

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE CALDEIRA PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA DE CENTRAIS TERMELÉTRICAS A VAPOR¹

José Leandro Félix Salles²
Valter Barbosa de Oliveira Junior³

Resumo

Sabe-se que a modelagem matemática (física) de um sistema apresenta vantagens em relação a outros tipos de modelagem por considerar a aplicação de leis físicas e dados construtivos (parâmetros) do sistema, reduzindo a necessidade de realização de testes para estimação de parâmetros, como normalmente ocorre em outras técnicas de modelagem. Entretanto, qualquer que seja o modelo proposto, este normalmente irá capturar apenas algumas características do sistema modelado, conforme sua complexidade. O objetivo deste artigo é apresentar os resultados de testes de vários modelos matemáticos de caldeira de circulação natural e respectivas comparações a dados reais, visando fornecer subsídios para escolha destes modelos em aplicações de simulação dinâmica e de controle de processo de uma central termelétrica a vapor.

Palavras-chave: Modelagem; Dinâmica; Centrais termelétricas; Controle de processo.

EVALUATION OF WATER TUBE NATURAL CIRCULATION BOILER MODELS FOR STEAM POWER PLANT DYNAMIC SIMULATION

Abstract

It is known that the mathematical (physic) modeling of a system has advantages over other types of modeling because the physical laws and constructive data (parameters) of the system are applied in this case, reducing the need for tests to estimate parameters, as normally occurs in other modeling techniques. However, whatever the model proposed, this will usually capture only some features of the modeled system, as its complexity. The aim of this paper is to present the results of various mathematical models tests of water tube natural circulation boiler and thus provide information for choosing these models in applications of dynamic simulation and process control of a steam power plant.

Key words: Modeling; Dynamic; Steam power plant; Process control.

¹ Contribuição técnica ao 15º Seminário de Automação e TI Industrial, 20 a 22 de setembro de 2011, São Paulo, SP.

² Doutor em Engenharia Elétrica, Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo).

³ Mestre em Engenharia Elétrica, Especialista de Automação da ArcelorMittal Brasil (unidade ArcelorMittal Tubarão).

1 INTRODUÇÃO

A representação de componentes de centrais termelétricas em modelos matemáticos possibilita ao engenheiro de controle conhecer previamente o comportamento dinâmico da planta, analisar a sua estabilidade e projetar o sistema de controle em conformidade com os requisitos a serem atendidos. Os modelos possibilitam o desenvolvimento de simuladores que auxiliem no ajuste dos melhores parâmetros de controle para obter o melhor desempenho técnico e econômico da planta e também podem ser utilizados para treinamento de operadores.

A modelagem matemática traz em sua estrutura a aplicação de parâmetros físicos (dados construtivos) da planta, o que minimiza a necessidade da realização de testes para estimação de parâmetros, como normalmente ocorre em outras técnicas de modelagem. Conforme ratificado por Kim e Kwon,⁽¹⁾ na modelagem matemática, cada parâmetro e variável tem significado físico e, portanto, o sistema pode ser avaliado com segurança. Entretanto, qualquer que seja o modelo proposto, este normalmente irá capturar apenas algumas características do sistema modelado, pois geralmente a qualidade do mesmo é dependente de fatores diversos, tais como: simplificações físicas; correspondência entre os parâmetros físicos reais e os parâmetros aplicados nos modelos; e complexidade do sistema.

Levando em conta as considerações acima, Salles e Oliveira Junior^(2,3) realizaram o estudo de vários modelos matemáticos de equipamentos de centrais termelétricas, propostos por diversos autores, visando simular computacionalmente as principais dinâmicas do circuito de vapor e da conversão da energia mecânica em energia elétrica de uma central termelétrica. Este estudo não se limitou a simulação em computador, mas também incluiu a coleta de dados de uma planta real para avaliação e comparação das respostas geradas pelos modelos. Uma breve descrição dos modelos de caldeira tratados por Salles e Oliveira Junior é realizada a seguir. Os resultados das avaliações destes modelos a dados reais possibilitam aos interessados neste assunto ter uma visão geral sobre a qualidade destes modelos e suas limitações. Por essas razões, este artigo aborda a apresentação e a análise crítica destes resultados.

2 MODELOS CONSIDERADOS

Os modelos considerados são aplicáveis a caldeiras aquatubulares com tubulão de vapor e circulação natural, normalmente utilizadas em centrais termelétricas a vapor de ciclo simples, que utilizam turbina a vapor.

Devido à amplitude do tema, não há pretensão de explorar neste texto a formulação das equações dos modelos, mas sim apresentar uma avaliação de resultados obtidos com os mesmos. Para informações sobre as equações dos modelos e de seus parâmetros, recomenda-se fortemente a leitura dos textos citados nas referências bibliográficas.

