



Claudio Veloso Barreto

Simulação Numérica do Escoamento em Estações de Entrega de Gás Natural

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Angela Ourivio Nieckele

Co-Orientador: Luis Fernando Gonçalves Pires

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011



Claudio Veloso Barreto

Simulação Numérica do Escoamento em Estações de Entrega de Gás Natural

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dr. Luis Fernando Gonçalves Pires

Co-Orientador

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - Ctex

Dr. João Paulo de Barros Leite

TRANSPETRO S.A

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de fevereiro de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Claudio Veloso Barreto

Graduou-se em Engenharia Industrial Mecânica no CEFET-RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca) em 2003. É coordenador de pesquisa do laboratório SIMDUT (Núcleo de Simulação Termohidráulica de Dutos) vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Instrutor no curso de simulação de escoamento em dutos oferecido anualmente pelo CCE/PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Barreto, Claudio Veloso

Simulação numérica do escoamento em estações de entrega de gás natural / Claudio Veloso Barreto ; orientadores: Angela Ourivio Nieckele, Luis Fernando Gonçalves Pires. – 2011.

139 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.
Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Estações de entrega de gás natural. 3. Simulação de processos dinâmicos. 4. Aquecedores de gás indiretos de banho de água. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pires, Luis Fernando Gonçalves. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A minha esposa Daniele, pelo amor, carinho e dedicação imensuráveis.

A minha filha Sarah, fonte de alegria e conforto nas horas em que precisei recarregar as baterias.

Aos meus pais Claudio e Maria Inez, que me ensinaram o valor da família e apoio para minha formação acadêmica.

Aos professores orientadores Luis Fernando G. Pires e Angela O. Nieckele pela orientação e pela oportunidade.

A todos os professores que compuseram o quadro de aulas oferecidas.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

A Transportadora Brasil-Bolívia (TBG) e a Petrobrás S.A por viabilizarem a pesquisa e desenvolvimento do simulador e criação do tema desta dissertação.

E a todos que, de alguma forma, me ajudaram a concluir mais este objetivo.

Resumo

Barreto, Claudio Veloso; Nieckeke, Angela O. Nieckeke; Pires, Luis Fernando G. **Simulação Numérica do Escoamento em Estações de Entrega de Gás Natural**, 2011. 139p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Análise numérica do processo dinâmico do escoamento de gás natural em estações de entrega, considerando o comportamento transiente dos principais equipamentos existentes, tais como válvula de três vias, válvulas redutoras de pressão e aquecedores de gás. Desenvolvimento da lógica de controle dinâmica (controle PID - proporcional-integral-derivativo) de todos os equipamentos relevantes. Para determinação das propriedades termodinâmicas do gás natural empregou-se as equações de estado Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong. O estudo apresenta um maior enfoque na análise do comportamento de aquecedores de gás indireto a banho d'água e na regulação dinâmica da temperatura de entrega através de um controlador PID que comanda a válvula de três vias. Investigou-se o desempenho de uma estação de entrega de gás natural existente baseada nas condições operacionais estabelecidas no projeto. Simulou-se o escoamento correspondente a operação em uma estação de entrega real e realizou-se comparação direta com dados de instrumentação enviados ao supervisor de controle e aquisição de dados (SCADA). A metodologia desenvolvida reproduziu de forma adequada a operação em condições normais da estação de entrega de São Carlos-SP e eventos anormais como cenários de apagamento dos aquecedores que foram registrados no banco de dados do supervisor. Finalmente analisaram-se procedimentos a serem aplicados nas estações de entrega existentes para redução do consumo do gás combustível utilizado no processo de pré-aquecimento.

Palavras-chave

Estações de Entrega de Gás Natural; Simulação de Processos Dinâmicos; Aquecedores de Gás Indiretos de Banho de Água.

