

Simulação de Malha de Vapor de uma Usina de Ciclo Combinado para Treinamento de Operadores

Resumo. Este artigo irá apresentar a Plataforma Multidomínio (PM), ferramenta de simulação de processos térmicos, a qual é usada para o desenvolvimento de Simuladores *Full Scope* de usinas de ciclo combinado para treinamento de operadores, solução conhecida como OTS (*Operator Training Simulator*). Após uma contextualização sobre usina de ciclo combinado e simulador para treinamento, a ferramenta é abordada por meio da simulação de uma malha de vapor que engloba uma HRSG de dois níveis de pressão, *by-pass* para o condensador e tubulações de vapor para a turbina a vapor. Os resultados demonstram a capacidade da PM em atender aos requisitos de treinamento de operadores, tal como se adaptar à dinâmica do sistema em tempo real, i.e., responder acuradamente à atuação do sistema de controle ou do operador. Por exemplo, o fechamento de uma válvula deve inviabilizar o fluxo de massa em uma tubulação.

Palavras-Chave. Simulação de Processos Térmicos, OTS, Simulador *Full Scope*, Ciclo Combinado, HRSG.

1 Introdução

O processo de converter a energia presente em um combustível em energia elétrica envolve a criação de trabalho mecânico, o qual é transformado, por meio de um gerador, em energia elétrica. Dependendo do tipo de combustível e do processo termodinâmico, a eficiência do processo pode ser baixa, sendo o caso, por exemplo: (i) da operação isolada de uma turbina a gás (ciclo simples) ou (ii) usinas de geração de energia elétrica com base em turbinas a vapor que utilizam boilers para queimar combustível fóssil. Neste caso, ambos os processos apresentam eficiência entre 20% e 35%. Com o objetivo de aumentar a eficiência do processo, um tipo de ciclo combinado, como o próprio nome diz, combina o ciclo simples da turbina a gás (ciclo Brayton) com o ciclo simples da turbina a vapor (ciclo Rankine). Dessa forma, a eficiência do ciclo pode chegar a valores da ordem de 60%¹. Por este motivo e com a maior oferta de gás natural, a geração de energia elétrica a partir de usinas de ciclo combinado vem aumentando no Brasil [1].

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do ciclo combinado em que os gases, com altas temperaturas, de exaustão da turbina a gás, que em ciclo simples são descartados para a atmosfera por uma chaminé, são direcionados para a caldeira de recuperação de calor (*Heat Recovery Steam Generator* – HRSG). A HRSG recupera o calor presente nos gases de exaustão, gera vapor e o entrega para a turbina a vapor que, assim como a turbina a gás, aciona um gerador responsável por converter tal energia em energia elétrica.

¹ Condições ISO: temperatura ambiente de 15°C, pressão ambiente de 1 atm e umidade relativa do ar de 60%.

