

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”. As estações de entrega são fundamentais para proporcionar a regulação e medição do gás para os consumidores (companhias distribuidoras, indústrias e usinas termelétricas), exercendo um importante papel para o cumprimento das metas de crescimento previstas para o Brasil nos próximos anos. O gás natural deve ser entregue aos clientes 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 causando expansão abrupta numa válvula de controle, produzindo uma queda de temperatura proporcional à queda de pressão (Van Wylen e Sonntag, 2003). Em função da queda de pressão requerida, a temperatura de entrega pode atingir valores tão baixos que podem comprometer a segurança operacional da instalação, devido à fragilização dos materiais e formação de condensado. Por esta razão, no projeto das estações de entrega é previsto a instalação de um sistema de pré-aquecimento do gás quando a queda de temperatura for significativa. 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.

A Figura 1.1 ilustra a malha de transporte nacional de gás natural. Nesta figura apresentam-se os gasodutos em operação, em implantação e em estudo. Esta malha é formada por uma rede de gasodutos que escoam gás natural

processado de origem nacional e outra que escoo produto importado, totalizando 8.964,3 km de rede e capacidade de transporte de 176,7 milhões de m³/dia.

Pode-se notar a tendência de expansão e interligação das malhas regionais visando um aumento da oferta e da disponibilidade do gás. Diversos projetos estão sendo desenvolvidos para expansão da infraestrutura de transporte de gás natural no país e deverão entrar em operação até o fim de 2010. Desses projetos destacam-se os empreendimentos integrantes do Projeto Malhas, PLANGÁS (Plano de Antecipação da Produção de Gás) e a expansão do Trecho Sul do GASBOL com aumento da capacidade neste trecho para 5,2 milhões de m³/dia.



Figura 1.1 – Malha de Gasodutos do Brasil (ANP, 2010)

O escoamento de produto importado é principalmente realizado pelo GASBOL (Gasoduto Brasil-Bolívia) que possui 2.593,0 km de extensão no trecho nacional. A capacidade de transporte do GASBOL, de acordo com dados obtidos do Boletim do Gás da Agência Nacional de Petróleo em outubro de 2010 é de 30,0 milhões m³/dia.

Na Tabela 1.1 apresenta a quantidade de estações de entrega em operação no GASBOL pelas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

Em 2009 as reservas nacionais provadas de gás natural ficaram em torno de 358,1 bilhões de m³ sendo em maior percentual concentrado na região Sudeste (45,1%), nos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santos, provenientes da Bacia de Campos. De todo o gás natural descoberto no país, 18,3% é extraído em poços terrestres principalmente no campo de Urucu (AM) e em campos produtores no Estado da Bahia.

Tabela 1.1 – Estações de Entrega de Gás Natural do GASBOL

Região	Número de Estações
Centro-Oeste	3
Sudeste	21
Sul	20
Total	44

Fonte: TBG 2008

O processamento de gás natural ocorre nas UPGNs (unidades de processamento de gás natural) e tem como principal objetivo garantir a especificação do gás para os consumidores finais do produto, o qual passa a denominar-se gás seco ou gás processado. A capacidade nacional de processamento atualmente totaliza 66,5 milhões de m³/dia.

As estações de entrega do GASBOL e operadas pela TBG são classificadas em seis tipos em função de sua capacidade de entrega, de acordo com o projeto da instalação. A

Tabela 1.2 exibe 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 de falha ou de manutenção de equipamentos.

O consumo médio de gás natural utilizado nos aquecedores das estações de tipo IV e V do GASBOL é de 0,3% da capacidade total de transporte. Tomando o consumo máximo nos aquecedores para as 44 estações, o consumo total de combustível é de 150,4 SMm³/dia, maior que a vazão máxima de entrega de uma estação tipo I. Isso reflete numa emissão aproximada de 117,5 mil ton/ano de CO₂ de acordo com dados do site “Carbono Zero”.

