

# SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO, PARTIDA E PARADA DE UM TUBULÃO DE VAPOR

Tomás Suginoshita Quirino

GT2 Energia – Tel.: +55 (21) 3733-4167

tomas.quirino@gt2.com.br

## 1. Introdução

O tubulão de vapor é um componente de interesse no projeto e na simulação de uma caldeira de recuperação de calor (*HRSG – Heat Recovery Steam Generator*), equipamento presente em plantas de ciclo combinado para o reaproveitamento do calor de rejeito de turbinas a gás. O tubulão atua como um separador das fases líquido e vapor dentro da caldeira, recebendo a água de alimentação proveniente dos economizadores e armazenando o vapor gerado na evaporação, que segue para os superaquecedores da caldeira e para a turbina a vapor. O esquema da Figura 1 mostra como o tubulão se insere dentro de uma planta de ciclo combinado.

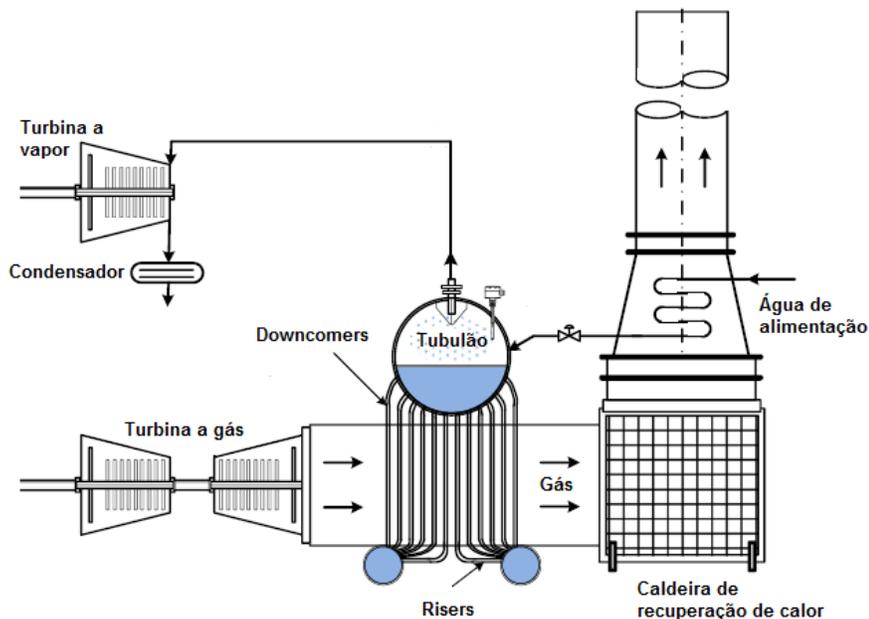


Figura 1 - Esquema representativo de um tubulão de vapor dentro de uma planta de ciclo combinado (adaptado de [1]).

O nível de líquido armazenado no tubulão é um parâmetro que costuma ser monitorado pelo sistema de controle de usinas de ciclo combinado, visando à operação segura da planta. A operação do tubulão fora dos limites de nível especificados pelo fabricante pode provocar o carregamento (*carryover*) de água para o superaquecedor, no caso de um nível muito alto, ou o superaquecimento das paredes das tubulações de água, no caso de um nível demasiadamente baixo [2]. A simulação de um tubulão de vapor possibilita a previsão de seu comportamento dinâmico, incluindo diferentes patamares de operação e condições anômalas, tais como o *carryover* ou o superaquecimento das tubulações, sem que seja necessário submeter o equipamento real a tais condições, servindo de auxílio para a verificação de projetos e para o treinamento de operadores de usinas de ciclo combinado.

Este artigo tem como objetivo fazer uma breve descrição e apresentação dos resultados da metodologia elaborada para simular um tubulão de vapor existente em uma planta de ciclo combinado. A simulação contempla a operação do tubulão no cenário de carga base e os procedimentos de partida a frio do tubulão até a operação na carga base e parada do sistema. O modelo matemático aplicado à resolução de tal problema é formulado de maneira genérica e se baseia em princípios físicos conhecidos e em correlações e hipóteses encontradas na literatura.

## 2. Metodologia

A modelagem do tubulão de vapor compreende duas linhas de ação essenciais: a definição de um modelo matemático e a implementação de um modelo computacional correspondente.