Os modelos considerados foram elaborados objetivando a representação consistente das respostas dinâmicas da pressão de vapor e o nível do tubulão, que são variáveis consideradas como de maior relevância no controle de uma caldeira.

Foram estudados modelos de 1ª, 2ª, 3ª e 4ª ordem, propostos por diversos autores, cada um contemplando a representação de determinadas variáveis de estado, conforme a seguir:

- modelo de 1ª ordem: dinâmicas de pressão (simplificação do modelo de 2ª ordem), por Åström, Karl e Bell;⁽⁴⁾
- modelo de 2ª ordem: dinâmicas de pressão e volume de água total, por Åström, Karl e Bell⁽⁴⁾ e Eborn;⁽⁵⁾
- modelo de 2ª ordem: dinâmicas de pressão e de nível de água no tubulão de vapor, por Changliang et al.,⁽⁶⁾ adaptado por Oliveira Junior;⁽³⁾
- modelo de 3ª ordem: dinâmicas de pressão, volume de água e fração mássica do vapor contido na água líquida do tubulão de vapor, por Kim e Kwon;⁽¹⁾ e
- modelo de 4ª ordem: dinâmicas de volume de água total, pressão, volume de vapor e fração mássica do vapor contido na água líquida do tubulão de vapor, por Åström, Karl e Bell.⁽⁴⁾

A geometria e o esquema de fluxo de uma caldeira são bastante complexos. Além disso, devido à grande acumulação de massa de água no interior da caldeira, o valor de sua constante de tempo normalmente é elevado, estabelecendo, dessa maneira, uma influência significativa sobre a resposta dinâmica dos demais equipamentos que compõem o ciclo de uma central termelétrica. Por este motivo, é importante o conhecimento de modelos de caldeira que forneçam respostas consistentes, considerando a utilização dos mesmos em aplicações de simulação dinâmica.

3 AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Para avaliação da qualidade dos modelos, foram utilizados dados reais obtidos de uma central termelétrica, com capacidade de geração de 75 MW, pertencente à ArcelorMittal Tubarão. Esta usina siderúrgica possui geração própria de energia elétrica e realiza o reaproveitamento de subprodutos gerados nos processos produtivos, utilizando os mesmos como combustíveis para geração de energia em seis centrais termelétricas.

Para comparação, os modelos citados na seção anterior foram implementados no programa MATLAB®¹ com os parâmetros da central termelétrica nº 3 (CTE #3) da ArcelorMittal Tubarão. O registro das variáveis da planta foi obtido a partir do SDCD² existente, utilizando um servidor OPC³ também existente. As saídas dos modelos foram geradas a partir das variáveis de entrada da planta, que foram utilizadas para alimentar os modelos. O percentual de ajuste dos modelos aos dados reais foi calculado utilizando a função *compare* do programa MATLAB®, que além de apresentar os gráficos dos vários modelos simultaneamente, determina o percentual de ajuste de cada modelo aos dados medidos por meio da seguinte expressão:

$$fit = 100 \frac{1 - norma(y_h - y)}{norma(y - média(y))}$$

Onde: *fit* é o percentual de ajuste apurado; y_h é a saída obtida do modelo e y é a saída medida do processo real.

¹ MATLAB (MATrix LABoratory) é um software interativo voltado para o cálculo numérico.

² SDCD: sistema digital de controle distribuído (termo em inglês: DCS - *distributed control system*).

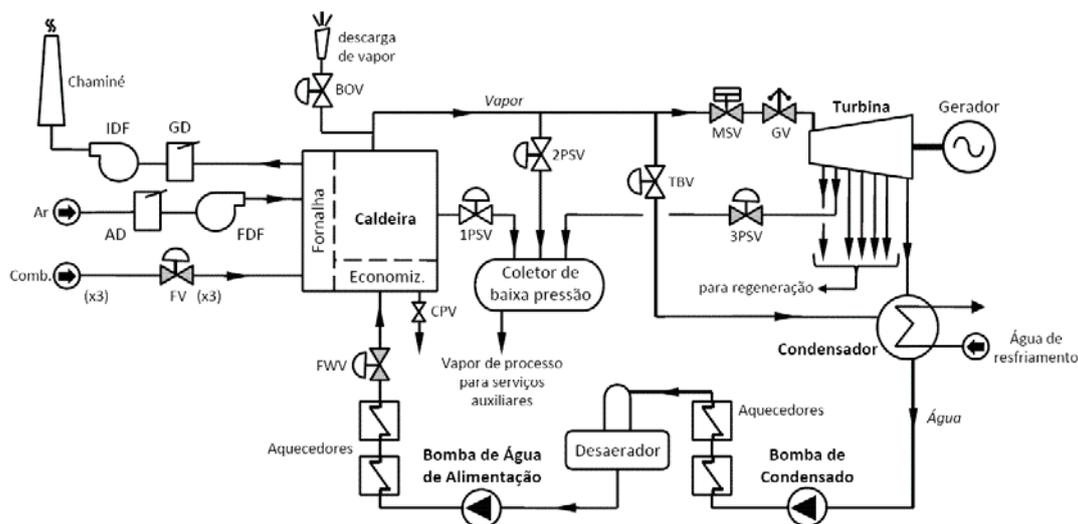
³ OPC: *OLE for process control* - sistema informatizado para comunicação de dados entre equipamentos de fabricantes diferentes.

