

Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no **VI Congresso Rio Automação**, realizado nos dias 16 e 17 de maio de 2011, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse e no texto final submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do **VI Congresso Rio Automação**.

Resumo

Este paper apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento de um simulador de processos dinâmicos específico para estações de redução de pressão e entrega de gás natural, também conhecidas como *citygates*. O simulador reproduz o comportamento transiente real dos equipamentos principais existentes: válvula de três vias, válvulas redutoras de pressão, aquecedores de gás; incluindo a lógica da malha de controle. Um enfoque maior será dado na modelagem transiente dos aquecedores indireto de banho d'água e na regulagem dinâmica de temperatura de entrega da estação através de um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) que comanda a válvula de três vias. O simulador de processo para estações de entrega foi submetido a vários testes: (1) Validação das equações de estado e da formulação aplicada aos equipamentos através de comparações com simuladores comerciais de processo dinâmico; (2) Modelagem de uma estação de entrega de gás natural existente baseada nas condições operacionais estabelecidas no projeto; (3) Simulação da operação em uma estação de entrega real existente com comparação direta com dados de instrumentação enviados ao supervisor de controle e aquisição de dados (SCADA). O estudo de uma estação de entrega existente aborda a simulação de eventos operacionais normais e cenários de falha de apagamento da chama piloto dos aquecedores. Serão discutidos neste trabalho os resultados obtidos das simulações com malha de controle de temperatura existente e modificada e o impacto na temperatura de entrega e no consumo de gás combustível produzido pela mudança da lógica de controle.

Abstract

This paper presents the methodology applied in the research and development of a dynamic simulator for modeling the thermodynamic process in natural gas pressure reduction and delivery stations, also known as *citygates*. The simulator reproduces the real transient behavior of the main local equipments: three way control valves, pressure reduction valves, gas heaters, including the automation and control logic. A great focus is given in the numeric transient model of the indirect fired water bath heaters and the downstream station (delivery) temperature regulation using a PID controller that commands the three way valves. The citygate station process simulator was submitted for trials: (1) Validation of the equations of state and applied equipment formulation due direct comparison with commercial simulators; (2) Modeling an existent citygate station based on operational conditions that are defined at station design; (3) Operational simulation of a real citygate station using comparison with instrumentation data from supervisory system (SCADA). The study of the real citygate station shows the simulation of normal operational events and equipment fail scenarios like a sudden gas heaters pilot flame shut off. It will be discussed in the paper the simulator results obtained with the actual and modified temperature control and the impact on delivery temperature and fuel consumption produced by changing the automation logic and their parameters.

¹ Mestre, Engenheiro Mecânico – PUC-Rio

² Doutor, Engenheiro Mecânico – CTEx

³ Mestre, Engenheira Mecânica – TBG

⁴ Analista de Comercialização e Logística – Petrobras

1. Introdução

Nos últimos anos houve um aumento significativo da participação do gás natural na matriz energética nacional. Como consequência houve expansão da malha de gasodutos e a instalação de novas estações de redução de pressão e entrega de gás natural, também conhecidas como “city-gates”. O gás natural deve ser entregue aos clientes (companhias distribuidoras, indústrias e usinas termoelétricas) nos níveis de pressão e temperatura previamente estabelecidos em contrato. Estas estações recebem o gás natural diretamente do gasoduto de transporte a altas pressões, e reduzem a pressão através da expansão abrupta numa válvula de controle, produzindo uma queda de temperatura proporcional à queda de pressão (Van Wylen e Sonntag, 2003). Por esta razão, no projeto das estações de entrega é previsto a instalação de um sistema de pré-aquecimento do gás. Este sistema geralmente é composto de válvulas de três vias e aquecedores indiretos de banho de água que compensam a perda de temperatura promovida pela válvula redutora de pressão. Os aquecedores indiretos de banho d’água utilizam parte do gás natural transportado como combustível no processo de aquecimento. De acordo com o estudo realizado por (Henrique et al., 2005) os sistemas de aquecimento representam aproximadamente 30% dos custos dos equipamentos de uma estação de entrega.

As estações de entrega do gasoduto Brasil-Bolívia (GASBOL) e operadas pela transportadora TBG são classificadas em seis tipos em função de sua capacidade de entrega, de acordo com o projeto da instalação. A Tabela 1 exhibe as vazões mínimas e máximas para cada um dos seis tipos de ponto de entrega existentes do GASBOL. De acordo com o projeto das estações de entrega, as áreas de pré-aquecimento e redução de pressão possuem tramos em paralelo para situações emergenciais ou de manutenção de equipamentos.

