



**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; Nieckele, Angela O. Nieckele; 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<br>(Fonte: API-12K, Apêndice C, pág 22)      | 65 |
| Figura 4.14 – Algoritmo da Temperatura de Saída do Aquecedor Indireto<br>(TSAIB)                                    | 66 |
| Figura 4.15 – Algoritmo da Temperatura da Água usando Método RK-4<br>(TARK4)  | 66 |
| Figura 4.16 – Lógica de Controle de Duas Posições de<br>Acendimento da Chama  | 67 |
| Figura 4.17 – Modelo esquemático da válvula de três vias (esquerdo)<br>e visão em corte (direiro) [Fonte: Válvugas] | 68 |
| Figura 4.18 – Curvas de Igual Percentagem para Cv1 e Cv2<br>(Válvula de Três Vias Divergente)                       | 68 |
| Figura 4.19 – Diagrama de um Controlador PID Convencional   | 69 |
| Figura 4.20 – Controlador de Temperatura de Entrega<br>(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<br>no Aquecedor (Peng-Robinson)                                 | 76 |
| Figura 5.3 – Ganho de Temperatura vs Fluxo de Calor<br>no Aquecedor (Soave-Redlich-Kwong)                           | 77 |
| Figura 5.4 – Queda de Temperatura vs Queda de Pressão<br>na Válvula (Peng-Robinson)                                 | 77 |
| Figura 5.5 – Queda de Temperatura vs Queda de Pressão<br>na Válvula (Soave-Redlich-Kwong)                           | 78 |
| Figura 5.6 – Curvas isotermas para o fator de compressibilidade<br>(Gás 1 – Peng-Robinson)                          | 79 |
| Figura 5.7 – Curvas isotermas para o fator de compressibilidade<br>(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 ( <a href="http://www.fiorintini.com">www.fiorintini.com</a> ).                | 137 |
| Figura B.2- Catálogo da Válvula de Três Vias PARCOL 1-8113 ( <a href="http://www.parcol.com">www.parcol.com</a> )                             | 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

- $\rho$  Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)  
 $p$  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 (m<sup>3</sup>/kg)  
 $v$  Volume específico molar (m<sup>3</sup>/kmol)  
 $a, b, m$  Coeficientes da equação de estado  
 $p_c$  Pressão crítica absoluta (Pa)  
 $T_c$  Temperatura crítica absoluta (K)  
 $\omega$  Fator acêntrico  
 $A, B$  Coeficientes da equação de estado na forma  $Z(p, T)$   
 $\phi_g$  Propriedade de mistura do gás  
 $\phi_i$  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  $j$   
 $\mu_g$  Viscosidade absoluta do gás (cP)  
 $A_\mu, B_\mu, C_\mu$  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 ( $T_{std}= 20\text{oC}$ )  
 $\Delta u$  Variação de energia interna molar (kJ/kmol)  
 $\Delta h$  Variação de entalpia molar (kJ/kmol)

- $\Delta s$  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
- $\Delta h_p$  Variação de entalpia molar – processo a pressão zero (kJ/kmol)
- $\Delta u_p$  Variação de energia interna – processo a pressão zero (kJ/kmol)
- $\Delta h_T$  Variação de entalpia molar – processo isotérmico (kJ/kmol)
- $\Delta u_T$  Variação de energia interna – processo isotérmico (kJ/kmol)
- $C_v$  Calor molar a volume constante (kJ/kmol.K) ou específico (kJ/kg.K)
- $\mu_{JT}$  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)
- $\rho_{std}$  Massa específica padrão (kg/Sm<sup>3</sup>)
- $Q_{std}, Q$  Vazão volumétrica padrão (Sm<sup>3</sup>/s). (1 Sm<sup>3</sup>/s = 86.4 SMm<sup>3</sup>/dia)
- $q_g$  Fluxo de calor transferido ao gás (kJ/s)
- $f_o$  Fração de abertura
- $T_\infty$  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<sup>0.5</sup>)
- $\gamma_g$  Densidade do gás relativa ao ar ( $M_g/M_{ar}$ ).
- $\lambda_g$  Razão de calores específicos do gás ( $C_p / C_v$ ).
- $Y$  Fator de expansão do gás
- $\lambda_{ar}$  Razão de calores específicos do ar à 60oF e 1 atm.  $\lambda_{ar}=1,4$
- $F_\lambda$  Razão de calores específicos do gás e do ar
- $D$  Diâmetro externo (m)
- $D_i$  Diâmetro interno (m)
- $\Delta p$  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)
- $q_\infty$  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 ( $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ )
- $Rt_{\text{rev}}$  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 ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )
- $h_{\text{ex}}$  Coeficiente externo de troca de calor por convecção ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )
- Pr** Número de Pradtl
- Nu<sub>i</sub>** Número de Nusselt Interno
- Nu<sub>ex</sub>** 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
- $\eta_b$  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  
 $\mu$  Viscosidade  
 $ref$  Referência  
 $\infty$  Ambiente  
 $set$  Ponto de ajuste ou *setpoint*  
 $in$  Interno  
 $ex$  Externo