Tabela 1.2 – Tipos de Estação de Entrega de Gás por Capacidade do GASBOL

Tipo de Estação	Número de Estações	Vazão Mínima (SMm³/dia)	Vazão Máxima (SMm³/dia)	Consumo Máximo dos Aquecedores (SMm³/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

Fonte: TBG 2010

Na próxima seção, os principais processos em uma estação de entrega são descritos.

1.1. Estação de Entrega de Gás Natural

A Figura 1.2 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 1.3 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 seguir uma descrição de cada processo ilustrado na figura é apresentada.

1.1.1. Filtragem

Analisando a Fig. 1.3, observa-se que na entrada da estação de entrega e à jusante da derivação principal da linha tronco encontra-se a área de filtragem do gás, que tem como principal finalidade é coletar o material particulado e assim

evitar danos aos demais equipamentos da instalação. A área de filtragem é composta por dois tipos de filtros associados: filtro ciclone e filtros cartuchos. O filtro ciclone (FT-01) usa a centrifugação para retirada de particulado acima de 10µm. O particulado fino remanescente é retirado por apenas um dos dois filtros cartuchos em paralelo, um dos filtros é reserva. As válvulas de intertravamento HV-56A/B também estão montadas neste local, a montante de cada filtro cartucho. Existe medição de temperatura do gás recebido da linha tronco (TT-01) e medição pressão no interior do barril do ciclone (PI-01) e a jusante do filtro ciclone (PT-01) e dos filtros cartuchos (PI66A/B).



Figura 1.2 – Foto da Estação de Entrega de São Carlos da TBG (22/05/2010)