3.1 Condições de Operação e Parâmetros

No anexo deste artigo são apresentados os dados básicos de operação registrados na época da coleta de dados e os parâmetros físicos e construtivos da CTE #3 utilizados para a simulação e avaliação dos modelos a partir dos dados reais medidos. Estes parâmetros podem ser utilizados por aqueles que estejam interessados em implementar simulação utilizando os modelos citados, para fins de estudo ou reprodução de resultados similares aos obtidos neste trabalho. Alguns destes parâmetros foram obtidos diretamente a partir de dados de projeto construtivo da caldeira. Outros parâmetros, não disponíveis de forma direta, foram calculados a partir de desenhos de montagem e dados de manuais de manutenção. Uma diferença existente na caldeira da CTE #3 em relação à caldeira modelada por Åström e Bell⁽⁴⁾ é que a caldeira da CTE #3 possui tubulão de água (volume V_{dw}) e o volume do economizador (V_{eco}) foi incluído para compor o volume total de água, pois a medição de vazão existente se encontra antes do economizador da caldeira. Portanto, o volume total da caldeira CTE #3 foi redefinido em relação ao modelo de Åström e Bell. Outra diferença existente é que a caldeira da CTE #3 dispõe de três tipos de combustíveis para queima: (1) gás de alto-forno (BFG); (2) gás de coqueria (COG); e (3) alcatrão (TAR).

3.2 Coleta de Dados Reais para Avaliação

Para coleta de dados da CTE #3 foi necessário elaborar um plano de trabalho para colocar a planta em condições favoráveis, de maneira que os dados pudessem ser utilizados apropriadamente na avaliação dos modelos. Como qualquer outra planta similar, a CTE #3 possui válvulas de alívio de pressão, válvulas de purga, válvulas de segurança, válvulas de desvio (*by pass*) de vapor e derivações na tubulação principal de vapor para suprimento de *vapor de processo* a equipamentos auxiliares.



Legenda:

AD: damper ou regulador de ar (air damper)
GD: damper ou regulador de gás de chaminé (flue gas damper)
FDF: ventilador de tiragem forçada (forced draft fan)
IDF: ventilador de tiragem induzida (induced draft fan)
FV: válvula de combustível (fuel valve)
FWV: válvula de água de alimentação (feed water valve)
CPV: válvula de purga contínua (continuous purge valve)

BOV: válvula de descarga (alívio) para a atmosfera (blow-off valve)
MSV: válvula de bloqueio principal (main stop valve)
GV: válvula reguladora de vapor ou governadora (governor valve)
TBV: válvula de desvio de vapor da turbina (turbine by pass valve)
1PSV: válvula de vapor de processo nº 1 (#1 process steam valve)
2PSV: válvula de vapor de processo nº 2 (#2 process steam valve)
3PSV: válvula de vapor de processo nº 3 (#3 process steam valve)

Figura 1. Fluxograma básico da Central Termelétrica nº 3 da ArcelorMittal Tubarão.

Todos estes itens correspondem a pontos de saída de vapor do sistema, entretanto, não medidos. Juntamente com o pessoal de Operação e Manutenção da central termelétrica foram avaliadas as medidas necessárias para reduzir ao mínimo os consumos não medidos de vapor, de forma a possibilitar a utilização dos dados medidos na avaliação dos modelos. Para melhor compreensão, a Figura 1 apresenta um fluxograma básico da CTE #3.

No plano de trabalho foi prevista a aplicação de variação em degrau em duas variáveis de entrada em dois momentos distintos, com o controlador de pressão e de nível da caldeira (ambos) em manual. Primeiramente, uma variação na vazão de combustível, para variar a quantidade de calor fornecida à caldeira (\dot{Q}); e após um intervalo de tempo de aproximadamente 45 minutos (tempo combinado com a Operação para estabilização do processo), foi prevista a aplicação de variação na vazão de vapor (q_s). Entretanto, devido a variações provocadas no consumo de *vapor de processo* durante os testes (consumo não medido), os dados referentes à variação de vazão de vapor ficaram inconsistentes. Portanto, este segundo conjunto de dados foi descartado.

