



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

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO – IV

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

MODELAGEM DO SISTEMA HIDRÁULICO DOS REGULADORES DE VELOCIDADE DA PRIMEIRA ETAPA DA UHE DE TUCURUÍ ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

**Fabício G. Nogueira (*)
UFPA**

**Carlos T. Costa Jr.
UFPA**

**Walter Barra Jr.
UFPA**

**José A. L. Barreiros
UFPA**

**Paulo S. Nascimento F.
UFPA**

**Janio J. de Lana
Eletronorte**

**Ricardo A. Campos
Eletronorte**

**Eduardo A. F. Araújo
Plena Transmissoras**

RESUMO

Este trabalho descreve a metodologia e os resultados de testes experimentais de identificação realizados nos sistemas hidráulicos de atuação dos reguladores de velocidade da UHE de Tucuruí, apresentando o projeto, implementação e os ajustes dos sinais de testes aplicados. São relatadas as dificuldades encontradas durante os testes em campo e as respectivas soluções que foram implementadas pela equipe do projeto.

PALAVRAS-CHAVE

Regulador de velocidade, Identificação de sistemas, Sistemas hidráulicos, Controle de Hidrogeradores.

1.0 - INTRODUÇÃO

Sistemas hidráulicos são utilizados em uma grande quantidade de processos industriais. São caracterizados pela alta durabilidade e a habilidade de produzir grandes forças com rápida velocidade de resposta. Porém, a dinâmica desses sistemas é naturalmente não-linear, e conseqüentemente, de difícil controle. Estas não-linearidades podem ser causadas por fatores como: a compressibilidade dos fluidos hidráulicos, o complexo fluxo 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 nos valores máximos das grandezas mecânicas, assim como em suas respectivas faixas de variação [1].

Um exemplo de sistema hidráulico é o sistema de atuação do distribuidor de turbinas hidráulicas, que é comandado pelo regulador de velocidade. O conhecimento de modelos matemáticos que representem a dinâmica do sistema hidráulico é de vital importância para o projeto e ajuste eficiente do regulador de velocidade. Porém, muitas vezes os fabricantes de reguladores de velocidade não disponibilizam modelos para estes sistemas. Ou mesmo ao longo de anos de operação, fatores como o desgaste pelo atrito mecânico, podem influenciar na dinâmica dos componentes, e por conseqüência afetando os modelos originais e o desempenho do regulador.

Assim, neste trabalho foi realizado um estudo experimental para a modelagem destes componentes, através de testes de campo utilizando-se técnicas de identificação de sistemas, as quais se baseiam nas relações dinâmicas de causa e efeito entre as entradas e as saídas do sistema.

(*)Universidade Federal do Pará- UFPA, Rua Augusto Corrêa, nº 01 – ITEC - NESC – CEP 66075.-110 Belém, PA, Brasil, Tel: (+55 91) 3201-7680 – Fax: (+55 91) 3201-7680 – Email: wwwfabricio@yahoo.com.br

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DA UHE DE TUCURUI

O sistema de regulação de velocidade utilizado nas unidades geradoras da primeira etapa da UHE de Tucuruí são formados por um controlador eletrônico analógico e por um sistema hidráulico de atuação (sistema óleo-dinâmico). O regulador é caracterizado por duas malhas principais de realimentação: uma que implementa o estatismo permanente (variação de velocidade dependente da carga) e outra que implementa o estatismo transitório [2], [3]. O diagrama funcional da Figura 1 ilustra o sistema de regulação de velocidade das unidades geradoras da Casa de Força 1, da UHE de Tucuruí.