Abstract

Barreto, Claudio Veloso; Niecke, Angela O. Niecke (Advisor); Pires, Luis Fernando G. (Co-Advisor) **Numerical Simulation of Natural Gas Flow in Citygate Stations**, 2011. 139p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Numerical simulation of the dynamic process of natural gas flow through citygate stations, considering the transient behavior of the main existing equipments, such as three-way-valves, pressure reduction valves and gas heaters. Development of the dynamic control logic (PID controller) of all relevant equipments. To determine the natural gas thermodynamic properties, the equations of state of Peng-Robinson and Soave-Redlich-Kwong were employed. The study concentrates in the analysis of indirect fired water bath heater and in the delivery temperature regulation using a PID controller that commands the three-way-valve. It was investigated the performance of an existing natural gas citygate station based on established design operational conditions. The flow field corresponding to an operational natural gas city gate station was determined and direct comparison with instrumentation data sent to supervisory control and data acquisition (SCADA) was performed. The methodology developed reproduced in a satisfactory way the normal operational condition of the São Carlos-SP natural gas citygate station and abnormal events such as the heater shut-down scenarios registered on SCADA database. Finally, procedures to be applied in existing delivery stations for the reduction of gas fuel consumption in the pre-heating process were analyzed.

Keywords

Natural Gas Citygate Stations; Dynamic Process Simulation; Indirect Fired Water Bath Heaters.

Sumário

1. Introdução	21
1.1. Estação de Entrega de Gás Natural	24
1.1.1. Filtragem	24
1.1.2. Aquecimento	26
1.1.3. Redução e Controle de Pressão	26
1.1.4. Controle de Gás Combustível	27
1.1.5. Medição	28
1.2. Objetivo	28
1.3. Metodologia	29
1.4. Organização do Manuscrito	30
2. Revisão Bibliográfica	31
3. Propriedades Termodinâmicas	34
3.1. Equações de Estado	34
3.1.1. Equação de Soave-Redlich-Kwong	35
3.1.2. Equação de Peng-Robinson	36
3.1.3. Propriedades de Mistura	37
3.1.3.1. Regra de Combinação Clássica de Van de Waals	37
3.1.3.2. Propriedades de Substância Pura e de Mistura	38
3.2. Viscosidade Absoluta	39
3.3. Propriedades Térmicas	39
3.3.1. Processo Termodinâmico com Variação de Pressão e Temperatura	41
3.3.2. Processo Isobárico à Pressão Zero (Gás Perfeito)	42
3.3.3. Processo Isotérmico	46
3.4. Processo Iso-entálpico e Efeito Joule-Thompson	46

4. Modelagem Matemática e Numérica	48
4.1. Balanço nos Nós	49
4.2. Modelos de Equipamentos Estáticos, Dinâmicos e Transientes	50
4.3. Condições de Contorno: Pontos de Entrada e Saída de Gás	51
4.4. Válvulas de Controle para Redução de Pressão	52
4.4.1. Curvas Características de Válvulas de Controle	54
4.5. Filtros Ciclones	56
4.6. Dutos Cilíndricos Aéreos	57
4.7. Aquecedores/Resfriadores Simplificado	61
4.8. Aquecedores Indiretos de Banho	62
4.8.1. Temperatura de saída do aquecedor (TSAIB)	65
4.8.2. Temperatura da água usando Runge-Kutta (TARK4)	66
4.8.3. Controle de Duas Posições de Acendimento da Chama	67
4.9. Válvulas de Três Vias de Fluxo Divergente	68
4.10. Controlador Proporcional-Derivativo-Integrativo	69
4.11. Método para Solução do Sistema de Equações Não Lineares	71
5. Validação do Simulador de Estações de Entrega	74
5.1. Efeito Joule-Thomson nas Válvulas e Fluxo de Calor Requerido nos Aquecedores.	74
5.2. Cálculo da vazão e da queda de pressão num escoamento adiabático compressível	82
6. Modelagem de uma Estação de Entrega de Gás Natural Existente	85
6.1. Condição de Entrada e Composição do Gás Natural	85
6.2. Descrição dos Equipamentos	88
6.2.1. Filtro Ciclone	88
6.2.2. Válvula de Três Vias	89
6.2.3. Aquecedores Indiretos de Gás de Banho de Água	90