Tabela 1. Tipos de Estação de Entrega de Gás por Capacidade (Fonte: TBG/2010)

Tipo de Estação	Número de Estações	Vazão Mínima (SMm ³ /dia)	Vazão Máxima (SMm ³ /dia)	Consumo Máximo dos Aquecedores (SMm ³ /dia)
I	2	4,5	112	0,295
II	7	13,6	255	0,672
III	9	23,2	432,5	1,152
IV	10	39,6	990	3,360
V	12	96,0	1800	5,088
VI	4	192,0	3600	10,176

2. Estação de Entrega de Gás Natural

A Figura 1 apresenta uma fotografia da estação de entrega de gás natural de São Carlos-SP da TBG com uma visualização geral de uma instalação típica. Nas estações de entrega de gás natural, o processo de condicionamento do gás ocorre em cinco sistemas ou áreas de processo: filtragem, aquecimento, redução de pressão, controle de combustível e medição. A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático de uma estação de entrega típica da TBG, com indicação dos equipamentos e instrumentos (indicadores e transmissores) existentes para cada uma das áreas de processo.

A área de filtragem é composta por dois tipos de filtros associados: filtro ciclone e filtros cartuchos. O sistema de aquecimento possui dois aquecedores de gás do tipo indireto a banho d’água (F01A/B), que operam simultaneamente. O controle de temperatura do gás de entrega para o cliente é feito através da válvula de três vias (TV-31A/B) que regula as vazões de gás para o aquecedor e do “by-pass” do aquecedor de forma a regular a temperatura do gás de saída da estação em 20 °C. O tramo de redução e controle de pressão é composto por duas válvulas de controle (reguladora e monitora) e uma válvula de alívio. Na área de utilidades é realizado o controle de gás combustível enviado aos aquecedores.



Figura 1. Foto da Estação de Entrega de São Carlos da TBG (22/05/2010)

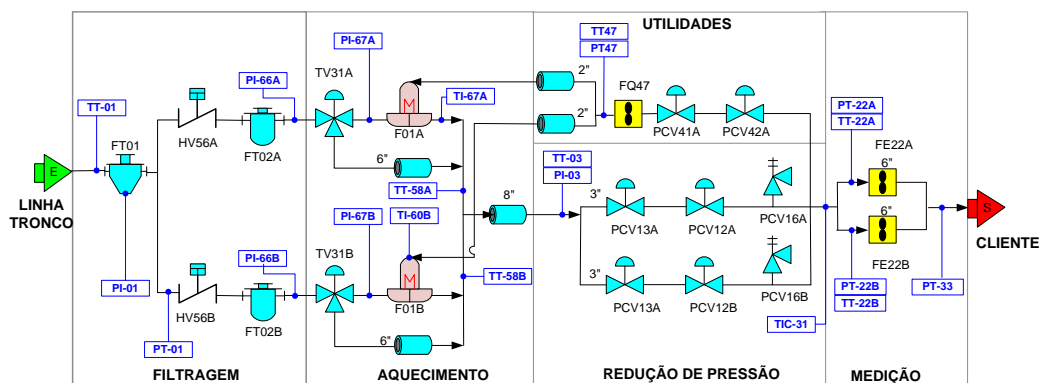


Figura 2. Esquemático de uma Estação de Entrega de Gás Típica

3. Objetivo e Metodologia

O objetivo deste trabalho é apresentar a simulação da operação de uma estação de entrega de gás natural com ênfase na reprodução do comportamento térmico transiente do sistema de pré-aquecimento e da malha de controle de temperatura de entrega. Para atingir este objetivo foi desenvolvida uma ferramenta de simulação em linguagem C++ com código extensível que permitisse a criação de modelo de equipamentos não convencionais como o aquecedor indireto de banho de água não encontrado nos simuladores de processo comerciais. A seguir a metodologia utilizada durante a pesquisa e desenvolvimento do simulador de estações de entrega de gás natural e sua aplicação em engenharia:

1. Desenvolvimento do simulador de estações de entrega: criação do módulo de solução ou “solver”, utilizando linguagem de programação C++. O módulo de solução compreende o conjunto de rotinas de programação responsável pelo cálculo das variáveis físicas envolvidas no processo (temperaturas, vazões e pressões) através da solução do sistema de equações do problema.
2. Validação da equação de estado e da formulação dos equipamentos utilizados no módulo de solução através da comparação com simuladores de processo comerciais.
3. Criação de um modelo de simulação de uma estação de entrega de gás natural existente a partir dos parâmetros de projeto e condições operacionais nos equipamentos

4. Simulação de cenários em condições normais de operação da estação de entrega de gás natural de São Carlos-SP com comparação com os dados de instrumentação armazenados no banco de dados do sistema supervisorio de aquisição de dados (SCADA) e dos cenários de falha de equipamentos como o apagamento de aquecedores e seu impacto no fornecimento de gás natural.
5. Estudos com a malha de controle de temperatura existente e com malha de controle proposta com variação da demanda de gás para avaliação do consumo de gás combustível nos aquecedores.