3.3 Avaliação dos Modelos

Para avaliação dos modelos as vazões de água e de vapor foram mantidas aproximadamente constantes e após determinado intervalo de tempo foi provocada uma variação na vazão de um dos combustíveis, equivalente a uma variação de potência térmica de 1,5 MW. As variáveis de entrada e de saída obtidas da planta são mostradas na Figura 2. Alguns distúrbios nas variáveis de entrada (não previstos no plano de trabalho) foram inevitáveis devido à necessidade de intervenção momentânea do operador.

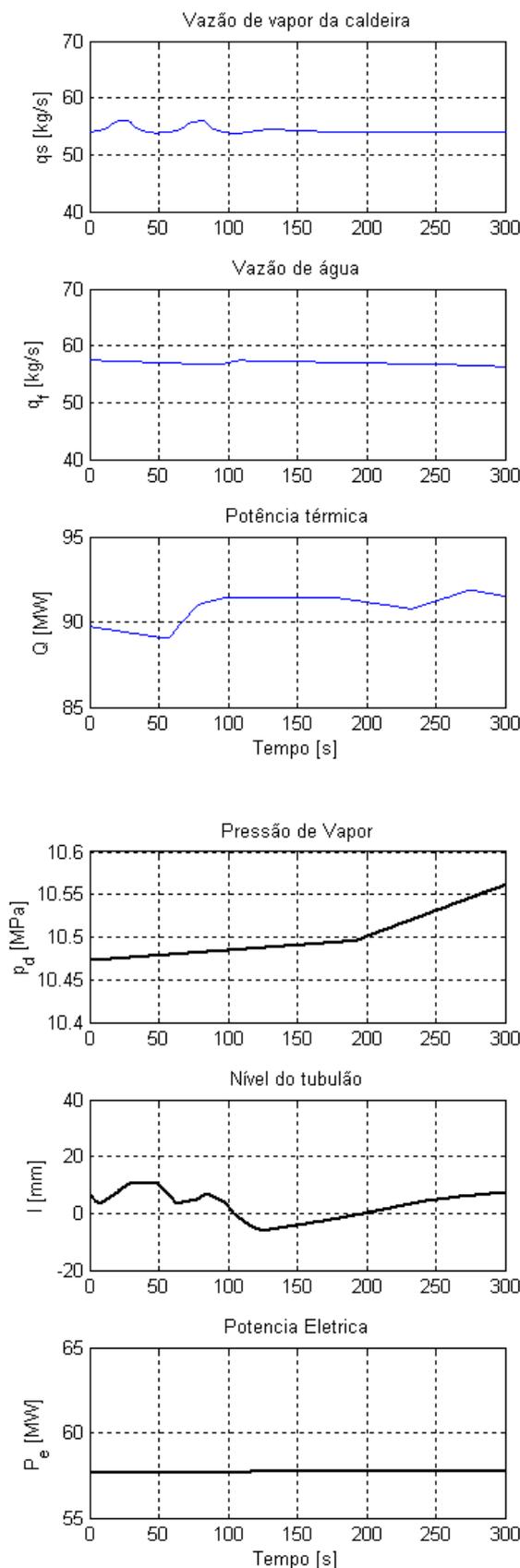


Figura 2. Resposta real da caldeira (CTE #3) a um aumento de 1,5 MW na taxa de suprimento de calor. Nos gráficos, q_t , q_s e Q são entradas e p_d , l e P_e são saídas medidas.

As variáveis de entrada medidas foram aplicadas aos modelos. Como resultado, saídas foram geradas a partir dos modelos para comparação com as saídas medidas da planta real. A resposta dinâmica dos modelos e o percentual de ajuste de cada modelo aos dados reais são apresentados nas Figuras 3 e 4.

Observa-se na Figura 3 que os modelos não lineares (penas nº 2, 4 e 6) produziram uma resposta dinâmica muito próxima da resposta real da planta para todo o intervalo de tempo considerado (5 minutos), com percentuais de ajuste superiores a 90%. Entretanto, os modelos lineares (penas nº 3 e 5) produziram respostas satisfatórias apenas durante os primeiros 20 segundos.

Para a resposta dinâmica do nível do tubulão (Figura 4), o modelo de 4ª ordem apresentou melhor resultado, com 73,26% de ajuste em relação aos dados reais. As respostas dos demais modelos foram divergindo ao longo do tempo em relação à resposta dinâmica real.