6.2.4. Tubulação de 6” na Saída do <i>By-pass</i> dos Aquecedores	93
6.2.5. Tubulação de 8” entre Aquecimento e a Redução de Pressão	93
6.2.6. Válvula Redutora de Pressão – Monitora	94
6.2.7. Válvula Redutora de Pressão - Reguladora	95
6.3. Comparação com Condições Operacionais de Projeto	97
6.4. Cenários Dinâmicos na Estação de Entrega sem Malha de Controle de Temperatura (comparação com dados do SCADA)	99
6.4.1. Operação com Dois Aquecedores	100
6.4.2. Apagamento de um Aquecedor	105
7. Cenários Dinâmicos com Malha de Controle de Temperatura	110
7.1. Malha de Controle Existente	110
7.1.1. Controlador Tipo PI para Temperatura de Entrega (TIC31)	111
7.1.2. Cenário com Dois Aquecedores – Vazão Constante	112
7.1.3. Controlador de Duas Posições para Temperatura do Banho (TIC60A/B)	113
7.1.4. Cenário com Dois Aquecedores - Variação da Vazão de Entrega	114
7.2. Malha de Controle de Temperatura Modificada	116
7.2.1. Controlador PI de Vazão de Combustível (TIC33)	117
7.2.2. Cenário com Dois Aquecedores – Vazão Constante	117
7.2.3. Cenário com Dois Aquecedores - Variação da Vazão de Entrega	119
8. Conclusões e Recomendações	121
Referências Bibliográficas	124
Apêndice A. Descrição do Simulador	127
A.1. Rotinas Iterativas e Módulos de Solução	127
A.2. Demonstração da Rotina Iterativa Estática	131
A.2.1. Módulo de Pressão – Caso de Teste	132
A.2.2. Módulo de Temperatura – Caso de Teste	133

A.2.3. Módulo de Composição – Caso de Teste	134
A.2.4. Resultados Obtidos no Caso de Teste	135
Apêndice B. Catálogos e Folha de Dados dos Equipamentos	137

Lista de figuras

Figura 1.1 – Malha de Gasodutos do Brasil (ANP, 2010)	22
Figura 1.2 – Foto da Estação de Entrega de São Carlos da TBG (22/05/2010)	25
Figura 1.3 – Esquemático de uma Estação de Entrega de Gás	25
Figura 1.4 – Esquemático da Área de Redução de Pressão	27
Figura 3.1 – Processo termodinâmico com qualquer variação de pressão e temperatura	41
Figura 3.2 – Algoritmo de cálculo da temperatura variando pressão e entalpia $T_q(p,h)$	42
Figura 3.3 – Variação do calor molar com a temperatura (Gás perfeito)	43
Figura 3.4 – Variação da entalpia molar com a temperatura (Gás perfeito)	44
Figura 3.5 – Variação da entropia molar com a temperatura (Gás Perfeito)	45
Figura 3.6 – Algoritmo de cálculo da temperatura no processo isobárico a pressão zero $T_p(h)$	45
Figura 3.7 – Comparação de curvas de inversão Joule-Thompson do metano	47
Figura 4.1 – Balanço em um nó com cinco elementos	50
Figura 4.2 – Condições de Contorno: Pontos de Entrada e Saída de Gás	52
Figura 4.3 – Modelo Dinâmico da Válvula de Controle	52
Figura 4.4 – Tipos de Obturadores de Válvula de Controle Globo [Fonte: Valvugás]	55
Figura 4.5 – Curvas Características de Válvula de Controle	55
Figura 4.6 – Filtro ciclone em corte com indicação das dimensões	56
Figura 4.7 – Modelo Estático do Filtro Ciclone	57
Figura 4.8 – Modelo do Duto Aéreo	58
Figura 4.9 – Coeficiente Externo de Troca para Dutos Aéreos ($D_{ex} = 8''$ e $Pr_{ar} = 0,71$)	61