4. Características do Simulador de Estações de Entrega

O simulador é o conjunto de rotinas de programação em C++ responsável pelo pré-processamento, solução do sistema de equações de escoamento e transferência de calor, cálculo das propriedades termodinâmicas do gás natural e pós-processamento da solução para visualização dos resultados. O simulador foi estruturado em duas rotinas iterativas principais que são acionadas dependendo do problema a ser resolvido:

- Rotina Iterativa Estática: Solução de problemas estáticos com determinação do regime permanente ou ponto de equilíbrio nos equipamentos, necessário para o dimensionamento de novas estações de entrega de gás natural a partir de condições de projeto.
- Rotina Iterativa Dinâmica: Solução de problemas dinâmicos com análise do regime transiente térmico nos aquecedores; avaliação da resposta da lógica de controle; e condições operacionais ao longo do tempo. Neste módulo é possível a configuração de um cenário e a especificação de um passo de tempo.

Para aumentar a flexibilidade de solução de problemas pelo simulador é possível escolher em ambas as rotinas iterativas (estática e dinâmica) quais os sistemas de equações serão resolvidos, o que permite a redução do tempo de processamento para problemas menos complexos. O tipo de regime térmico a ser resolvido (isotérmico ou não) e a existência de múltiplos gases de mistura (isomistura ou não) definirão quais módulos de solução serão executados durante a rotina iterativa principal. A avaliação da resposta da malha de controle somente é possível para a rotina iterativa dinâmica sendo o fluxograma de ações desta rotina apresentado na Figura 3.

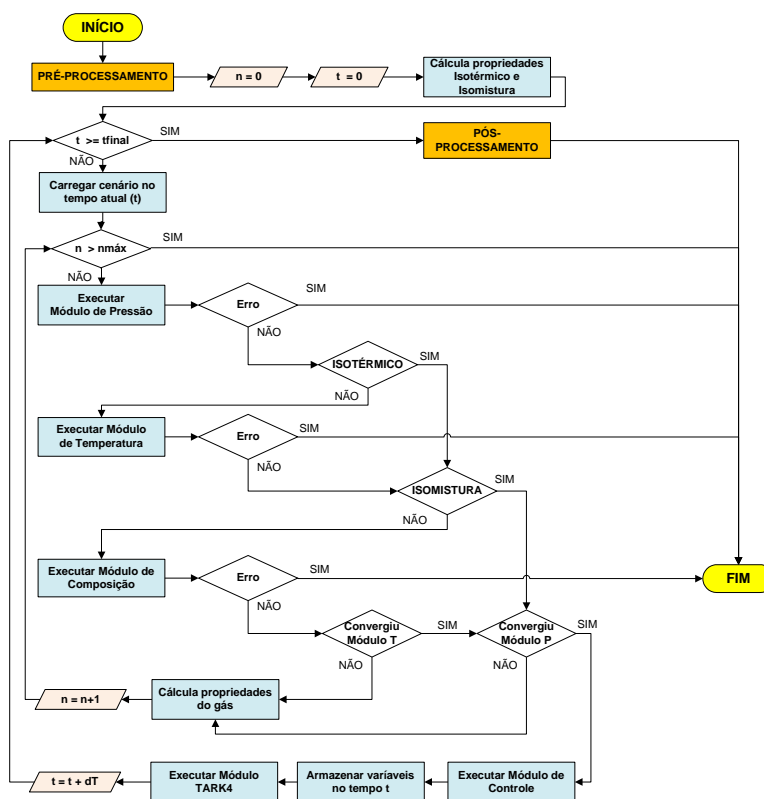


Figura 3. Fluxograma de ações – Rotina Iterativa Dinâmica

De forma resumida as características principais do simulador de estações de entrega de gás natural são:

- Propriedades termodinâmicas de acordo com as equações de estado de: Peng-Robinson ou Soave-Redlich-Kwong.
- Escoamento com balanço de massa e energia da mistura e massa das espécies nos nós.
- Condição de contorno de entrada variando com tempo: pressão ou vazão, temperatura e composição do gás.
- Condições de contorno de saída variando com tempo: pressão ou vazão.
- Correlações empíricas baseadas na conservação de quantidade de movimento linear e energia da mistura para determinação da perda de pressão discreta nos elementos: filtros, válvulas, aquecedores e dutos.
- Processo adiabático e iso-entálpico para válvulas de controle e de três vias.
- Escoamento unidimensional em regime permanente nos dutos cilíndricos aéreos.
- Processo com transferência de calor para o ambiente nos dutos cilíndricos aéreos.
- Formulação transiente da equação de energia para os aquecedores de gás indireto de banho de água.
- Formulação transiente para avaliar o comportamento dos controladores proporcional-integrativo-derivativo (PID).

4.1 Formulação

Neste tópico será descrita a formulação do aquecedor indireto de banho de água e do controlador PID.