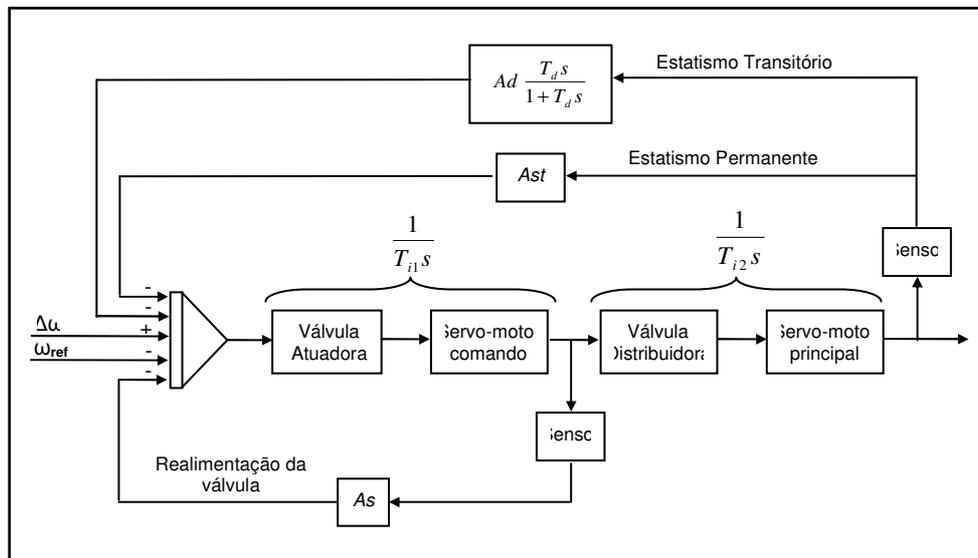


Figura 1 – Diagrama funcional simplificado do sistema de regulação de velocidade.

Basicamente, o sistema hidráulico é composto por um reservatório de ar comprimido, um reservatório de ar e óleo pressurizados, uma válvula atuadora (piloto), uma válvula distribuidora, servo-motores e o distribuidor (Figura 2).

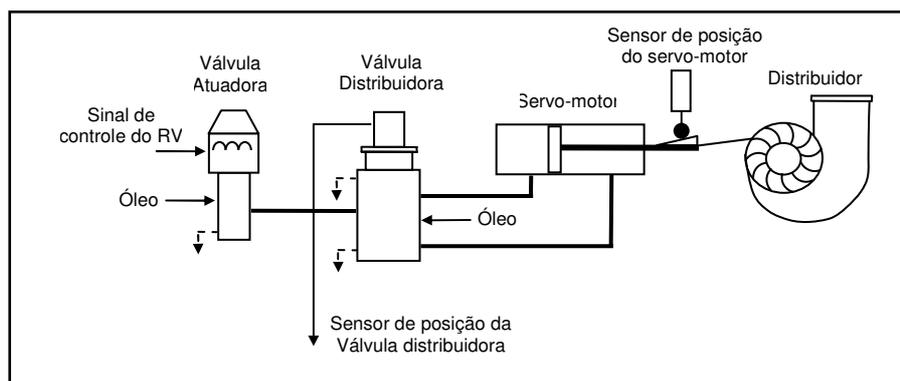


Figura 2 – Diagrama funcional simplificado do sistema de atuação hidráulico.

A válvula atuadora é responsável pela conversão eletro-hidráulica, constituindo o primeiro estágio de potência hidráulica no sistema. A vazão de óleo na saída da válvula é proporcional ao sinal elétrico aplicado na bobina móvel. O óleo sob pressão proveniente da entrada de alimentação comanda o servo-motor da válvula distribuidora. Devido ao emprego de uma camisa de distribuição rotativa permanente, o efeito do atrito é praticamente eliminado, obtendo-se assim um alto grau de sensibilidade e fidelidade de resposta.

A Figura 3 ilustra a respectiva válvula atuadora utilizada nas máquinas da primeira etapa da UHE de Tucuruí.



Figura 3 – Válvula atuadora, modelo TR-10, fabricada pela empresa Neyrpc (Eletronorte – UHE de Tucuruí).