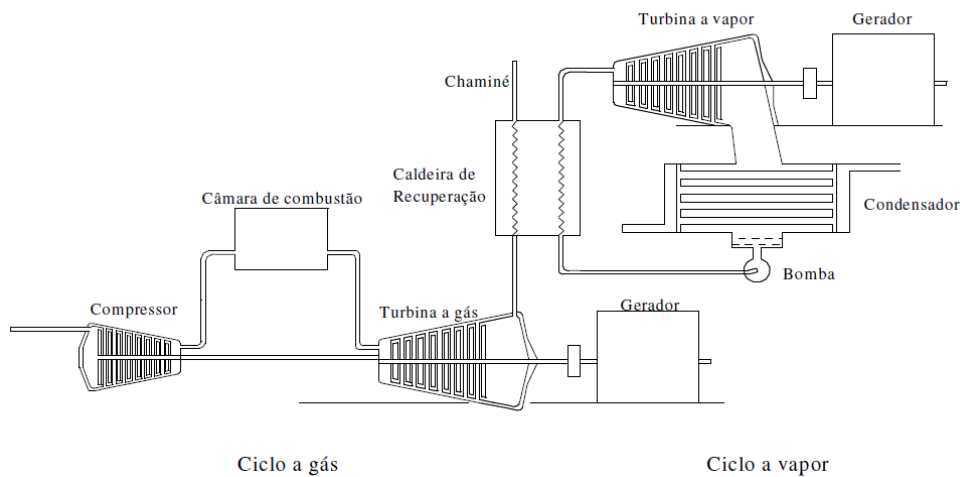


Figura 1 – Diagrama simplificado do ciclo combinado [2].

Dado o crescimento de usinas de ciclo combinado no Brasil e a complexidade do processo termodinâmico envolvido, o treinamento eficaz de operadores de sala de controle é crítico para manter níveis aceitáveis de confiabilidade e segurança operacional de usinas termelétricas [3]. A melhor ferramenta disponível no mercado para treinamento e reciclagem de operadores são os OTS, Simuladores de Escopo Completo (FSS – *Full Scope Simulator*), o qual, em relação a planta específica de referência, incorpora reprodução idêntica da Lógica de Controle e Interface Gráfica Homem-Máquina (HMI – *Human Machine Interface*), modelagem física-computacional detalhada dos sistemas e níveis de acurácia exigentes, padronizados pela norma ANSI/ISA 77.20.01-2012.

A [GT2 Tecnologia](#), fornece este tipo de solução para o mercado brasileiro e garante que o desempenho de treinamento utilizando este tipo de tecnologia de simulação é superior aos demais porque: (i) exige menor tempo para formação de operadores – como normalmente não é viável mudar as condições operativas das usinas para fins de treinamento, estima-se que, com treinamento realizado diretamente na planta, o amadurecimento de um operador dure entre três e cinco anos; (ii) a operação de tais usinas, por consequência do desenvolvimento tecnológico e melhorias do sistema de automação, tem se tornado cada vez mais simples para os operadores, o que vem acompanhado da tendência natural dos operadores experientes perderem conhecimento da planta que operam, uma vez que muitos procedimentos são realizados automaticamente pelo sistema de controle [3]; (iii) dado que o treinamento ocorre em um ambiente idêntico à sala de controle real, operadores experientes podem ser efetivamente reciclados, visto que a variedade de condições oferecidas, tais como diversidade de procedimentos (*base load*, *partial load*, partida a frio, partida a quente, partida após trip, entre outras), inserção de falhas e variação de condições ambientais, não permitem que o treinando fique entediado ou simplesmente decore o conteúdo [4].

No contexto de simulação de processos térmicos e treinamento de operadores de centrais termelétrica, este artigo tem por objetivo abordar a metodologia da GT2 Tecnologia de modelagem de malhas termofluidodinâmicas, usando como exemplo, as malhas de vapor de uma usina de ciclo combinado, demonstrando, assim, a importância que uma

modelagem acurada para simulação tem na qualidade de um OTS. A seguir será apresentada a Plataforma Multidomínio (PM), desenvolvida pela GT2 Tecnologia, para a simulação de processos térmicos.

2 Plataforma Multidomínio

A Plataforma Multidomínio (PM) é uma ferramenta para a simulação dos fenômenos termofluidodinâmicos presentes em processos térmicos como os encontrados em usinas termelétricas, praça de máquinas de navios e em indústrias energo-intensivas. Para tal, lança mão de duas camadas de cálculo. Na primeira, representante do domínio hidráulico, as relações causais entre vazões e pressões são definidas. Uma vez que sejam conhecidos os fluxos de massa e a distribuição de pressão ao longo de determinada malha, definem-se, por meio da camada térmica, os fluxos de energia via calor que atravessam a malha, seja por contato desta com o meio ambiente ou com outra malha. Como consequência, é definida a distribuição energética de tal sistema, alicerce fundamental para a simulação do mesmo.