Considerando que os modelos propostos podem ser utilizados para finalidade de predição, sugere-se que a análise da resposta dinâmica também seja feita em um horizonte de tempo menor (Figura 5), que apresenta o resultado da simulação do nível do tubulão para intervalo de tempo de 2 minutos. Neste caso, os modelos não lineares de 3ª e de 4ª ordem se aproximam relativamente bem da resposta real, com percentuais de ajuste de 40,41% e 56,14%, respectivamente. Na seqüência, o modelo linear de 4ª ordem obteve percentual de ajuste de 34,1% (bem pior que na simulação anterior). O modelo linear de 3ª divergiu rapidamente ao longo do tempo em relação aos dados reais. Contudo, o modelo não linear de 2ª ordem se aproximou relativamente bem da resposta real durante os primeiros 25 segundos, instante a partir do qual sua resposta começou a se afastar progressivamente da resposta real medida.

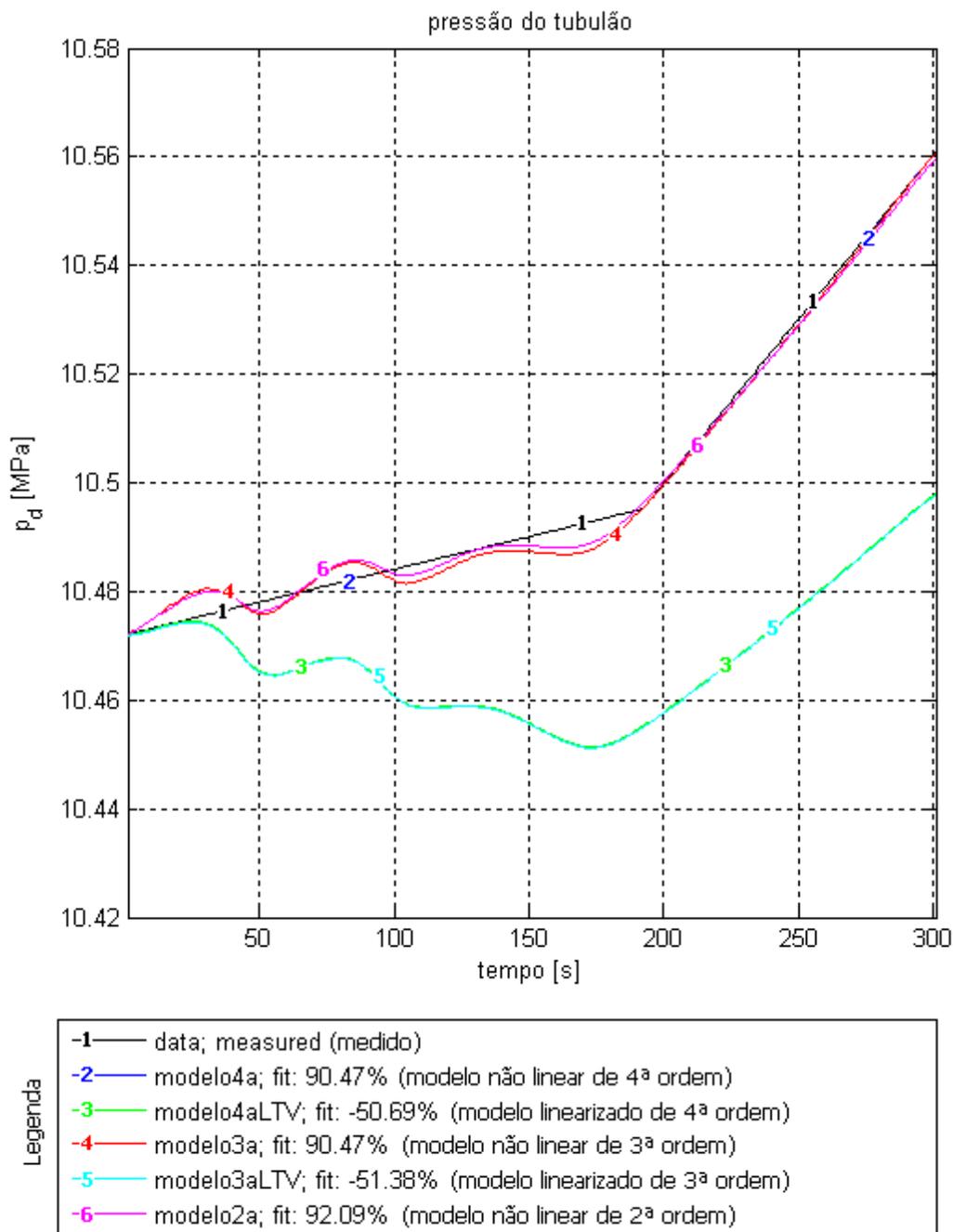


Figura 3. Respostas simuladas a partir dos modelos e resposta real da pressão do tubulão.