A válvula distribuidora constitui um estágio de amplificação importante no sistema de regulação. Ela fornece a potência hidráulica necessária à manobra dos servo-motores, que por sua vez controlam, através da abertura/fechamento do distribuidor, o fluxo de água que passa pela turbina. A medição de posição da válvula distribuidora é efetuada por intermédio de um variômetro, que é um transdutor deslocamento-tensão. Esta medição é utilizada nos loops de realimentação de regulação por abertura. A Figura 4 ilustra a válvula distribuidora e a Figura 5 ilustra um dos servo-motores utilizados no sistema.



Figura 4 - Válvula distribuidora e variômetro de medição de posição (Eletronorte – UHE de Tucuruí).



Figura 5 – Servo-motor que aciona as pás do distribuidor (Eletronorte – UHE de Tucuruí).

3.0 - ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO EM CAMPO

Os ensaios de identificação em campo foram realizados na sala de controle de uma unidade hidrogeradora (UGH) de 350 MW, pertencente à primeira etapa da UHE de Tucuruí. Durante os testes, a máquina estava parada, com a

comporta fechada e o conduto forçado sem fluxo de água, logo, não gerando potência elétrica (ensaios de “água-morta”). Nesta condição operacional, a velocidade é nula e a malha de realimentação de estatismo transitório foi desativada. A Figura 6 ilustra o diagrama em blocos equivalente do sistema nos testes de “água-morta”.

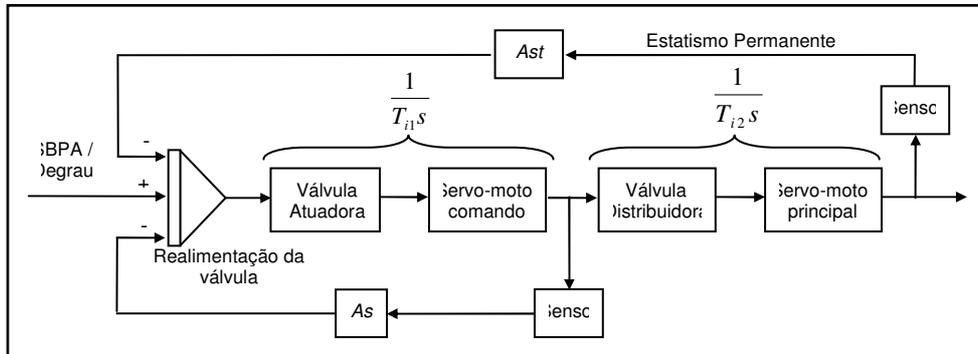


Figura 6 – Diagrama em blocos do sistema equivalente durante os ensaios de “água-morta”.

A malha de regulação da válvula distribuidora foi considerada como parte integrante do sistema hidráulico. Porém, o efeito da malha de estatismo permanente deve ser eliminado, caso contrário o modelo identificado não será apenas do sistema hidráulico.

Durante os testes em campo, a realimentação de estatismo permanente não pôde ser aberta, visto que a desativação desta malha poderia levar o sistema aos limites de excursão, devido à ação integral da válvula distribuidora e servo-motor, o que dificultaria a estimativa de um modelo linear para o sistema. Portanto, a aquisição de sinais durante os ensaios de identificação em campo foram realizados com esta malha fechada.

Para a identificação de um modelo do sistema hidráulico em malha-aberta, a alternativa adotada pela equipe de pesquisadores, foi realizar um processamento dos dados com o objetivo de cancelar o efeito do sistema em malha fechada, resultando apenas na dinâmica do sistema hidráulico de atuação. Para isto, o modelo estimado do sistema em malha-fechada, foi compensado com uma malha de realimentação de sinal contrário, anulando a ação do estatismo permanente. A Figura 7 ilustra a metodologia utilizada para a identificação do modelo.