Para simular o comportamento dinâmico de um tubulão, deve-se escolher um modelo matemático capaz de representar os processos físicos que ocorrem em seu interior, o que inclui a análise do líquido acumulado internamente, da mistura de ar e vapor armazenados e do vapor que se mantém sob a superfície do líquido, devido à formação de bolhas à medida em que o líquido sofre evaporação. A formação e a condensação de vapor abaixo da linha d'água provocam um fenômeno conhecido como *shrink and swell* (encolhimento e inchaço), que é a oscilação no nível de líquido durante mudanças na pressão interna do equipamento. [2]

Na literatura, são encontradas diversas estratégias para a modelagem de tubulões, incluindo modelos de simulação computacional com aproximação de equações diferenciais parciais por elementos finitos, que são precisos e úteis para o projeto de tubulões, porém menos aplicáveis ao propósito de simulação em tempo real devido à sua maior complexidade. O modelo matemático aqui apresentado se baseia na teoria desenvolvida em [3], que aproxima o problema utilizando os princípios de conservação de massa e energia nos diferentes componentes do tubulão. No entanto, suas equações de estado consideram que o vapor e a água armazenados no tubulão são saturados, o que não é verdadeiro para todas as condições de operação do tubulão, como, por exemplo, os casos de partida e parada.

Para contemplar a possibilidade de não saturação do líquido e vapor e a existência de bolhas abaixo do nível do líquido, adota-se um modelo matemático no qual o tubulão é representado por três volumes distintos: um volume de líquido, um volume superior de gás, no qual há uma mistura de ar e vapor, e um volume inferior de gás, ocupado pelo vapor acumulado sob o nível do líquido na forma de bolhas. Para cada volume, são aplicados os princípios de conservação de massa e energia. A vazão que passa pelo *riser* e pelo *downcomer* é calculada a partir da correlação fornecida na teoria de [3], e a taxa de calor transferido no evaporador é uma variável de entrada do modelo de estado do tubulão. Por fim, a taxa de calor trocado com o ambiente é modelada por correlações simplificadas, que consideram a diferença entre as temperaturas do líquido e do vapor internos do tubulão e a temperatura ambiente.

A implementação computacional do modelo matemático do tubulão de vapor é feita em C++, linguagem de programação que permite o uso da orientação a objetos. Dessa forma, o tubulão é estruturado em classes que correspondem aos seus componentes internos e seus processos termodinâmicos, como mostra o esquema da Figura 2. Há uma classe central que contém os parâmetros e o equacionamento do modelo de estado do tubulão, e tal classe se conecta com as entradas (*inlets*) e saídas (*outlets*) de fluido do equipamento, além de uma entrada de energia via calor (evaporador) e uma saída do mesmo tipo (ambiente).

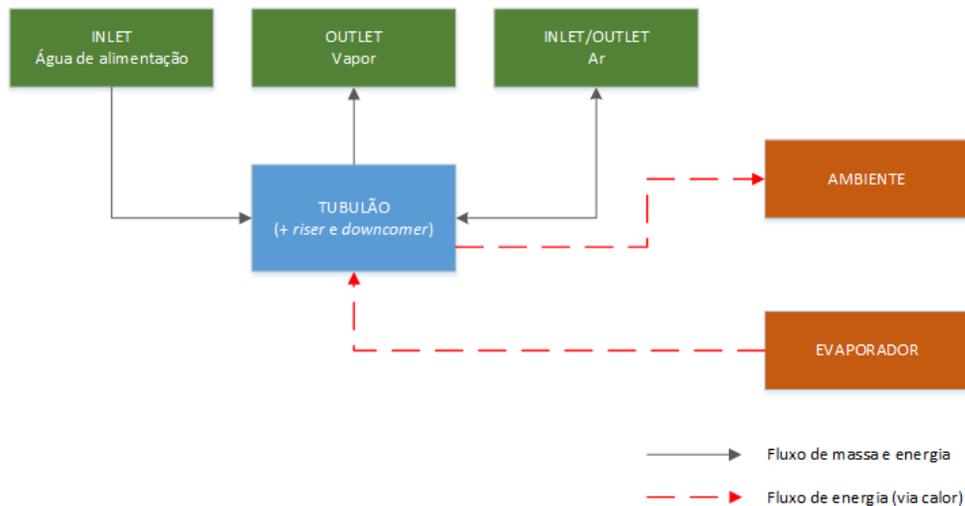


Figura 2 - Estrutura de classes representativa do tubulão de vapor.