Foi desenvolvida uma formulação transiente capaz de simular o comportamento térmico dos aquecedores indiretos de banho. O aquecedor indireto de banho tem a água como elemento intermediário e utiliza os mecanismos de convecção natural da água e condução para transferir o calor dos gases quentes de combustão até o gás natural a ser aquecido. Estes aquecedores são divididos internamente em dois componentes principais: serpentina por onde passa o gás de processo e tubo-chama que transmite o calor proveniente da combustão do gás combustível para a massa de água. Uma visão em corte e o símbolo adotado para este aquecedor no simulador de estações de entrega é apresentada na Figura 4.

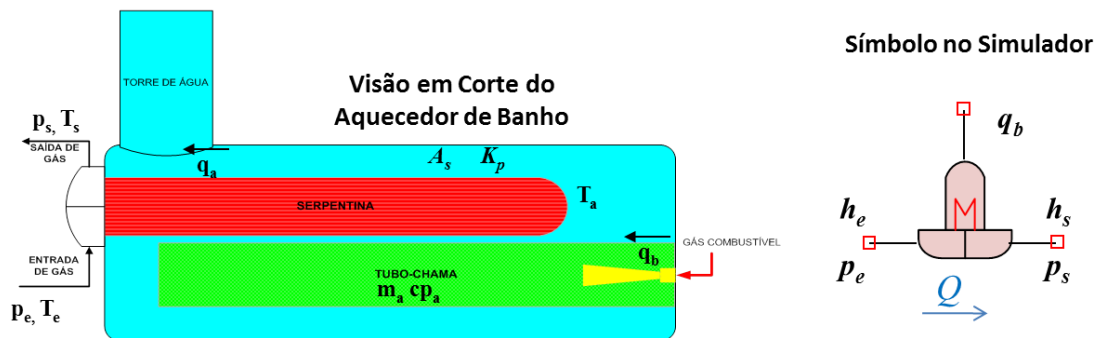


Figura 4. Esquemático do aquecedor indireto de banho de água

O modelo do aquecedor indireto de banho possui uma entrada e uma saída para o gás de processo e uma entrada para o gás combustível como ilustrado no esquema. O modelo despreza a variação do nível ou da massa de água devido a processo de evaporação. A queda de pressão na serpentina varia em função da vazão volumétrica padrão de gás Q sendo definida através de um coeficiente de queda de pressão Kp de acordo com a Eq. 1.

$$-Q|Q| \cdot Kp + (p_1^2 - p_2^2) = 0 \quad (1)$$

A equação de conservação de energia para a água relaciona a variação de temperatura da água T_a no tempo com a energia acumulada, onde q_a o calor total transferido da água para o gás de processo, q_b é calor proveniente da combustão e $m_a \cdot Cp_a$ a capacidade térmica da água.

$$\frac{dT_a}{dt} - \frac{q_b - q_a}{m_a Cp_a} = 0, \quad q_a = U A_s \frac{(T_a - T_s) - (T_a - T_e)}{\ln\left(\frac{T_a - T_s}{T_a - T_e}\right)}, \quad q_b = \eta_b Q_b PCI_g \quad (2)$$

Para o cálculo do fluxo de calor de combustão q_b é necessário conhecer o rendimento térmico η_b , a vazão de combustível Q_b e do poder calorífico PCI_g da mistura de gás. A metodologia de cálculo do poder calorífico inferior e superior do gás natural a partir da composição molar é abordada na norma brasileira NBR-15213 (ABNT, 2008).

O fluxo de calor transferido entre o gás e a água foi calculado usando o método da temperatura média logarítmica entre a entrada e saída (Incropera e DeWitt, 1996) onde U é o coeficiente global de transferência considerando a área da serpentina A_s . A equação de conservação de energia para o gás de processo estabelece que o calor transferido é igual à diferença dos fluxos de energia Eq. 3. O termo acumulativo de energia do gás de processo foi desprezado, devido ao pequeno volume de gás existente na serpentina.

$$q_a = \dot{m}_e [h_e(p_e, T_e) - h_s(p_s, T_s)] \quad (3)$$

No modelo transiente do aquecedor indireto foi incluída a lógica de um controlador de duas posições (“on-off”) com histerese para comandar o acendimento da chama do aquecedor. A frequência e o período de acendimento da chama do aquecedor e conseqüentemente o consumo de gás combustível são afetados pelos parâmetros da lógica de controle de duas posições: setpoint de temperatura da água T_{aset} e o incremento diferencial dT_a . Na Figura 5 é possível visualizar como os parâmetros do controlador influenciam na variação de temperatura da água do aquecedor.