Figura 4.10 – Modelo do Aquecedor/Resfriador Simplificado	61
Figura 4.11 – Visão em Corte do Aquecedor Indireto de Banho	63
Figura 4.12 – Modelo Esquemático Aquecedor Indireto de Banho	63
Figura 4.13 – Eficiência de Combustão em Aquecedores de Chama Indireta (Fonte: API-12K, Apêndice C, pág 22)	65
Figura 4.14 – Algoritmo da Temperatura de Saída do Aquecedor Indireto (TSAIB)	66
Figura 4.15 – Algoritmo da Temperatura da Água usando Método RK-4 (TARK4)	66
Figura 4.16 – Lógica de Controle de Duas Posições de Acendimento da Chama	67
Figura 4.17 – Modelo esquemático da válvula de três vias (esquerdo) e visão em corte (direiro) [Fonte: Válvugas]	68
Figura 4.18 – Curvas de Igual Percentagem para Cv1 e Cv2 (Válvula de Três Vias Divergente)	68
Figura 4.19 – Diagrama de um Controlador PID Convencional	69
Figura 4.20 – Controlador de Temperatura de Entrega (Sistema de Pré-Aquecimento)	71
Figura 4.21 – Algoritmo do Método de Newton – Pacote KINSOL	73
Figura 5.1 – Diagrama esquemático do exemplo 1	75
Figura 5.2 – Ganho de Temperatura vs Fluxo de Calor no Aquecedor (Peng-Robinson)	76
Figura 5.3 – Ganho de Temperatura vs Fluxo de Calor no Aquecedor (Soave-Redlich-Kwong)	77
Figura 5.4 – Queda de Temperatura vs Queda de Pressão na Válvula (Peng-Robinson)	77
Figura 5.5 – Queda de Temperatura vs Queda de Pressão na Válvula (Soave-Redlich-Kwong)	78
Figura 5.6 – Curvas isotermas para o fator de compressibilidade (Gás 1 – Peng-Robinson)	79
Figura 5.7 – Curvas isotermas para o fator de compressibilidade (Gás 3 – Peng-Robinson)	79

Figura 5.8 – Coeficiente J-T vs Pressão de Entrada (Gás 1)	80
Figura 5.9 – Coeficiente J-T vs Pressão de Entrada (Gás 3)	80
Figura 5.10 – Coeficiente J-T vs Temperatura de Entrada (Gás 1)	81
Figura 5.11 – Coeficiente J-T vs Temperatura de Entrada (Gás 3)	81
Figura 5.12 – Diagrama esquemático do exemplo 2 (Parâmetro de Entrada)	83
Figura 6.1– Esquemático do Modelo de Simulação da Estação de Entrega de São Carlos	87
Figura 6.2– Filtro Ciclone FT01	88
Figura 6.3– Válvulas Controle de Três Vias TV31A/B	89
Figura 6.4 – Curva CV X Fração de Abertura para Saída 1 – Válvula PARCOL 6pol	90
Figura 6.5 – Curva CV X Fração de Abertura para Saída 2 – Válvula PARCOL 6pol	90
Figura 6.6 – Aquecedores de Gás F01A/B	91
Figura 6.7 – Curva CV X Fração de Abertura– Válvula Reflux 819 (3’’)	95
Figura 6.8 – Curva CV X Fração de Abertura– Válvula Aperflux 851 (3’’)	96
Figura 6.9.– Resultados do Regime Permanente na Condição Máxima	98
Figura 6.10 – Cenário de Temperatura de Entrada e Vazão de Saída da EE	101
Figura 6.11 – Cenário de Vazão de Combustível nos Aquecedores F01A/B	101
Figura 6.12 – Históricos de temperatura na saída do by-pass dos aquecedores (SIMGAS e SCADA – 02 aquecedores)	102
Figura 6.13 – Históricos de temperatura da água nos aquecedores (SIMGAS e instrumentos locais – 02 aquecedores)	102
Figura 6.14 – Históricos de temperatura de entrada e saída do HEAD8 (SIMGAS e SCADA)	103
Figura 6.15 – Históricos de temperatura de entrega (SIMGAS e SCADA)	104
Figura 6.16 – Variação do coeficiente JT com a temperatura de entrega (SIMGAS e SCADA - 02 aquecedores)	105
Figura 6.17 – Cenário de Temperatura de Entrada (Linha Tronco)	106