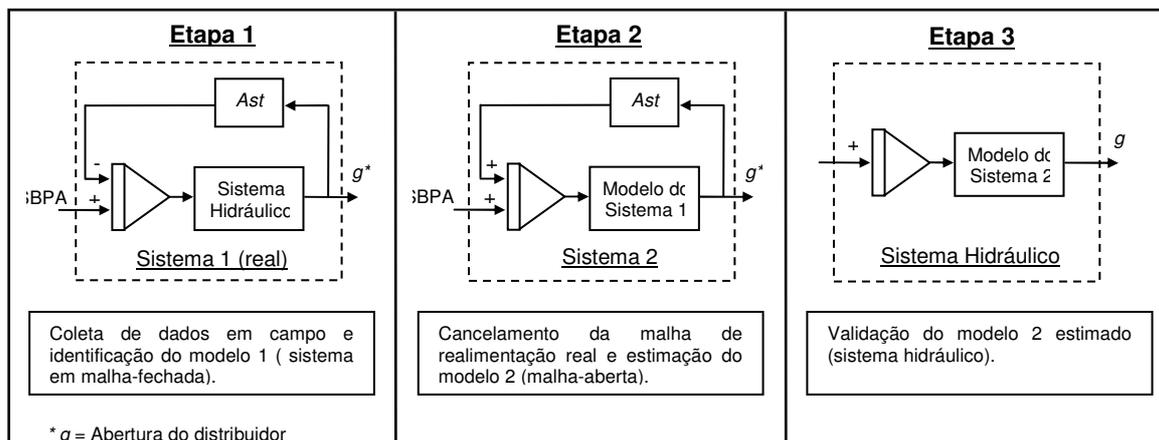


Figura 7 – Metodologia utilizada para a estimação do modelo do sistema hidráulico.

Os sinais de excitação injetados foram do tipo degrau e seqüência binária pseudo-aleatória (SBPA), aplicados em um ponto de soma do circuito somador do regulador automático de velocidade eletrônico. A resposta do sistema foi coletada através de sinais de tensão proporcionais à posição da válvula distribuidora e à abertura do distribuidor. A coleta e injeção de sinais foi realizada com o auxílio de um sistema digital embarcado, baseado em um controlador de sinais digitais, o qual foi desenvolvido pelos autores deste artigo.

A Figura 8 ilustra os equipamentos de aquisição e análise de dados instalados ao lado do armário do regulador de velocidade eletrônico, que fica localizado na sala de controle local da respectiva unidade geradora em teste.



Figura 8 – Instrumentação montada na sala de comando de uma UGH da primeira etapa da UHE de Tucuruí

3.1 Ensaio de Resposta ao Degrau

O primeiro ensaio realizado em campo foi a aplicação de um degrau (0.12 pu), aplicado em uma das entradas inversoras do somador do regulador de velocidade, e a respectiva aquisição dos sinais de posição da válvula e abertura do distribuidor. Este teste é útil para o levantamento da constante de tempo do sistema, que será a base para a parametrização da SBPA. Através da Figura 9a é possível visualizar a resposta da válvula distribuidora (degrau de 10 segundos) e a resposta do servo-motor na Figura 9b (degrau de 20 segundos).