### 3. Resultados

Para validar o modelo matemático-computacional elaborado, foi adotada a mesma estratégia de testes utilizada em [3], que consiste em impor excitações controladas nas variáveis de entrada do modelo e verificar se as curvas resultantes para as variáveis de saída apresentam um comportamento coerente com os princípios físicos conhecidos.

Os testes foram feitos considerando um tubulão de vapor de 1,64 m de diâmetro e 10 m de comprimento que opera a uma pressão de aproximadamente 600 kPa e com vazões de água de alimentação e de vapor para o superaquecedor de 12,0 kg/s. Foram realizados três testes distintos, que estão descritos a seguir.

#### 3.1. Operação

O primeiro teste tem por objetivo verificar o comportamento do tubulão durante a operação. Inicialmente, os valores definidos para as variáveis de entrada do modelo são aqueles previstos para a operação normal do equipamento. Num dado momento do teste, aumenta-se a taxa de calor no evaporador, em uma perturbação do tipo degrau.

Os resultados deste teste são mostrados na Figura 3.

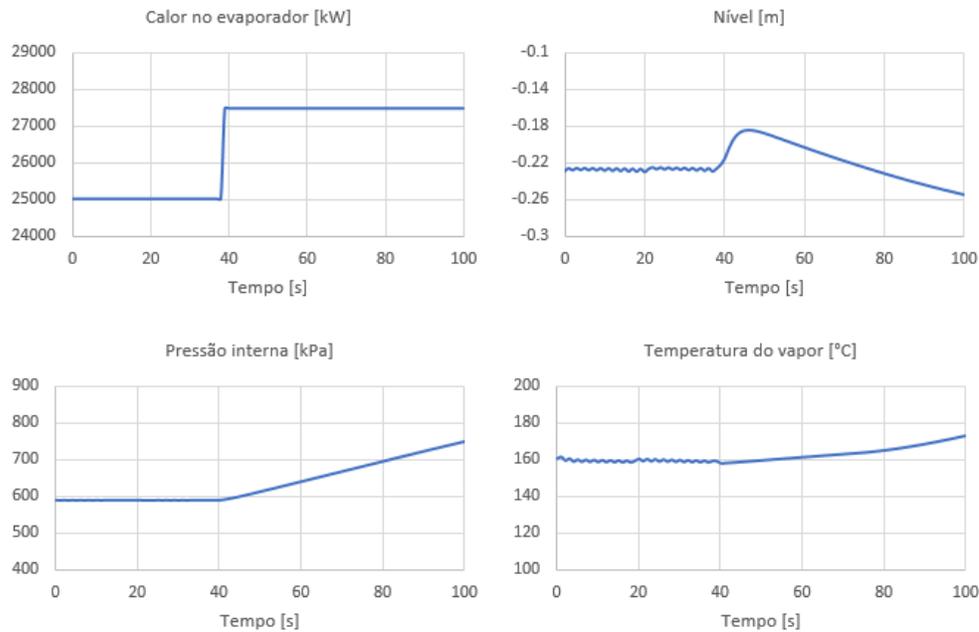


Figura 3 - Resultados do teste de variação do aporte térmico no tubulão.

As variáveis de saída analisadas são o nível de líquido no tubulão e a pressão e a temperatura de seu vapor interno. Inicialmente, os valores dessas três variáveis permanecem em um patamar constante, conforme o esperado, visto que o tubulão está em regime permanente. O aumento repentino do aporte térmico provoca variações nas três variáveis. A pressão interna passa a aumentar, pois há um aumento na quantidade de vapor d'água gerada no evaporador, o que provoca um aumento da massa de vapor acumulada. A temperatura do vapor segue a mesma tendência da pressão. O nível, por sua vez, inicialmente aumenta, devido à maior formação de bolhas sob a superfície do líquido durante o processo de evaporação, para depois diminuir, pois o aumento da pressão faz com que uma quantidade maior de vapor abaixo da linha d'água se condense. Tal comportamento mostra que o modelo é capaz de simular o efeito de *shrink and swell* observado na dinâmica do nível de tubulões.