Figura 6.18 – Cenário de Vazão de Combustível nos Aquecedores F01A/B	107
Figura 6.19 – Históricos de temperatura na saída do by-pass dos aquecedores (Apagamento do aquecedor F01A)	107
Figura 6.20 – Históricos de temperatura da água dos aquecedores (Apagamento do aquecedor F01A)	108
Figura 6.21 – Históricos de temperaturas na entrada e na saída do HEAD8 (Apagamento do aquecedor F01A)	108
Figura 6.22 – Históricos de temperaturas de entrega (Apagamento do aquecedor F01A)	109
Figura 7.1 – Diagrama da Malha de Controle de Temperatura Existente	111
Figura 7.2 – Histórico de vazão e temperaturas nos aquecedores e na entrada da PCV12A (Malha de Controle Existente – Dois Aquecedores)	112
Figura 7.3 – Histórico de temperatura de entrega e fração de abertura das válvulas TV31A/B (Malha de Controle Existente – Dois Aquecedores)	113
Figura 7.4 – Histórico de consumo de combustível nos aquecedores (Malha de Controle Existente – Dois Aquecedores)	113
Figura 7.5 – Histórico de vazão e temperaturas nos aquecedores e na entrada da PCV12A (Malha Existente - Variação da Vazão de Entrega)	115
Figura 7.6 – Histórico de temperatura de entrega e fração de abertura das válvulas TV31A/B (Malha Existente - Variação da Vazão de Entrega)	115
Figura 7.7 – Histórico de consumo de combustível nos aquecedores (Malha Existente - Variação da Vazão de Entrega)	116
Figura 7.8 – Diagrama da Malha de Controle de Temperatura Modificada	116
Figura 7.9 – Histórico de vazão e temperaturas nos aquecedores e na entrada da PCV12A (Malha de Controle Modificada – Dois Aquecedores)	118
Figura 7.10 – Histórico de temperatura de entrega e fração de abertura das válvulas TV31A/B (Malha de Controle Modificada – Dois Aquecedores)	118
Figura 7.11 – Histórico de consumo de combustível nos aquecedores (Malha de Controle Modificada – Dois Aquecedores)	119
Figura 7.12 – Histórico de vazão e temperaturas nos aquecedores e na entrada da PCV12A (Malha Modificada – Variação da Vazão de Entrega)	119

Figura 7.13 – Histórico de temperatura de entrega e fração de abertura das válvulas TV31A/B (Malha Modificada – Variação da Vazão de Entrega)	120
Figura 7.14 – Histórico de consumo de combustível nos aquecedores (Malha Modificada – Variação da Vazão de Entrega)	120
Figura A.1 – Fluxograma de Ações – Rotina Interativa Estática	128
Figura A.2 – Fluxograma de Ações – Rotina Iterativa Dinâmica	131
Figura A.3 – Parâmetros de Entrada do Caso de Teste	132
Figura B.1 - Catálogo da Válvula de Controle Pietro Fiorentini (www.fiorintini.com).	137
Figura B.2- Catálogo da Válvula de Três Vias PARCOL 1-8113 (www.parcol.com)	138
Figura B.3 - Folha de Dados dos Aquecedores F01A/B	139