Um importante atributo da Plataforma Multidomínio é a sua capacidade de se adaptar à dinâmica do sistema. Uma vez que o simulador deve ser capaz de lidar com perturbações externas – como a presença de uma falha ou a intervenção de um operador – a PM avalia, a cada iteração, a configuração na qual todos os sistemas presentes na usina se encontram. Como exemplo, o fechamento de uma válvula deve inviabilizar o fluxo de massa pela mesma, o que se traduz em uma alteração estrutural do sistema. Abaixo, outras características importantes da PM são listadas:

- É baseada em princípios físicos da termodinâmica;
- Realiza cálculos de estado termodinâmico e mudanças de estado, incluindo a modelagem de gases com composição variável;
- Simula trocadores de calor, bombas, válvulas, tubulações, etc.
- A modelagem modular (blocos) permite que seus parâmetros intrínsecos sejam modificados durante desenvolvimento;
- Considera propriedades de água e vapor IAPWS-IF97²;
- É capaz de resolver um conjunto de equações baseado em conservação de massa e energia.

A seguir é apresentado um estudo de caso em que a PM é usada para simulação de uma malha de vapor típica de uma usina de ciclo combinado.

² Em 1997, uma organização conhecida como “*The International Association for the Properties of Water and Steam*”, a IAPWS, adotou uma formulação nova, a IAPWS-IF97, para as propriedades termodinâmicas da água e do vapor para o uso industrial (www.iapws.org).

3 Estudo de caso

A Figura 2 representa um esquema simplificado de uma malha de vapor típica de uma usina de ciclo combinado. A turbina a gás é representada pelos gases de exaustão que passam pela HRSG de dois níveis de pressão que recupera o calor proveniente dos gases e entrega vapor superaquecido a alta e a baixa pressão para a turbina a vapor. Ao sair do superaquecedor de alta pressão, o vapor pode ser dessuperaquecido por meio da injeção de água, podendo seguir para a turbina a vapor, quando esta estiver em operação, ou diretamente para o condensador, por meio do *by-pass* de alta pressão. O vapor expandido que sai da seção de alta pressão da turbina a vapor se junta com o vapor de baixa pressão oriundo da HRSG e é direcionado para seção de baixa pressão da turbina a vapor, onde é expandido e direcionado para o condensador.