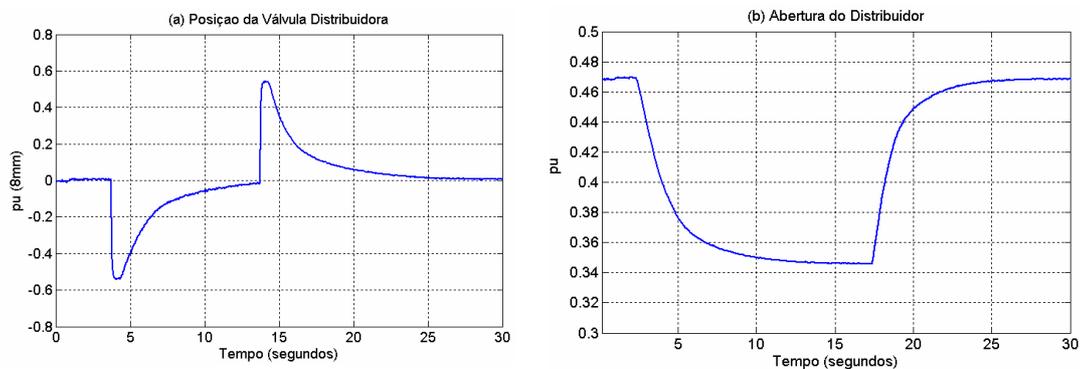


Figura 9 – Resposta ao degrau medida em campo, (a) posição do distribuidor e (b) posição da válvula distribuidora.

Através da Figura 9(b), percebe-se que a constante de tempo do sistema é de aproximadamente 6,5 segundos (considerando-se o tempo de assentamento com tolerância de $\pm 2\%$).

3.2 Projeto e Aplicação da SBPA

Com o intuito de extrair informação dinâmica da planta, é injetada na entrada do sistema uma SBPA, projetada para excitar o sistema em uma faixa de frequências de interesse. A SBPA é formada por pulsos retangulares, gerada através de um registrador de deslocamento com N células, que a cada período T_b atualiza a saída com uma nova amostra da seqüência pseudo-aleatória [4]. Para identificar corretamente a dinâmica e o ganho em regime permanente do sistema, o pulso de maior duração da SBPA deve ser maior do que o tempo de subida da planta (T_r). Sendo o maior pulso definido por $N \cdot T_b$, a seguinte condição é necessária [5]:

$$NT_b > T_r \quad (1)$$

O tempo de subida medido em campo (Figura 9a) do atuador hidráulico operando em malha fechada é de aproximadamente 3,6 segundos. Desta forma, a SBPA foi configurada com $T_b = 0,4$ s e $N = 11$, resultando em um pulso de duração máxima de 4,4 segundos. Os pares de dados foram coletados com um período de amostragem de 50 ms. A Figura 10 ilustra os sinais de entrada e saída adquiridos.

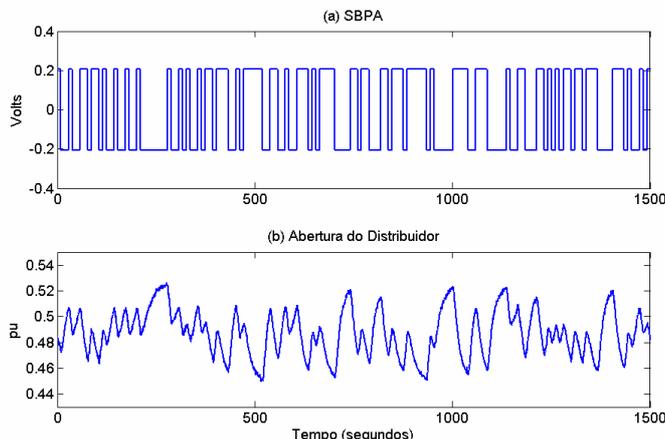


Figura 10 – Sinal de excitação SBPA (a) e resposta do sistema através do sinal de abertura do distribuidor (b).

4.0 - ESTIMAÇÃO DE MODELOS PARAMÉTRICOS

O primeiro modelo estimado para o sistema foi obtido com os dados coletados em campo, onde a malha do estatismo permanente estava fechada. De posse deste modelo, é possível cancelar a ação da realimentação, através da inclusão de uma malha de realimentação de sinal contrário, resultando apenas no sistema hidráulico de atuação. Nesta situação, onde o efeito dinâmico da malha de realimentação do estatismo permanente foi compensado no modelo, foi possível estimar um modelo para representar apenas a dinâmica do sistema hidráulico.