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Estações de Entrega de Gás Natural do GASBOL	23
Tabela 1.2 – Tipos de Estação de Entrega de Gás por Capacidade	24
Tabela 3.1 – Propriedades de Substância Pura das Espécies Químicas	38
Tabela 4.1 – Classificação e Variáveis de Cenários dos Modelos de Equipamentos	51
Tabela 4.2 – Tipos de filtros ciclones e suas relações geométricas	56
Tabela 4.3 – Parâmetros empíricos para dimensionamento de gasodutos	59
Tabela 5.1 – Frações Molares das Composições de Gás Natural do Exemplo 1	75
Tabela 5.2 – Comparação entre simuladores SIMGAS e TGNET (exemplo 2)	84
Tabela 6.1 – Composição do Gás Natural do GASBOL (20-05-2010)	86
Tabela 6.2 – Propriedades do Gás Calculadas pelo SIMGAS e obtidas do SCADA	88
Tabela 6.3 – Regime Permanente para Condição Máxima Operacional	99
Tabela 7.1 – Cenário de Variação de Vazão de Entrega	114
Tabela A.1 – Critério de Convergência dos Módulos de Solução	130
Tabela A.2 – Erro Máximo por Iteração (Caso de Teste)	135
Tabela A.3 – Resultados nos Aquecedores (Caso de Teste)	136
Tabela A.4 – Resultados nos Pontos de Entrada e Saída (Caso de Teste)	136

Nomenclatura

- ρ Massa específica (kg/m³)
 p Pressão absoluta (Pa)
 T Temperatura absoluta (K)
 M_g Massa molecular do gás de mistura (kg/kmol)
 Z Fator de compressibilidade
 \mathcal{R} Constante universal dos gases perfeitos. $\mathcal{R} = 8,3145 \text{ J/mol.K}$
 v Volume específico (m³/kg)
 v Volume específico molar (m³/kmol)
 a, b, m Coeficientes da equação de estado
 p_c Pressão crítica absoluta (Pa)
 T_c Temperatura crítica absoluta (K)
 ω Fator acêntrico
 A, B Coeficientes da equação de estado na forma $Z(p, T)$
 ϕ_g Propriedade de mistura do gás
 ϕ_i Propriedade da espécie i
 X Fração ou percentual molar
 k_{ij} Constante empírica de interação binária
 a_g Coeficiente a da equação de estado para mistura
 a_i, a_j Coeficiente a da equação de estado espécie i , espécie j
 X_i, X_j Fração molar para espécie i , espécie j
 μ_g Viscosidade absoluta do gás (cP)
 A_μ, B_μ, C_μ Coeficientes da viscosidade
 u Energia interna molar (kJ/kmol) ou específica (kJ/kg)
 h Entalpia molar (kJ/kmol) ou específica (kJ/kg)
 s Entropia molar (kJ/kmol.K) ou específica (kJ/kg.K)
 T_{ref} Temperatura de referência ($T_{ref}=300 \text{ K}$)
 p_{ref} Pressão de referência ($p_{ref}=101325 \text{ Pa}$)
 T_{std} Temperatura padrão ($T_{std}= 20\text{oC}$)
 Δu Variação de energia interna molar (kJ/kmol)
 Δh Variação de entalpia molar (kJ/kmol)