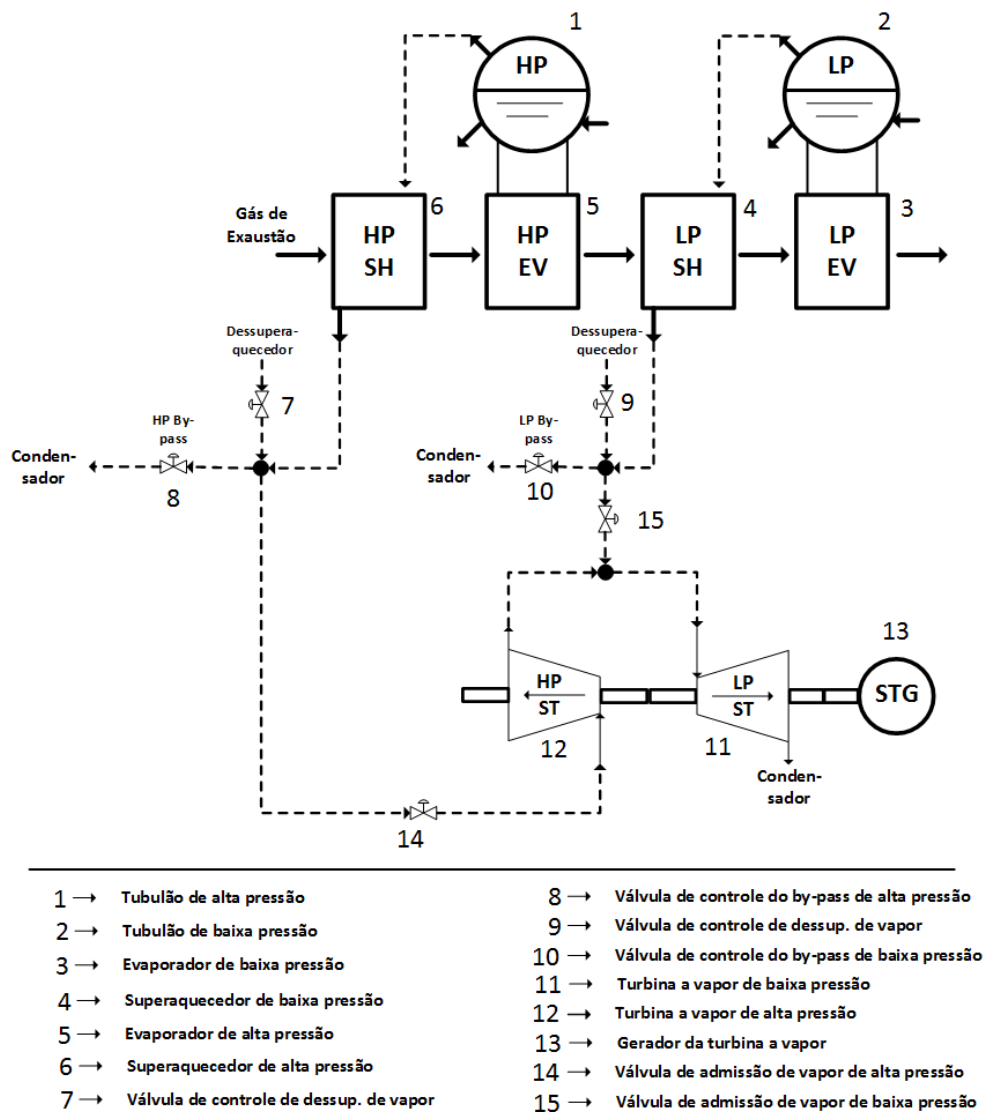


Figura 2 – Diagrama simplificado de uma malha de vapor típica de uma usina de ciclo combinado.

A seguir serão apresentados resultados de simulação da malha de vapor por meio de procedimentos comumente realizados em usinas de ciclo combinado.

3.1 Resultados

Para demonstrar a simulação da planta de vapor usando a PM, serão realizados procedimentos típicos e verificado o comportamento de variáveis de interesse. A simulação da malha da Figura 2 é iniciada com as condições da Tabela 1 para todos os testes realizados.

Tabela 1 – Condições iniciais para simulação da malha de vapor.

Variáveis	Valor	Unidade
Pressão tubulão de alta pressão	7000	kPa
Pressão tubulão de baixa pressão	527.54	kPa
Vazão mássica de vapor de alta pressão	44.24	kg/s
Vazão mássica de vapor de baixa pressão	13.17	kg/s
Abertura da válvula do dessuperaquecedor de vapor de alta pressão	0	%
Abertura da válvula do dessuperaquecedor de vapor de baixa pressão	0	%
Vazão de água de dessuperaquecimento de alta pressão	0	kg/s
Vazão de água de dessuperaquecimento de baixa pressão	0	kg/s
Abertura válvula de controle do <i>by-pass</i> de alta pressão	0	%
Abertura válvula de controle do <i>by-pass</i> de baixa pressão	0	%
Vazão de vapor do <i>by-pass</i> de alta pressão	0	kg/s
Vazão de vapor do <i>by-pass</i> de baixa pressão	0	kg/s
Temperatura do vapor após superaquecedor de alta pressão	544.85	°C
Temperatura do vapor após superaquecedor de baixa pressão	270.76	°C
Temperatura do vapor antes da turbina de alta pressão	544.83	°C
Temperatura do vapor antes da turbina de baixa pressão	270.58	°C
Abertura da válvula de admissão de vapor de alta pressão	50	%
Abertura da válvula de admissão de vapor de baixa pressão	50	%
Vazão de vapor na seção de alta pressão da turbina a vapor	44.24	kg/s
Vazão de vapor na seção de baixa pressão da turbina a vapor	13.17	kg/s
Pressão de vapor antes da válvula de admissão de vapor de alta pressão	6462.56	kPa
Pressão de vapor antes da válvula de admissão de vapor de baixa pressão	354.7	kPa
Pressão de vapor depois da válvula de admissão de vapor de alta pressão	4039.36	kPa
Pressão de vapor depois da válvula de admissão de vapor de baixa pressão	310.22	kPa