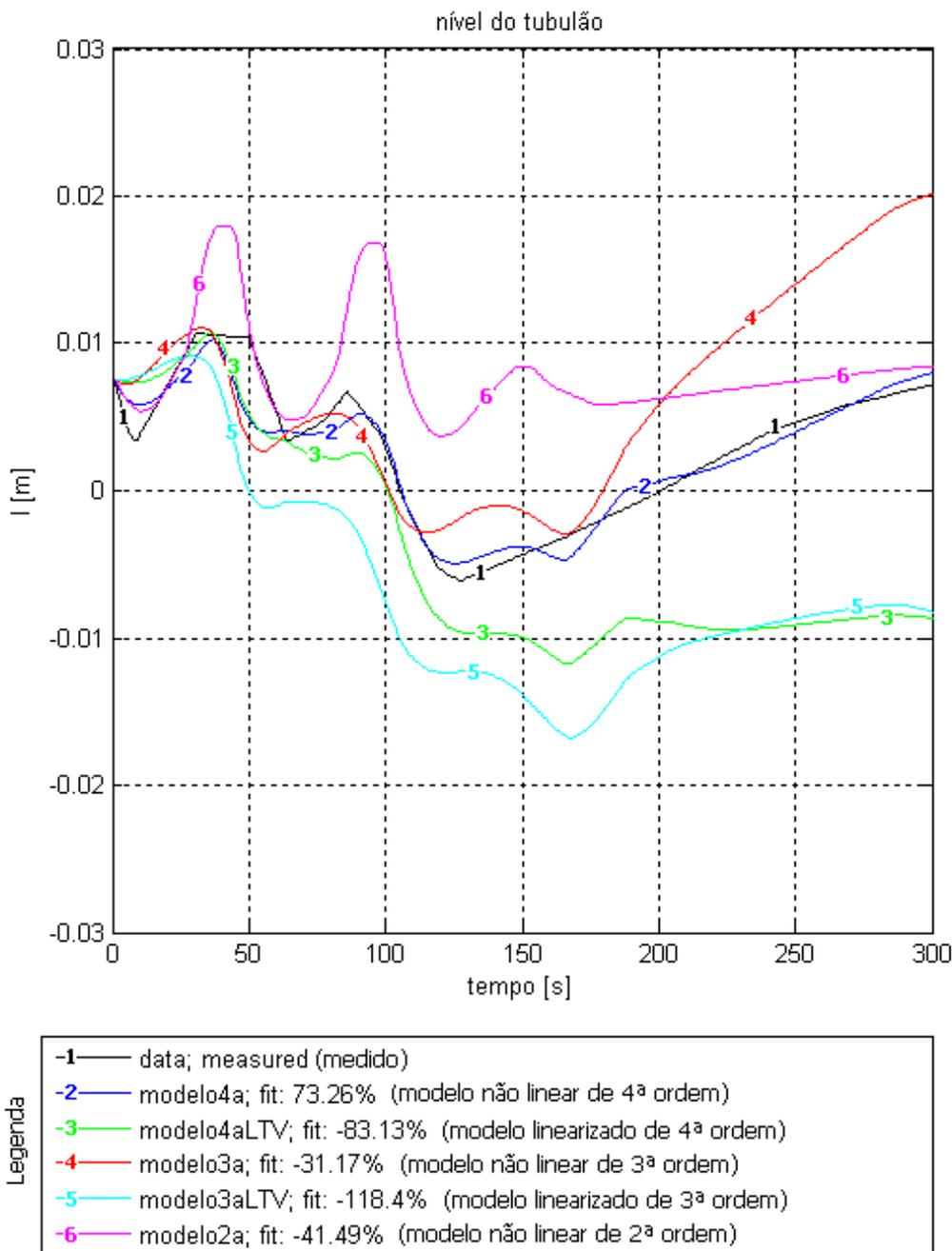


Figura 4. Respostas simuladas a partir dos modelos e resposta real do nível do tubulão da caldeira.