4.1 Estimativa do modelo do sistema em malha-fechada

O modelo paramétrico estimado para o sistema no ponto de operação considerado foi obtido através de um algoritmo de mínimos quadrados não recursivo, que se baseia na minimização da soma dos quadrados do erro de predição, entre a saída do modelo estimado e a saída da planta. A estrutura escolhida para o modelo linear é do tipo ARX de tempo discreto na forma [6]:

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (2)$$

onde $u(t)$ e $y(t)$ são os respectivos sinais de entrada e saída, d é o atraso de transporte discreto, $e(t)$ é o erro de modelagem e $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ são polinômios na forma:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{nA}q^{-nA} \quad (3)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nB}q^{-nB} \quad (4)$$

onde n é a ordem do modelo e a_n e b_n são os parâmetros a serem estimados pelo algoritmo de mínimos quadrados.

Após análise dos modelos estimados, optou-se por uma estrutura com modelo ARX de segunda ordem, que foi estimado com uma taxa de amostragem de 50 ms. A Tabela 1 ilustra os parâmetros do modelo estimado.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros do modelo do sistema em malha-fechada ($T_s = 0,15$ segundos).

Parâmetro	a1	a2	b1
Valor	-1.5661	0.6041	0.0625

4.2 Estimativa do modelo do sistema em malha-aberta

Assim como pode ser ilustrado na Etapa 2 da Figura 7, o modelo estimado do sistema em malha-fechada (Tabela 1) foi compensado com uma malha de estatismo permanente adicional, porém com sinal contrário à malha real do sistema, de maneira que se o modelo discreto estimado representar adequadamente a dinâmica da planta, exista um cancelamento do efeito da realimentação do estatismo permanente. A Tabela 2 apresenta os parâmetros do modelo discreto ARX de 2ª ordem estimado para o sistema hidráulico.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros do modelo do sistema em malha-aberta ($T_s = 0,15$ segundos).

Parâmetro	a1	a2	b1
Valor	-1.7224	0.7225	0.0283

5.0 - VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo paramétrico estimado para o sistema hidráulico foi validado através da comparação da resposta do modelo com dados adquiridos em campo na UHE de Tucuruí, durante ensaios onde a UGH estava parada (ensaio de “água morta”) e também rodando a vazio (sem carga e desconectada da rede).

5.1 Teste de validação com a máquina parada

A resposta do modelo paramétrico estimado para o sistema foi validado comparando-se com dados coletados em campo durante a aplicação de uma perturbação degrau. Percebe-se que o modelo representou de forma adequada a dinâmica do sistema de atuação hidráulico.

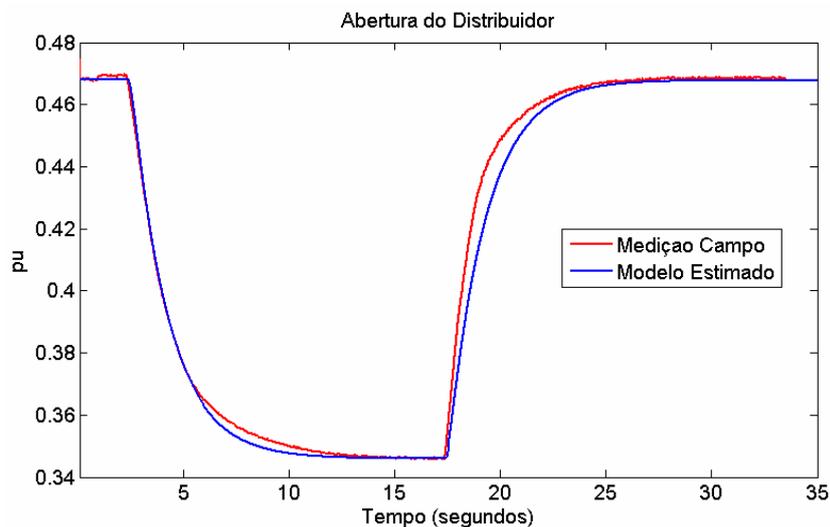


Figura 11 – Comparação entre a saída do modelo estimado e os dados medidos em campo.