### 3.2. Partida

O segundo teste contempla o procedimento de partida do tubulão. É definido um cenário inicial no qual o tubulão encontra-se sem líquido em seu interior, estando preenchido somente com ar à pressão atmosférica, e não há vazão de água de alimentação ou de vapor para o superaquecedor, nem transferência de calor no evaporador. Ao longo do teste, os valores das vazões nas interfaces do tubulão e da taxa de transferência de calor são incrementados, um a um, até os seus respectivos valores previstos em operação.

A Figura 4 mostra os gráficos com as variáveis de entrada e saída de interesse do teste.

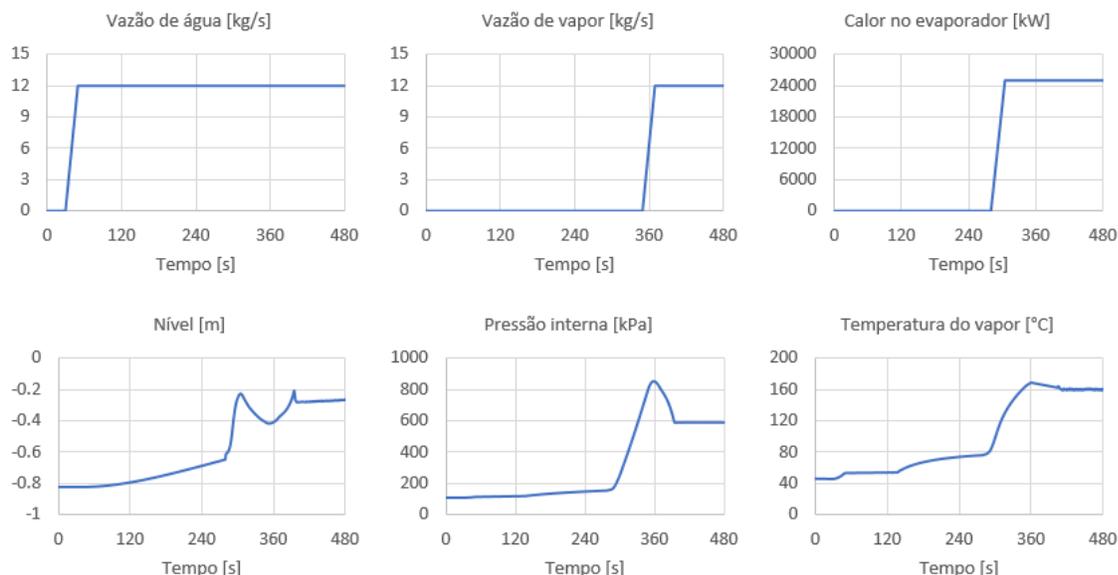


Figura 4 - Resultados do teste de partida do tubulão.

O nível começa a aumentar até atingir uma taxa constante após o aumento da vazão de água. Quando se inicia a troca de calor no evaporador, o nível aumenta mais rapidamente, devido à formação de vapor abaixo do nível do líquido, para depois diminuir, pois o vapor no volume inferior começa a se condensar ou subir para o volume superior do tubulão, elevando a sua pressão. Quando a vazão de vapor para o superaquecedor deixa de ser nula, o nível aumenta novamente, pois o volume de vapor na região superior do tubulão diminui. Por fim, quando as vazões de água de alimentação e vapor de saída se igualam, o nível tende a permanecer em um patamar constante, conforme previsto em operação.

A pressão interna, por sua vez, aumenta à medida em que o nível do tubulão sobe, pois o volume ocupado pela mistura de ar e vapor no tubulão diminui. A pressão começa a aumentar mais acentuadamente com o início da troca de calor no evaporador, pois a massa de vapor interno aumenta. Após a abertura da linha de vapor para os superaquecedores, a pressão diminui, pois a massa de vapor diminui, até que o sistema atinja uma pressão de equilíbrio, cujo valor é o previsto em operação. A temperatura do vapor segue um comportamento próximo ao da pressão.

### 3.3. Parada

O terceiro teste é o de parada do equipamento. Neste caso, o cenário inicial é o de operação, igual ao do primeiro teste realizado. Com o passar do tempo, as vazões de água de alimentação e vapor para o superaquecedor se anulam, assim como a taxa de calor transferido no evaporador. Também é manipulada neste teste uma válvula de *vent*, que permite a saída de ar e vapor do tubulão quando aberta.