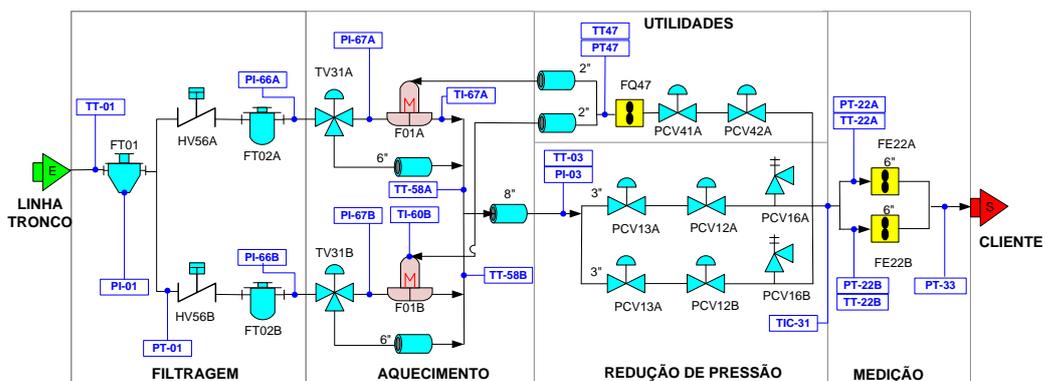


Figura 1.3 – Esquemático de uma Estação de Entrega de Gás

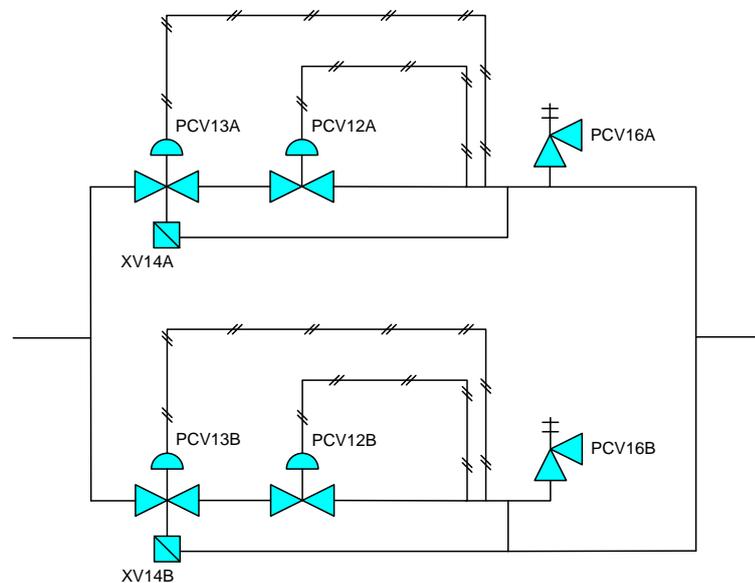
1.1.2. Aquecimento

A partir do sistema de filtragem, o gás segue para o sistema de aquecimento, que tem como objetivo evitar a formação de condensado nas linhas à jusante da redução de pressão, devido à queda de temperatura causada pelo efeito Joule-Thompson (Van Wylen e Sonntag, 2003), além de manter a temperatura de saída do gás dentro da especificação acordada em contrato de fornecimento. 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 manter a temperatura do gás de saída da estação em 20 °C. As duas válvulas de três vias TV-31A/B, uma de cada tramo, são controladas simultaneamente pelo mesmo controlador e indicador de temperatura (TIC-31) situado na saída do sistema de redução de pressão. Ambos os aquecedores possuem uma malha interna de controle de temperatura que permite definir um ponto de ajuste para a temperatura da água (*setpoint* de 60 °C). O controle de temperatura do banho é do tipo “liga-desliga”, e oscila em torno do valor ajustado com um desvio aproximado de ± 4 °C.

1.1.3. Redução e Controle de Pressão

O gás que sai da área de aquecimento é enviado a área de redução e controle de pressão. Esta área possui dois tramos dispostos em paralelo: um principal e outro reserva. O tramo de redução e controle de pressão é composto por duas válvulas de controle auto-operada (reguladora e monitora) e uma válvula de alívio de mola. Cada tramo tem capacidade para operar com a vazão máxima de projeto, sendo que o tramo reserva entra apenas em operação em caso de falha operacional do tramo principal. No esquemático da Figura 1.4 podemos ver a localização das tomadas pneumáticas e os *setpoints* de pressão para os tramos principal e reserva. As válvulas PCV12A/B são reguladoras e PCV13A/B são as monitoras. A válvula PCV12A/B é do tipo “Fail Open” (F.O) e abre completamente permitindo que a válvula monitora, situada a montante, faça o controle da pressão. A válvula

PCV13 é do tipo “*Fail Close*” (F.C.) e em caso de falha fecha o tramo permitindo que o tramo reserva passe a ser atuante. Caso a pressão se eleve até atingir o valor de 40 kgf/cm^2 , a válvula de alívio de mola PSV16A/B, instalada após a reguladora descarrega o gás para a atmosfera. A válvula de alívio é projetada apenas para aliviar uma pequena sobrepressão para atmosfera. Se a pressão continuar a subir a chave de intertravamento XV14A, situada na válvula PCV13, isola o tramo quando a pressão atinge *setpoint*. A principal diferença entre os tramos principal e reserva está no fato da válvula reguladora do tramo reserva PCV12B estar ajustada abaixo do *setpoint* da válvula reguladora do tramo de principal PCV12A. Isto garante que PCV12B sempre fique fechada durante a operação normal. Na área de redução de pressão existem válvulas de segurança que interrompem o fluxo de gás quando a pressão ultrapassa um determinado limite (*setpoint*), o qual é configurado de forma a garantir a segurança operacional da instalação.



**Figura 1.4 – Esquemático da Área de Redução de Pressão
(Tramo Principal A e Reserva B)**

1.1.4. Controle de Gás Combustível

A área de controle de gás é responsável pelo fornecimento de gás combustível para queima nos aquecedores e também para pressurização dos instrumentos pneumáticos de controle dos aquecedores, para atuação da válvula de três vias (TV-31) e para o controlador e indicador de temperatura (TIC-31).