Um dos requisitos de simuladores *full scope* é a capacidade responder a ações do usuário e do sistema de controle, assim, ferramentas de simulação para este fim precisam ser capazes de se adaptar à dinâmica de operação em tempo real, i.e., o operador em treinamento deve perceber a consequência de sua ação ou a ação do sistema de controle. A PM foi projetada para atender a este requisito e os testes a seguir visam ilustrar procedimentos típicos na malha de vapor usada aqui como exemplo.

3.1.1 Dessuperaquecedor de vapor

O primeiro teste visa simular o dessuperaquecimento de vapor após o superaquecedor de alta pressão por meio da injeção de água. A malha inicia nas condições da Tabela 1 e com 5 segundos de simulação a válvula de controle do dessuperaquecedor de vapor começa a se abrir. A Figura 3 mostra as variáveis de interesse que são a temperatura de vapor e a vazão de injeção de água. Note que a temperatura do vapor diminui conforme a vazão de água aumenta e que um operador seria capaz de, por meio da atuação na válvula de controle de dessuperaquecedor de vapor, controlar a temperatura do mesmo.

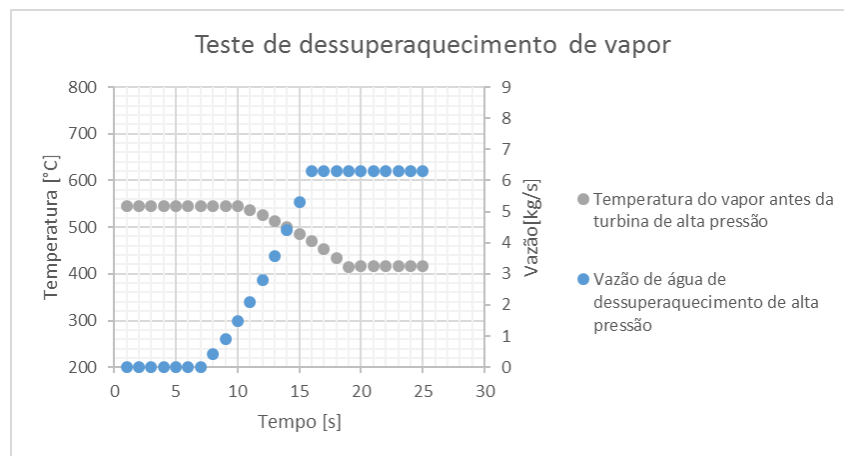


Figura 3 – Teste de dessuperaquecedor de vapor de alta pressão de uma planta de vapor típica de ciclo combinado.

3.1.2 Abertura de by-pass

O segundo teste, abertura de *by-pass*, também reproduz uma situação típica de malhas de vapor de usinas de ciclo combinado. O *by-pass* de vapor é usado durante a partida da HRSG, parada da turbina a vapor e para controle da pressão de vapor. Esse teste irá tratar da última situação em que o *by-pass* será aberto para evitar o aumento da pressão na linha de vapor de alta pressão. A Figura 4 mostra os resultados do teste por meio das variáveis de interesse.