5.2 Teste de validação com a máquina rodando a vazio

O modelo do sistema hidráulico também foi validado com dados adquiridos em campo com a máquina rodando a vazio (não gerando potência). Para a realização da simulação da máquina rodando a vazio utilizando o modelo do

sistema hidráulico identificado, utilizou-se um modelo não-linear de turbina [2], [3]. A Figura 12 ilustra a resposta ao degrau do sistema, comparando o sinal de velocidade medido em campo e o simulado com o modelo estimado.

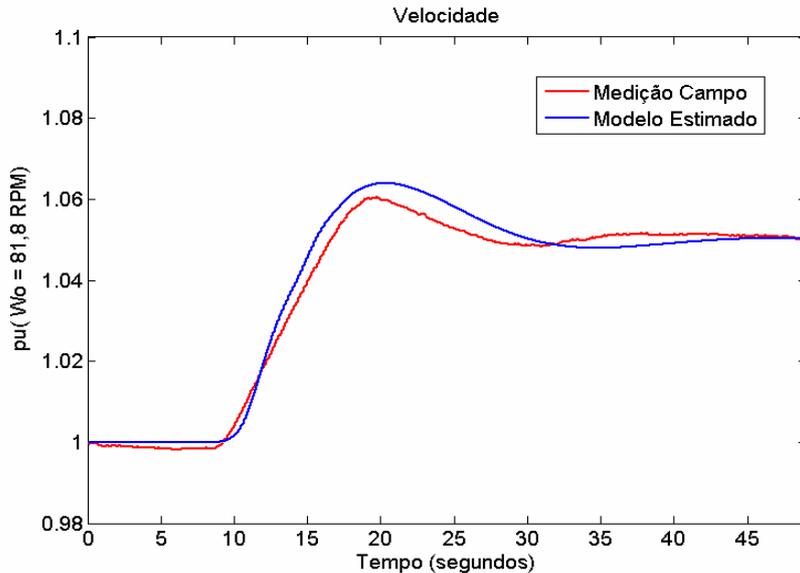


Figura 12 - Comparação entre a saída do modelo estimado e os dados medidos em campo para ensaios da máquina a vazio.

6.0 - CONCLUSÃO

De acordo com os resultados dos testes experimentais em campo apresentados neste trabalho, foi possível identificar modelos paramétricos lineares para o sistema de atuação hidráulico do regulador de velocidade das UGHs da 1ª Casa de Força da UHE de Tucuruí. Estes modelos são de grande utilidade para a simulação e ajustes do regulador de velocidade.

O processo de modelagem de sistemas através de ensaios práticos utilizado neste trabalho, pode ser aplicado à outros tipos sistemas onde haja uma correlação entre os dados de entrada e saída.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio recebido da Eletronorte, através do projeto "Implementação de um Regulador de Velocidade Digital Piloto, com Capacidade de Adaptação e Integrado ao Sistema de Supervisão e Controle Digital do Centro de Operações da UHE Tucuruí", assim como a Equipe da Eletronorte de Tucuruí, pelo apoio logístico recebido durante os trabalhos de campo.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Jelali, M. and Kroll, A. - **Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control** – Springer, 2004.
- (2) Kundur, P. – **Power System Stability and Control** – McGraw-Hill, 1994.
- (3) Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies - **Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies**, Transactions on Power Systems, Vol 7, No 1, 1992.
- (4) Aguirre, L.A. - **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais** – Editora UFMG, Belo Horizonte, 2000.

- (5) Landau, I.D. & Zito, G. - **Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation** – Springer, 2006.
- (6) Åstrom, K. J. and Wittenmark, B. - **Computer Controlled Systems: Theory and Design** - Prentice-Hall, 1997.