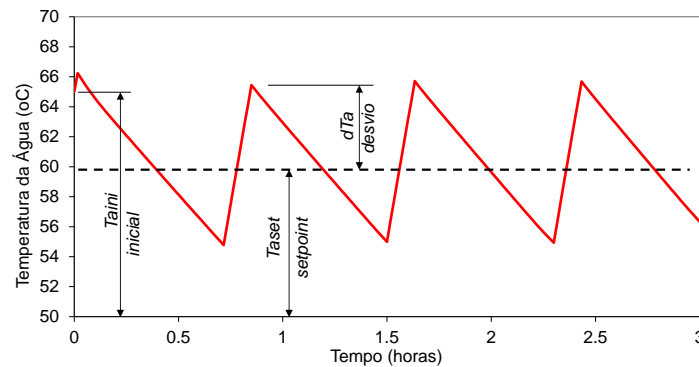


Figura 5. Variação da temperatura da água num aquecedor indireto de banho com controlador de duas posições

Um modelo de controlador proporcional-integral-derivativo (PID) convencional foi implementado para simular o comportamento da lógica de controle de temperatura de entrega, (Jury, 1973) apresenta o princípio de funcionamento e as aplicações de controladores com três modos de controle: proporcional, integral e derivativo. Estes modos de controle podem operar individualmente ou de forma combinada. Um controlador que contenha os três modos é chamado de PID e um controlador dotado apenas dos modos proporcional e integrativo é chamado PI. O controlador PID é robusto e largamente utilizado e um grande número de processos industriais, sendo o algoritmo de controle mais difundido no mundo (Aström, 2002).

O controlador de temperatura tipo PID com tomada de controle localizada à jusante da válvula redutora de pressão é o responsável por comandar a posição de abertura da válvula de três vias, regulando assim a temperatura de entrega da estação. O esquema da Figura 6 ilustra a aplicação de um controlador PI para comandar a atuação da válvula de três vias. A fração de abertura é obtida como a resposta de controle $X(t)$ de um controlador PI que têm como variável de controle $C(t)$ a temperatura na saída da válvula redutora de pressão e valor de referência $S(t)$. Os parâmetros do controlador PID devem ser ajustados de tal forma que a resposta do controlador $X(t)$ seja igual à fração de abertura da válvula de três vias. O erro $E(t)$ e a resposta $X(t)$ do controlador PID convencional são apresentadas nas equações 4 e 5 respectivamente.

$$E(t) = C(t) - S(t) = \frac{C(t) - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} - \frac{S(t) - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (4)$$

$$X(t) = \underbrace{K_C}_{\text{proporcional}} E(t) + \underbrace{\frac{1}{K_I} \int_0^t E(t) dt}_{\text{integral}} + \underbrace{K_D \frac{dE(t)}{dt}}_{\text{derivativo}} + \underbrace{B_o}_{\text{bias}} \quad (5)$$

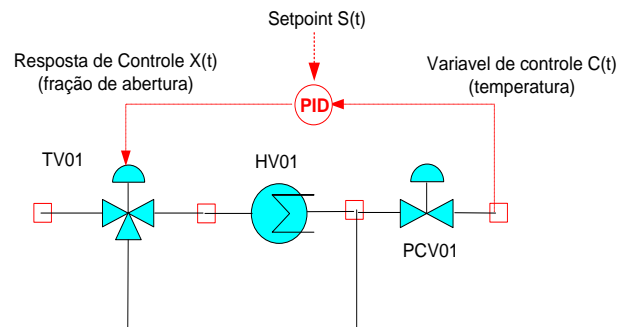


Figura 6. Controlador de Temperatura de Entrega (Sistema de Pré-Aquecimento)

5. Modelagem da Estação de Entrega de São Carlos-SP

Os dados utilizados na confecção do modelo de simulação da estação de entrega (EE) de São Carlos foram extraídos das folhas de dados do projeto e dos catálogos dos fabricantes dos equipamentos, e as condições operacionais comparadas com o sistema supervisório da TBG. Em alguns casos, complementaram-se as informações com dados coletados em medidores locais para validação do modelo. Na Figura 7 é ilustrada a visão esquemática do modelo de simulação da estação de entrega de São Carlos com todos os equipamentos. Na Tabela 2 é apresentada a configuração dos equipamentos principais (aquecedores e válvulas) e dos controladores utilizados na malha de controle de temperatura atual.

Tabela 2. Parâmetros do Modelo da Estação de Entrega de São Carlos – SP

<p>Ponto de Entrada: GASBOL Modo de Controle: Pressão Pressão: 97,2 kgf/cm² Temperatura: 32,4 °C</p>	<p>Ponto de Saída: CLIENTE Modo de Controle: Vazão Vazão: 275,0 SMm³/dia</p>
<p>Aquecedor F01A Massa de Água: 3200 kg Coef. Global: 355 W/m².K Rendimento Térmico: 0,62 Temperatura Inicial: 65 °C Setpoint Temp. Água: 60 °C Incremento Diferencial: 5 °C Vazão de Combustível: 1,4 SMm³/dia</p>	<p>Aquecedor F01B Massa de Água: 3200 kg Coef. Global: 355 W/m².K Rendimento Térmico: 0,62 Temperatura Inicial: 54 °C Setpoint Temp. Água: 58 °C Incremento Diferencial: 4 °C Vazão de Combustível: 1,4 SMm³/dia</p>
<p>Monitora PCV13 Modo de Controle: Fração de Abertura Fração de Abertura: 1,0 (aberto)</p>	<p>Reguladora PCV12 Modo de Controle: Fração de Abertura Fração de Abertura: Resposta do TIC31</p>
<p>Controlador TIC31 Setpoint de Temperatura: 20 °C Sinal de Entrada Máx/Mín: 60 °C / 0 °C Sinal de Saída Máx/Mín: 1,0 / 0,1 KC (ganho): 1,0 e KI (constante de integração): 60 seg, Bias: 0,0</p>	