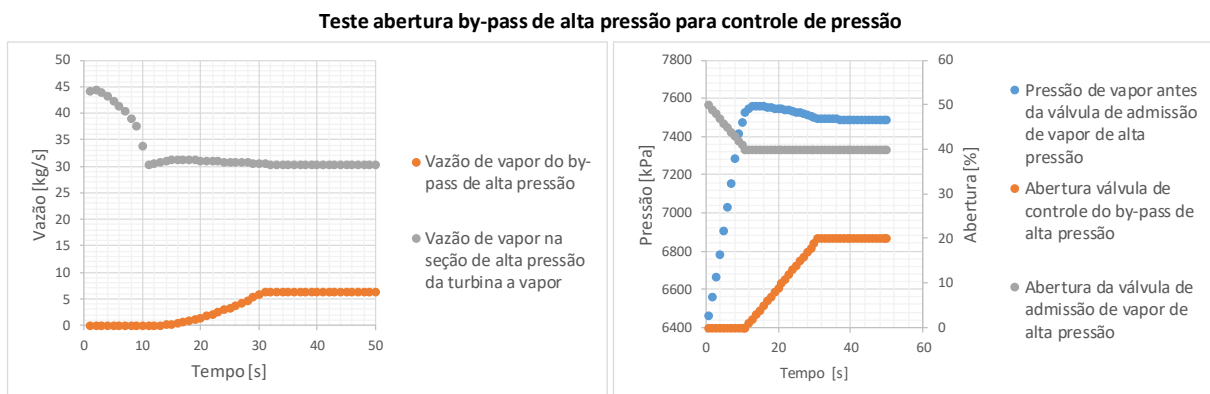


Figura 4 – Teste de abertura de by-pass de alta pressão para controle de pressão do vapor.

A malha começa com as condições da Tabela 1 e a pressão de vapor começa a aumentar devido ao fechamento das válvulas de admissão da turbina a vapor que passam de uma abertura de 50% para 40%. Quando a pressão ultrapassa 7.500 kPa o *by-pass* começa a abrir, saindo de 0 para 20%, para controlar a pressão de vapor. Também é possível verificar o comportamento da vazão de vapor na seção de alta pressão da turbina a vapor, que diminui com o fechamento das válvulas de admissão de vapor, e a vazão de vapor no *by-pass*, que aumenta com a abertura da válvula de controle do *by-pass*. Portanto, com abertura do *by-pass* foi possível controlar a pressão na linha no patamar de 7.500 kPa.

3.2 Conclusão

Este artigo abordou a Plataforma Multidomínio, ferramenta de simulação de processos térmicos, aplicada ao caso de uso de uma malha de vapor típica de uma usina de ciclo combinado. A PM é usada para o desenvolvimento de OTS de processos térmicos, assim, foram apresentados testes que comprovaram a sua capacidade de atender aos requisitos de treinamento de operadores de usinas de ciclo combinado, pois sua capacidade de se adaptar à dinâmica do sistema permite que perturbações externas sejam tratadas em tempo real, por exemplo, nos testes realizados, um operador seria capaz de controlar a temperatura do vapor atuando na válvula do dessuperaquecedor ou controlar a pressão atuando na válvula de controle do *by-pass*.

4 Referências

- [1] B. M. Ferreira, "MODELAGEM DE PLANTAS DE CICLO COMBINADO PARA SIMULAÇÃO INTEGRADA DE TRANSITÓRIOS ELETROMECCÂNICOS E TERMODINÂMICOS." Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- [2] W. A. CARNEIRO, "Avaliação do comportamento dinâmico de turbinas a gás aeroderivativas na operação em ciclo combinado." Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá—UNIFEI. Itajubá/MG, 2007.
- [3] U. Tomschi, H. Jäckisch, and R. Newald, "Operator guidance simulator: A new power plant training tool concept," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, no. 7, pp. 327–332, 2006.
- [4] J. Távira-Mondragon and R. Cruz-Cruz, "Development of modern power plant simulators for a operators training center," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2010, vol. 1.