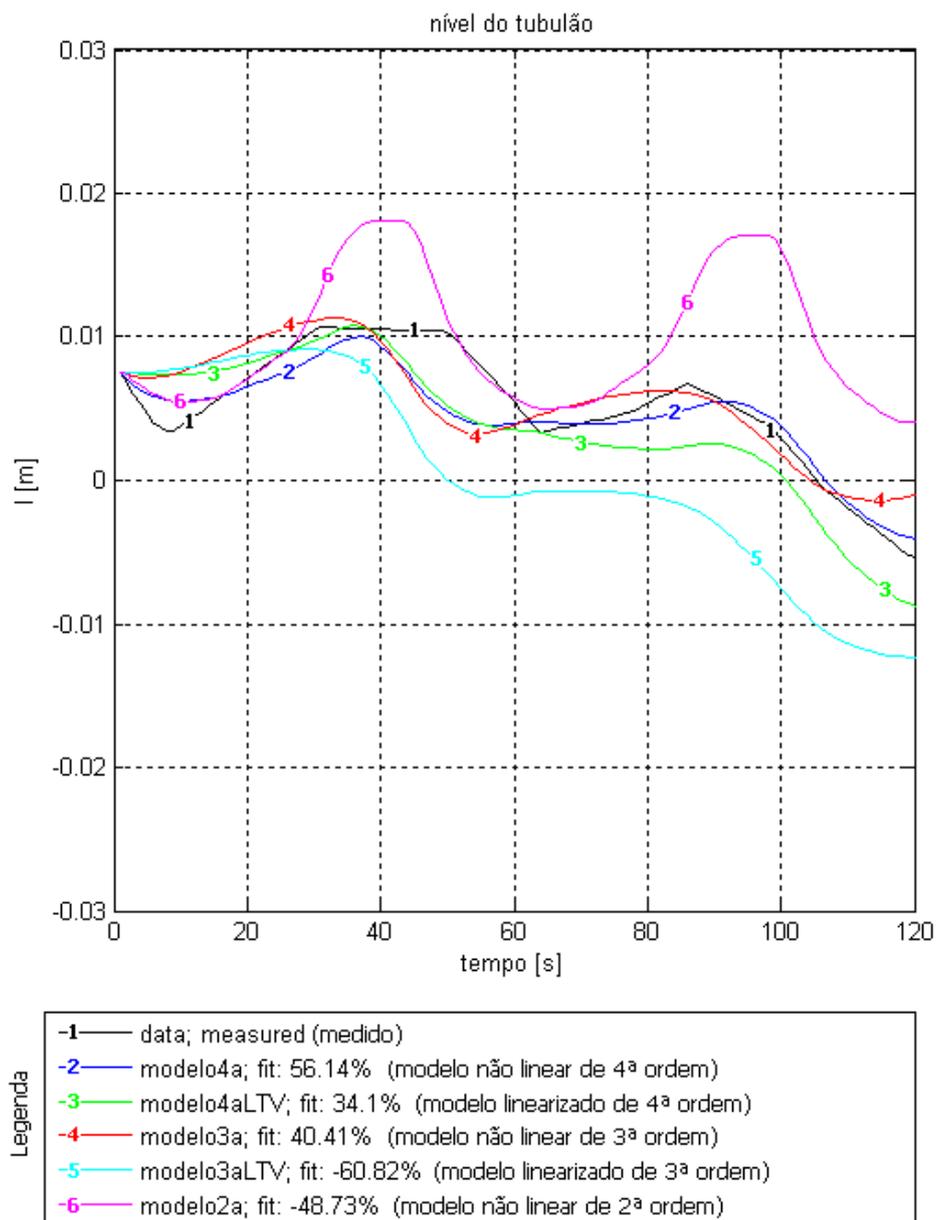


Figura 5. Resposta de nível do tubulão da caldeira para um intervalo de tempo de 2 minutos.

4 COMENTÁRIOS GERAIS E CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta primeira avaliação dos modelos revelam que os modelos não lineares propostos para pressão do tubulão da caldeira podem representar de forma satisfatória a resposta dinâmica desta variável. Por outro lado, dentre os modelos estudados, apenas o modelo não linear de 4ª ordem forneceu respostas consistentes para o nível do tubulão da caldeira.

Quanto aos modelos linearizados de modo geral, os mesmos produziram respostas grosseiras para o nível do tubulão, que podem ser consideradas boas para intervalos de tempo bem limitados. Como preditores, pode-se supor que o horizonte de predição confiável dos mesmos se encontra limitado a valores próximos de dez a quinze segundos.

Os modelos não lineares de 3ª e 4ª ordem apresentaram respostas de pressão similares. Por outro lado, o modelo não linear de 4ª ordem apresenta uma boa resposta dinâmica para o nível do tubulão, mesmo para horizontes de tempo maiores (avaliado em até 300 segundos).

Eborn e Sørli⁽⁷⁾ desenvolveram estudos sobre os modelos de caldeira de terceira e de quarta ordem propostos por Åström e Bell em artigos publicados em 1988, 1993 e 1996. Eles utilizaram teste de hipótese estatística para análise dos modelos. Estes estudos comprovaram conclusivamente que o modelo de quarta ordem representa bem as dinâmicas de pressão e de nível do tubulão da caldeira. Segundo Åström, Karlve Bell,⁽⁴⁾ o desenvolvimento de modelos de quinta ordem, com representação mais detalhada do tubulão, revelou que o aumento da complexidade não produz melhoria significativa em relação ao modelo de 4ª ordem da caldeira.