A malha de controle de temperatura atual da EE de São Carlos é composta por um controlador de temperatura de entrega TIC31 que comanda simultaneamente a fração de abertura das válvulas de três vias TV31A e TV31B; e dois controladores de duas posições TIC60A e TIC60B que comandam o acendimento da chama dos aquecedores indiretos de banho F01A e F01B através do monitoramento da temperatura da água.

O setpoint de temperatura do TIC31 é um parâmetro de projeto da estação e não é alterado durante a operação da estação. Os setpoints dos controladores de temperatura da água dos aquecedores TIC60A e TIC60B podem ser alterados em função da condição atual de temperatura e pressão de entrada e da vazão de entrega.

O diagrama esquemático ilustrado na Figura 7 apresenta o modelo numérico da estação de São Carlos-SP com inclusão da malha de controle de temperatura existente com indicação dos locais de tomada de temperatura, do valor ajustado ou setpoint, e dos elementos a serem comandados.

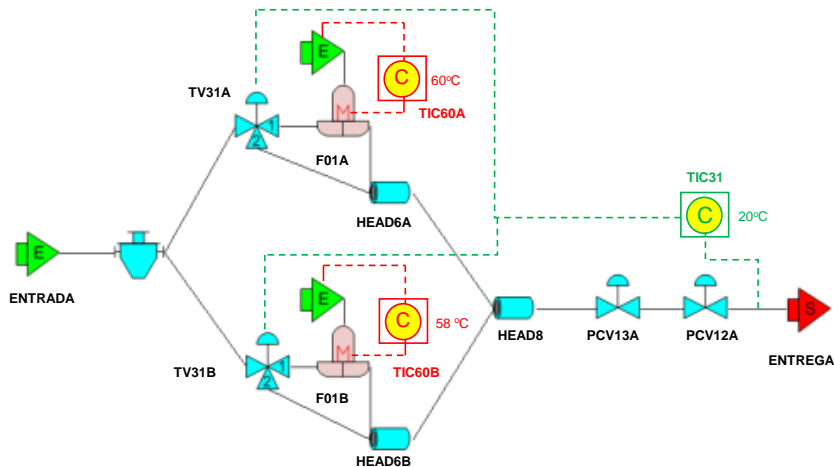


Figura 7. Diagrama do Modelo da EE de São Carlos-SP (Malha de Controle de Temperatura Existente)

O diagrama esquemático ilustrado na Figura 8 apresenta o modelo da estação de São Carlos-SP com a malha de controle de temperatura modificada. Nesta nova configuração fez-se a substituição dos controladores de duas posições TIC60A e TIC60B por um controlador PI denominado TIC33, que comanda a injeção de combustível nos aquecedores F01A/B utilizando como variável de processo a temperatura de entrega da estação.

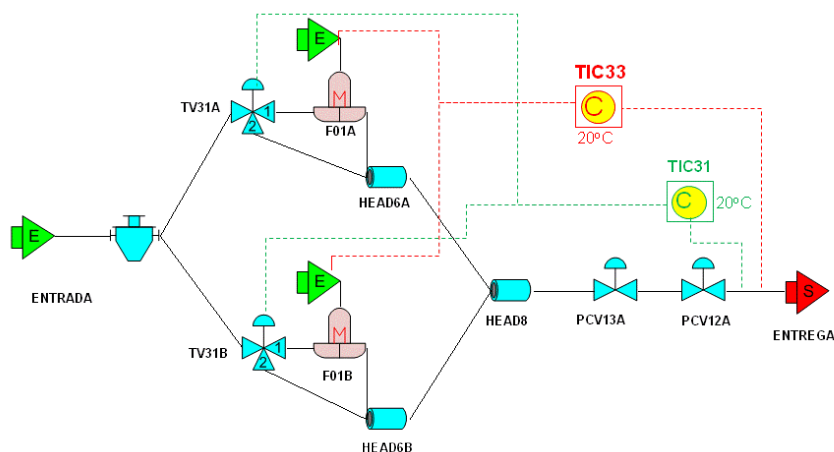


Figura 8. Diagrama do Modelo da EE de São Carlos-SP (Malha de Controle de Temperatura Modificada)

7. Resultados da Simulação com Malha de Controle de Temperatura

Dois cenários dinâmicos foram simulados para avaliar a resposta da malha de controle de temperatura. O primeiro trata do cenário de operação com dois aquecedores operando com vazão de entrega constante (275,000 m³/dia), e o segundo representa um cenário com variação de vazão de entrega de acordo com Figura 9.