Os resultados do teste de parada, contendo as curvas das variáveis de entrada e saída de interesse, são mostrados na Figura 5.

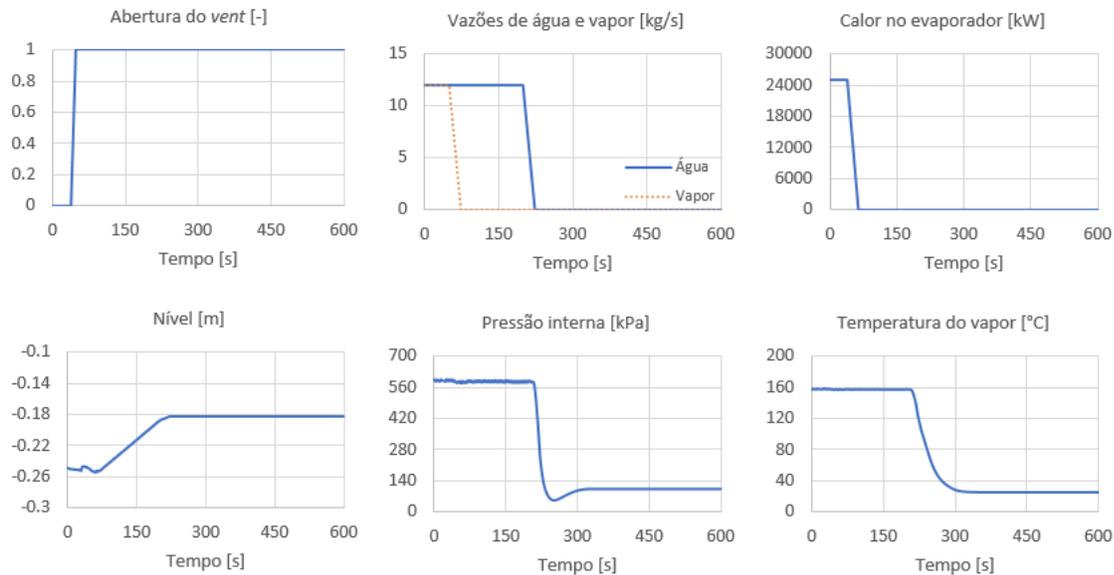


Figura 5 - Resultados do teste de parada do tubulão.

Enquanto o tubulão está em operação, o nível permanece estável. Nota-se uma perturbação no nível quando a taxa de calor no evaporador se encerra e a válvula de *vent* é aberta, e ele passa a subir a uma taxa constante quando a vazão de vapor se anula. Quando, finalmente, a vazão de água de alimentação cessa, o nível assume um valor constante.

A pressão total interna do tubulão, inicialmente no valor de operação, diminui quando as vazões de água e vapor se anulam, pelo efeito da troca de calor com o ambiente e por causa da abertura da válvula de *vent*, que faz com que a pressão interna se aproxime da pressão atmosférica. A temperatura do vapor interno segue uma tendência próxima à da pressão, convergindo para um valor próximo da temperatura ambiente, definida no teste como 25°C.

#### 4. Conclusão

Foi apresentado um modelo matemático-computacional para a simulação de tubulões de vapor. O equacionamento do modelo baseia-se em hipóteses e correlações disponíveis na literatura, e sua rotina de cálculos é estruturada de forma modular e orientada a objetos. Para a validação do modelo, foram realizados testes de simulação de um tubulão em operação, partida e parada. Em todos os casos, o modelo apresentou uma resposta coerente com os princípios físicos conhecidos e as hipóteses adotadas.

#### Referências

- [1] S. Aliakbari, M. Ayati, J. Osman e Y. Sam, "Second-order sliding mode fault-tolerant control of heat recovery steam generator boiler in combined cycle power plants," *Applied Thermal Engineering* 50, pp. 1326-1338, 2013.
- [2] ISA, "Boiler drum level control," *InTech Magazine*, July/August 2010.
- [3] K. Astrom e R. Bell, "Drum-boiler dynamics," *Automatica*, vol. 36, pp. 363-378, 2000.