A comparação das saídas dos modelos com os dados reais possibilitou identificar a representatividade das respostas de cada modelo em relação a um sistema real, por meio da avaliação quantitativa e qualitativa das respostas obtidas. Todavia, para o momento, vale ressaltar que da forma que este trabalho foi desenvolvido, utilizando apenas um conjunto de dados, os resultados apurados devem ser considerados apenas como um retrato de uma situação específica, no qual foram apurados os resultados dos modelos. Para validação dos modelos, outros conjuntos de dados deverão ser coletados e novos estudos deverão ser realizados a fim de confirmar o desempenho dos mesmos em circunstâncias diversas.

Em síntese, a avaliação dos modelos possibilitou a constatação de características específicas e a produção de dados que poderão subsidiar, no futuro, a escolha de cada modelo em aplicações específicas, por profissionais da área de automação e controle de processo.

Agradecimentos

Agradecimentos à ArcelorMittal Tubarão (Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST), que apoiou o desenvolvimento deste trabalho. Agradecimentos também aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelas orientações fornecidas, que contribuíram significativamente para o alcance dos resultados obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 KIM, TAE-SHIN; KWON, OH-KYU. A Study on Power Plant Modeling for Control System Design. International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeongju, 2003, ICCAS2003, p. 1449-1454.
- 2 OLIVEIRA JUNIOR, VALTER B.; SALLES, JOSÉ L. F. Modelagem de Central Termelétrica a Vapor para Simulação Dinâmica. XVII Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, 2008, CBA2008.
- 3 OLIVEIRA JUNIOR, VALTER B. Modelagem de Central Termelétrica a Vapor para Simulação Dinâmica. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- 4 ÅSTRÖM, KARL J.; BELL, ROD D. Drum-Boiler Dynamics. Automatica, 2000, 36(2000): p. 363-378.
- 5 EBORN, JONAS. On Model Libraries for Thermo-hydraulic Applications. Lund: Bloms i Lund Tryckeri AB, 2001.
- 6 CHANGLIANG, LIU; JIZHEN, LIU; YUGUANG, NIU; WEIPING, LIANG. Nonlinear Boiler Model of 300 MW Power Unit for System Dynamic Performance Studies. Proceedinds of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Pusan, 2001. vol. 2, p. 1296-1300.
- 7 EBORN, J.; SØRLIE, J. (1997). Parameter optimization of a non-linear boiler model. In Sydow, 15th IMACS world congress, Berlin, Germany: W & T Verlag. vol. 5, pp. 725-730.

ANEXO

Apresenta-se a seguir, para informação, as condições de operação e parâmetros aplicados nos modelos para a validação dos mesmos. Estes dados podem ser úteis para aplicação em outros modelos não comentados neste artigo. Na Tabela 1, $P_e(0)$ é a potência elétrica gerada; p_d é a pressão do tubulão de vapor; T_{ss}^* é a temperatura do superaquecedor secundário na condição de projeto; T_f^* é a temperatura da água de alimentação na condição de projeto; q_{h1} , q_{h2} e q_{h3} são, respectivamente, as vazões dos combustíveis BFG (gás de alto forno), COG (gás de coqueria) e alcatrão (óleo combustível); V_d é o volume do tubulão de vapor; V_r é o volume total dos tubos de subida; V_{dc} é o volume total dos tubos de descida (*downcomers*); V_{dw} é o volume de água líquida no tubulão de vapor; V_{eco} é o volume do economizador; m_t é a massa metálica total; m_r é a massa dos tubos de subida; m_d é a massa do tubulão de vapor; T_d é o tempo de residência do vapor no tubulão de vapor; A_d é a área da superfície da água no nível de operação do tubulão; A_{dc} é a área da seção transversal de um tubo de descida; c_m é o calor específico do metal.

Tabela 1. Resumo de parâmetros da central termelétrica nº 3

Condições de Operação		Parâmetros da Caldeira		
$P_e(0)$	57,65 MW	V_d	15	m ³
$p_d(0)$	10,47 MPa	V_r	33,8	m ³
T_{ss}^*	543,0 °C	V_{dc}	49,3	m ³
T_f^*	265,9 °C	V_{dw}	5,8	m ³
$q_{h1}(0)$	44,794 m ³ /s	V_{eco}	19,5	m ³
$q_{h2}(0)$	1,456 m ³ /s	m_t	351600	kg
$q_{h3}(0)$	0,000 kg/s	m_r	80000	kg
		m_d	48660	kg
		T_d	17	s
		A_d	9,9584	m ²
		A_{dc}	0,7349	m ²
		c_m	0,560	kJ/(kg °C)