- Δs Variação de entropia molar (kJ/kmol.K)
- iter* Contador de iteração numérica
- C_p Calor molar a pressão constante (kJ/kmol.K) ou específico (kJ/kg.K)
- $C_1 \dots C_5$ Coeficientes do calor molar
- Δh_p Variação de entalpia molar – processo a pressão zero (kJ/kmol)
- Δu_p Variação de energia interna – processo a pressão zero (kJ/kmol)
- Δh_T Variação de entalpia molar – processo isotérmico (kJ/kmol)
- Δu_T Variação de energia interna – processo isotérmico (kJ/kmol)
- C_v Calor molar a volume constante (kJ/kmol.K) ou específico (kJ/kg.K)
- μ_{JT} Coeficiente Joule-Thomson
- p_{std} Pressão padrão ($p_{std} = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$)
- \dot{M} Vazão molar (kmol/s)
- M_i Massa molecular da espécie *i* (kg/kmol)
- M_{ar} Massa molecular do ar seco ($M_{ar} = 28,9626 \text{ kg/kmol}$)
- \dot{m} Vazão em massa (kg/s)
- ρ_{std} Massa específica padrão (kg/Sm³)
- Q_{std}, Q Vazão volumétrica padrão (Sm³/s). (1 Sm³/s = 86.4 SMm³/dia)
- q_g Fluxo de calor transferido ao gás (kJ/s)
- f_o Fração de abertura
- T_∞ Temperatura ambiente (°C)
- T_a Temperatura da água (°C)
- $T_{a_{máx}}$ Temperatura máxima da água (°C)
- $T_{a_{mín}}$ Temperatura mínima da água (°C)
- K_p Coeficiente de perda de pressão
- C_v Coeficiente de vazão da válvula (gpm/psi^{0.5})
- γ_g Densidade do gás relativa ao ar (M_g/M_{ar}).
- λ_g Razão de calores específicos do gás (C_p / C_v).
- Y Fator de expansão do gás
- λ_{ar} Razão de calores específicos do ar à 60oF e 1 atm. $\lambda_{ar}=1,4$
- F_λ Razão de calores específicos do gás e do ar
- D Diâmetro externo (m)
- D_i Diâmetro interno (m)
- Δp Diferencial de pressão no elemento (kPa)

- g Aceleração da gravidade. $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.
- v_1 Velocidade na entrada do elemento (m/s)
- v_2 Velocidade na saída do elemento (m/s)
- q_∞ Fluxo de calor transferido ao ambiente (kJ/s)
- L Comprimento do duto (m)
- Ru Rugosidade superficial (m)
- f Fator de atrito de Colebrook
- U Coeficiente global de transferência de calor ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
- $Rt_{\text{aço}}$ Resistência térmica do duto de aço ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)
- Rt_{rev} Resistência térmica dos revestimentos ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)
- $k_{\text{aço}}$ Condutividade térmica do aço ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
- h_i Coeficiente interno de troca de calor por convecção ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
- h_{ex} Coeficiente externo de troca de calor por convecção ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
- Pr** Número de Pradtl
- Nu_i** Número de Nusselt Interno
- Nu_{ex}** Número de Nusselt Externo
- Re** Número de Reynolds
- qa Calor transferido da água para o gás (kJ/s)
- qb Calor de combustão (kJ/s)
- m_a Massa de água (kg)
- Cp_a Calor específico da água (kJ/kg)
- PCI_g Poder calorífico inferior molar do gás
- η_b Eficiência de combustão
- \dot{m}_b Fluxo de massa do gás de combustão (kg/s)
- $E(t)$ Erro do controlador
- $S(t)$ Setpoint do controlador
- $C(t)$ Variável de controle
- $X(t)$ Resposta do controlador
- K_C Constante de proporcionalidade do controlador
- K_I Constante de integração do controlador
- K_D Constante derivativa do controlador
- B_o Bias do controlador
- $P(t)$ Resposta proporcional do controlador

- $I(t)$ Resposta integral do controlador PID
 $D(t)$ Resposta derivativa do controlador PID

Subscritos

- c Ponto Crítico
 g Propriedade da mistura de gás
 std Padrão ou *standard*
 i,j Índice da espécie química
 e Entrada do elemento
 s Saída do elemento
 ar Ar seco
 $máx$ Máximo
 $mín$ Mínimo
 JT Joule-Thomson
 μ Viscosidade
 ref Referência
 ∞ Ambiente
 set Ponto de ajuste ou *setpoint*
 in Interno
 ex Externo