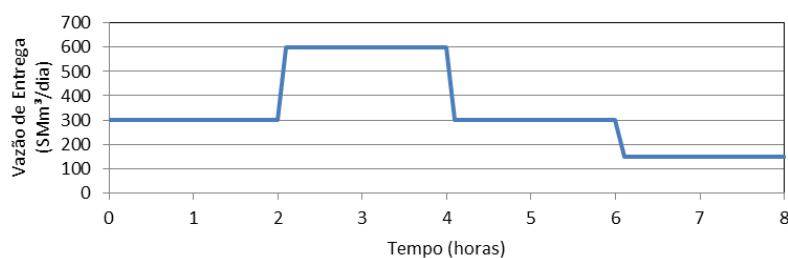


Figura 9. Cenário de Variação de Vazão de Entrega de Gás

No lado esquerdo da Figura 10 apresentam-se as curvas de histórico de temperaturas da água e de saída do gás de processo nos aquecedores para a malha de controle de temperatura existente e modificada. No lado direito da mesma figura são ilustradas a temperatura de entrega e a fração de abertura da válvula de três vias, ou seja, a resposta do controlador TIC31. Nota-se que para a malha de controle existente a resposta do controlador TIC31 fica modulando entre 0,7 e 0,9 durante todo o cenário, devido a funcionamento intermitente e defasado dos aquecedores. Na malha de controle modificada a resposta do controlador TIC31 atinge um ponto de equilíbrio, e os aquecedores não concorrem entre si.

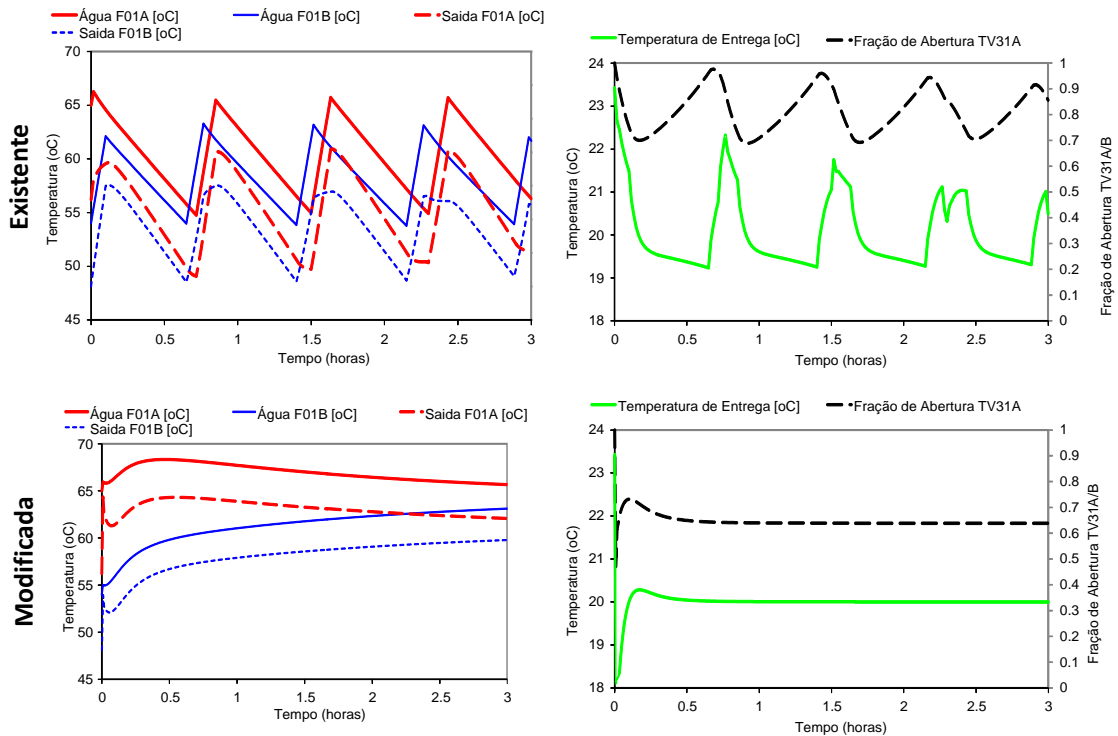


Figura 10. Histórico de temperatura nos aquecedores e temperatura de entrega (Malha de Controle Existente e Modificada – Vazão de Entrega Constante $Q=275.000 \text{ m}^3/\text{dia}$)

