída medidos. Os resultados mostram que a modelagem detalhada do sistema permite a visualização de fenômenos não lineares e que são muito próximos do perfil de resposta dos componentes da malha hidráulica de usinas hidroelétricas de geração de energia. A utilização destes modelos também podem contribuir para a otimização dos parâmetros dos reguladores de velocidade, para permitir a operação segura das usinas hidroelétricas em distúrbios no SEP ou em operação em rede isolada.

#### 9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units. **IEEE Std 1207-2011**. New York, 2011.
- [2] J. A. SOUZA. **Modelos Teóricos Sistema de Controle de Velocidade**. Relatório 2/1, Projeto P&D ANEEL CEMIG GT, P&D GT465, 2013.
- [3] C. CONCORDIA, L. K. KIRCHMAYER, E. A. SZYMANSKI. **Effect of Speed-Governor Dead Band on Tie-Line Power and Frequency Control Performance**. Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol.76, no.3, pp.429-434, 1957.
- [4] D. G. RAMEY, J. W. SKOGLUND. **Detailed Hydro governor Representation for System Stability Studies**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-89, no.1, pp.106-112, 1970.
- [5] I. C. REPORT. **Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-92, no.6, pp.1904-1915, 1973.

- [6] P. KUNDUR, J. P. BAYNE. **A study of early valve actuation using detailed prime mover and power system simulation.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.94, no.4, pp.1275-1287, 1975.
- [7] F. F. WU, V. S. DEA. **Describing-function analysis of automatic generation control system with governor deadband.** Electric Power Systems Research, vol.1, no.2, pp.113-116, 1978.
- [8] H. C. CHANG, C. T. PAN, C. C. WEI, C. L. HUANG. **Limit cycle analysis of a hydroelectric system: A new approach.** Electric Power Systems Research, vol.11, no.1, pp.49-58, 1986.
- [9] B. STRAH, O. KULJACA, Z. VUKIC. **Speed and active power control of hydro turbine unit.** IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.20, no.2, pp.424-434, 2005.
- [10] T.-S. TSAY. **Load-frequency control of interconnected power system with governor backlash nonlinearities.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.33, no.9, pp.1542-1549, 2011.
- [11] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. **Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies.** IEEE Transactions on Power Systems, vol.7, no.1, pp.167-179, 1992.
- [12] L. N. HANNETT, J. W. FELTES, B. FARDANESH. **Field tests to validate hydro turbine-governor model structure and parameters.** IEEE Transactions on Power Systems, vol.9, no.4, pp.1744-1751, 1994.
- [13] P. KUNDUR. **Power System Stability and Control.** McGraw-Hill, 1994.
- [14] E. D. SONTAG. **Nonlinear regulation: The piecewise linear approach.** IEEE Transactions on Automatic Control, vol.26, no.2, pp.346-358, 1981.



## 10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Adinã Martins Pena** é natural de João Monlevade, MG. Nascido em Outubro de 1969, concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica pela PUCMINAS, de Belo Horizonte, em 1999, e concluiu a pós-graduação na UFSC, de Florianópolis, em 2007. Engenheiro de Planejamento Elétrico, trabalha na Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG Geração e Transmissão, desde Julho de 1987 e na Gerência de Planejamento Elétrico, desde Outubro de 2004. Atua na área de planejamento da operação do sistema elétrico da geração e transmissão e interação de equipamentos com o sistema elétrico. Possui artigos redigidos e apresentados em congressos e seminários nacionais, em temas relacionados com modelagem e simulação de sistemas de controle e de equipamentos dos Sistemas Elétricos de Potência.

**Gustavo Henrique da Costa Oliveira** graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 1988, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1992, Doutor em Engenharia pela Universidade de Nice Sophia-Antipolis, França, e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1997. Atualmente, ele é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Suas atividades de pesquisa incluem: identificação de sistemas, controle de processos e controle preditivo, modelagem e simulação de transformadores de potência, controle de carga/frequência na geração de energia elétrica.

**João Antunes de Souza** é engenheiro eletricitista formado pela PUC em 1982, com Pós-Graduação pela UFSC em 1990. Engenheiro de Sistemas de Controle na CEMIG até julho/2010. Atualmente diretor da COPI Controle de Processos Industriais.

**Gideon Villar Leandro** graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista em 1989, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba em 1992, Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 2000. Atualmente, é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Suas atividades de pesquisa incluem: identificação de sistemas, controle de processos e controle inteligente, sistemas a eventos discretos, controle de carga/frequência na geração de energia elétrica.

**Emerson Donaisky** obteve os graus de bacharel em Engenharia de Controle e Automação, mestre e doutor em Engenharia de Produção e Sistemas na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), em 2005, 2008 e 2016, respectivamente. Atualmente é professor adjunto da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). A sua pesquisa está voltada a modelagem e controle de sistemas.