Na área de controle de gás combustível existem válvulas de controle que regulam a pressão e a vazão do gás enviada aos trocadores de calor. Os gases resultantes da queima são descartados do aquecedor diretamente para atmosfera.

Este sistema também opera com dois tramos, sendo seu princípio de operação o mesmo do sistema de redução e controle de vazão. Uma válvula de alívio PSV44 atua em caso de elevação de pressão na saída da controladora. O consumo de gás nos aquecedores é medido através de um rotâmetro localizado a jusante da válvula de alívio.

1.1.5. Medição

Na última área ocorre a medição da vazão de gás através de medidores do tipo turbina, ultrassom, rotativo ou placa de orifício. Estes medidores enviam os dados para um computador de vazão. O computador de vazão obtém os valores de temperatura e pressão locais para o cálculo da vazão volumétrica na condição padrão (20°C e 1 atm).

O gás proveniente do sistema de redução de pressão passa primeiro pelo retificador que tem a função de estabilizar o perfil do fluxo direcionado as turbinas FE22A/B. Após a passagem pela turbina ocorrem as tomadas de temperatura TI-22A/B/C e pressão PI-22 A/B/C. Os valores de pressão, temperatura e vazão são enviados ao computador de vazão, onde é feito o cálculo da vazão nas condições de referência. O computador de vazão recebe diariamente a composição média do gás necessária para o cálculo do fator de compressibilidade, fundamentais para o cálculo das vazões nas condições contratuais. O sistema de medição é a última etapa do processo da estação de entrega. Após a medição os dois tramos se unem compondo a linha de envio de gás ao cliente. Esta linha possui um transmissor PT-33 que fornece ao sistema supervisorio a pressão do gás de saída.

1.2. Objetivo

Simulação do escoamento de gás e dos processos dinâmicos dentro de uma estação de entrega de gás natural com ênfase na reprodução do comportamento termohidráulico transiente do sistema de pré-aquecimento e da malha de controle

de temperatura de entrega. Para alcançar este objetivo foi necessário o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação em linguagem C++ com código extensível que permitisse a criação de modelo de equipamentos não convencionais como o filtro ciclone e o aquecedor indireto de banho de água.

1.3. Metodologia

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada durante a pesquisa e desenvolvimento do simulador dinâmico de processos para estações de entrega de gás natural e sua aplicação em engenharia. A seguir a seqüência de atividades realizadas nesta dissertação:

1. 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)
5. Simulação dos cenários de falha de equipamentos como o apagamento de aquecedores e seu impacto no fornecimento de gás natural.
6. Estudos complementares realizados com a malha de controle de temperatura de entrega com variação da demanda de gás e avaliação do consumo de gás combustível nos aquecedores.

1.4. Organização do Manuscrito

O presente manuscrito encontra-se organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, visando situar o presente trabalho no estado da arte existente. As equações de estado e relações utilizadas para o cálculo das propriedades termodinâmicas do gás natural são apresentadas no Capítulo 3. A formulação matemática dos equipamentos é apresentada no Capítulo 4 juntamente com alguns detalhes de implementação numérica. No Capítulo 5 são discutidos os casos de testes utilizados para validação das equações empregadas no simulador. No Capítulo 6 é abordada a modelagem de uma estação de entrega de gás natural existente com comparação dos resultados obtidos com dados coletados no sistema supervisorio. No Capítulo 7 é apresentado os resultados dos cenários dinâmicos da estação de entrega com malha de controle de temperatura de entrega existente e também sugestões de melhorias nesta malha. Finalmente no Capítulo 8 encontram-se as conclusões obtidas assim como recomendações para trabalhos futuros. O simulador desenvolvido é descrito no Apêndice A, juntamente com um caso de teste para demonstração da metodologia de cálculo empregada, e no Apêndice B são apresentados os catálogos de equipamentos usados para a confecção do modelo numérico da estação de entrega existente.