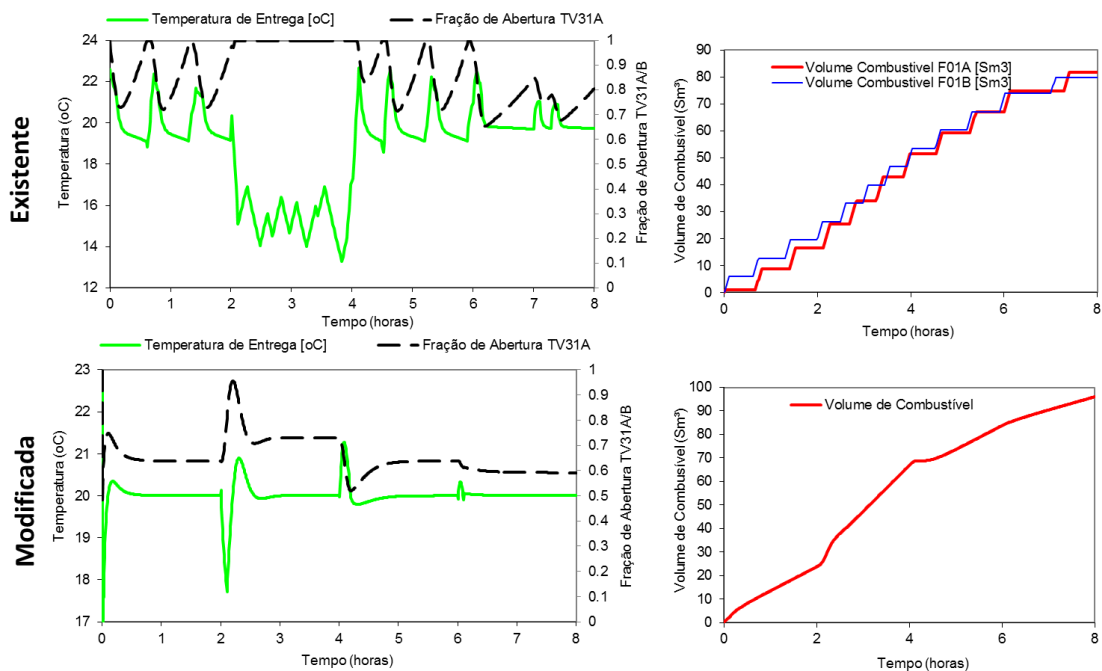


Figura 11. Histórico de temperatura nos aquecedores e temperatura de entrega (Malha de Controle Existente e Modificada – Cenário com Variação de Vazão)

Na Figura 11 é apresentado os resultados do cenário com variação da vazão de entrega de acordo com a Figura 9. A curva de temperatura de entrega e a resposta do controlador são ilustrados no lado esquerdo e o consumo de gás combustível no lado direito. Neste cenário para a malha de controle modificada um consumo adicional de combustível (18,9 %) é necessário para manter a temperatura de entrega regulada em 20 °C. Nota-se no cenário com variação de vazão com malha de controle existente, quando a vazão de entrega aumenta para 600.000 m³/dia não é possível manter a temperatura de entrega regulada em 20 °C sem reajustar a temperatura da água.

7. Comentários Finais

O simulador dinâmico de processos foi desenvolvido para estudar a operação de uma estação de entrega de gás natural existente, e assim investigar cenários de variação de demanda no cliente. Mostrou-se a possibilidade de avaliar o desempenho de uma estação de entrega de gás natural com diferentes tipos de malha de controle e também o consumo de combustível nos aquecedores. Os resultados obtidos demonstraram que a malha de controle modificada permitiria um ganho na flexibilidade operacional desta estação com maior faixa de variação da vazão de entrega, evitando sucessivos reajustes nos *setpoints* de temperatura da água dos aquecedores indiretos.

8. Agradecimentos

A Transportadora Brasil-Bolívia (TBG) e a Petrobrás S.A por viabilizarem a pesquisa e desenvolvimento do simulador de estações de entrega e sua respectiva validação a partir do modelo da Estação de São Carlos-SP.

9. Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2008. Gás natural e outros combustíveis gasosos – Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de Wobbe a partir da composição. ABNT NBR15213.
- ASTRÖM J. K., 2002. Control System Design. Cap 6 p.217. University of California. Santa Barbara.
- BRITO, J. M.; CAMARGO P. R., 2010. Avaliação do sistema de aquecimento de pontos de entrega de gás natural da Petrobrás por meio de simulação dinâmica. IBP3613_10. Rio Oil & Gas Exposition.
- HENRIQUE, R. R; MACHADO, L. B.; PASSOS N. G.; CORREIA L. C. D., 2005. Critério para aplicação e dimensionamento de aquecedores para pontos de entrega de gás. Proceedings of Rio Pipeline Conference & Exposition.
- JURY F. D. 1973. Fundamentals of Three-Mode Controllers. Technical Monograph 28. Fisher-Rosemount.
- INCROPERA, F.P, DEWITT, P. D., 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Cap 8. John Wiley and Sons. NY, USA.
- VAN WYLEN, G. J; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C., 2003. Fundamentals of Thermodynamics. 6th Edition. Editora Edgard Blucher.