

## 6. Modelagem de uma Estação de Entrega de Gás Natural Existente

Neste capítulo analisa-se o escoamento na Estação de Entrega de São Carlos-SP da TBG. Os dados utilizados na confecção do modelo da estação foram extraídos das folhas de dados e catálogos de equipamentos apresentados no Apêndice B, e as condições operacionais estabelecidas a partir do sistema supervisório da TBG. Em alguns casos, complementou-se as informações com dados coletados em campo durante a visita ao ponto de entrega. Na Figura 6.13 é ilustrada a visão esquemática do modelo de simulação da estação de entrega de São Carlos com todos os equipamentos principais e a localização dos transmissores utilizados para ajuste dos cenários dinâmicos e os disponíveis para comparação de resultados.

Na próxima seção a condição de entrada é detalhada, seguida da descrição dos principais equipamentos ilustrados na Fig.6.1.

### 6.1. Condição de Entrada e Composição do Gás Natural

A condição de entrada do gás na linha tronco (GASBOL) é definida através de um elemento “Entrada de Gás” apresentado com detalhes no Capítulo 4, e os valores de pressão e temperatura lidos nos instrumentos. Os transmissores de pressão e temperatura PT-01 e TT-01 encontram-se localizados na área de filtragem. Os valores da temperatura e pressão variam de acordo com a condição operacional da linha tronco sendo seus limites definidos como:

- Pressão: 55,0 a 100,0 kgf/cm<sup>2</sup>g
- Temperatura: 10 a 48 °C

A composição do gás natural entregue na Estação de Entrega (EE) de São Carlos é obtida através do cromatógrafo localizado em Corumbá. Foi utilizada a composição do dia 20-05-2010 para configuração do ponto de entrada de gás GASBOL utilizado no SIMGAS. Após a definição do percentual molar de cada

componente é possível calcular as propriedades da mistura (densidade, poder calorífico) e comparar estes valores calculados com os valores transmitidos pelo sistema supervisório (SCADA) da TBG para os Computadores Lógico Programáveis (CLPs) no mesmo dia. Esta composição e as propriedades do gás são enviadas para o CLP de cada EE para o cálculo da vazão volumétrica padrão e da energia entregue para o cliente.

Na Tabela 6.1 é apresentada a composição do gás em percentual molar, o peso molecular e o poder calorífico superior e inferior de cada componente de acordo com a norma ABNT NBR-1513 (Gás natural e outros combustíveis gasosos — Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa a partir da composição) e que são utilizados como referência para o cálculo das propriedades do gás no SIMGAS. Na Tabela 6.2 são listadas as propriedades do gás calculadas pelo SIMGAS e as propriedades do gás armazenadas no SCADA. A composição de ar-padrão utilizado no cálculo da densidade relativa é de 28,9626 kg/kmol. O poder calorífico utilizado no cálculo da energia entregue ao cliente está bem próximo do poder calorífico superior calculado pelo SIMGAS.

**Tabela 6.1 – Composição do Gás Natural do GASBOL (20-05-2010)**

<b>Componente</b>	<b>% Molar Xi</b>	<b>Peso Molecular Mw<sup>1</sup> (kg/kmol)</b>	<b>Poder Calorífico Inf. HVI<sup>1</sup> (kJ/kmol)</b>	<b>Poder Calorífico Sup. HVS<sup>1</sup> (kJ/kmol)</b>	<b>Xi * Mw</b>
C1	89,03	16,043	802,65	891,09	14,28308
C2	5,95	30,07	1428,74	1561,41	1,789165
C3	1,78	44,097	2043,23	2220,13	0,784927
n-C4	0,39	58,123	2657,45	2878,57	0,22668
i-C4	0,28	58,123	2657,45	2878,57	0,162744
n-C5	0,07	72,15	3271,83	3537,17	0,050505
i-C5	0,11	72,15	3271,83	3537,17	0,079365
n-C6	0,09	86,177	3887,01	4196,58	0,077559
CO2	1,57	44,01	0	0	0,690957
N2	0,72	28,0135	0	0	0,201697
O2	0,01	31,9988	0	0	0,0032
<b>Total</b>	<b>100,0</b>			<b>M<sub>w</sub> =</b>	<b>18,34988</b>

<sup>1</sup> Propriedades segundo a NBR-1513

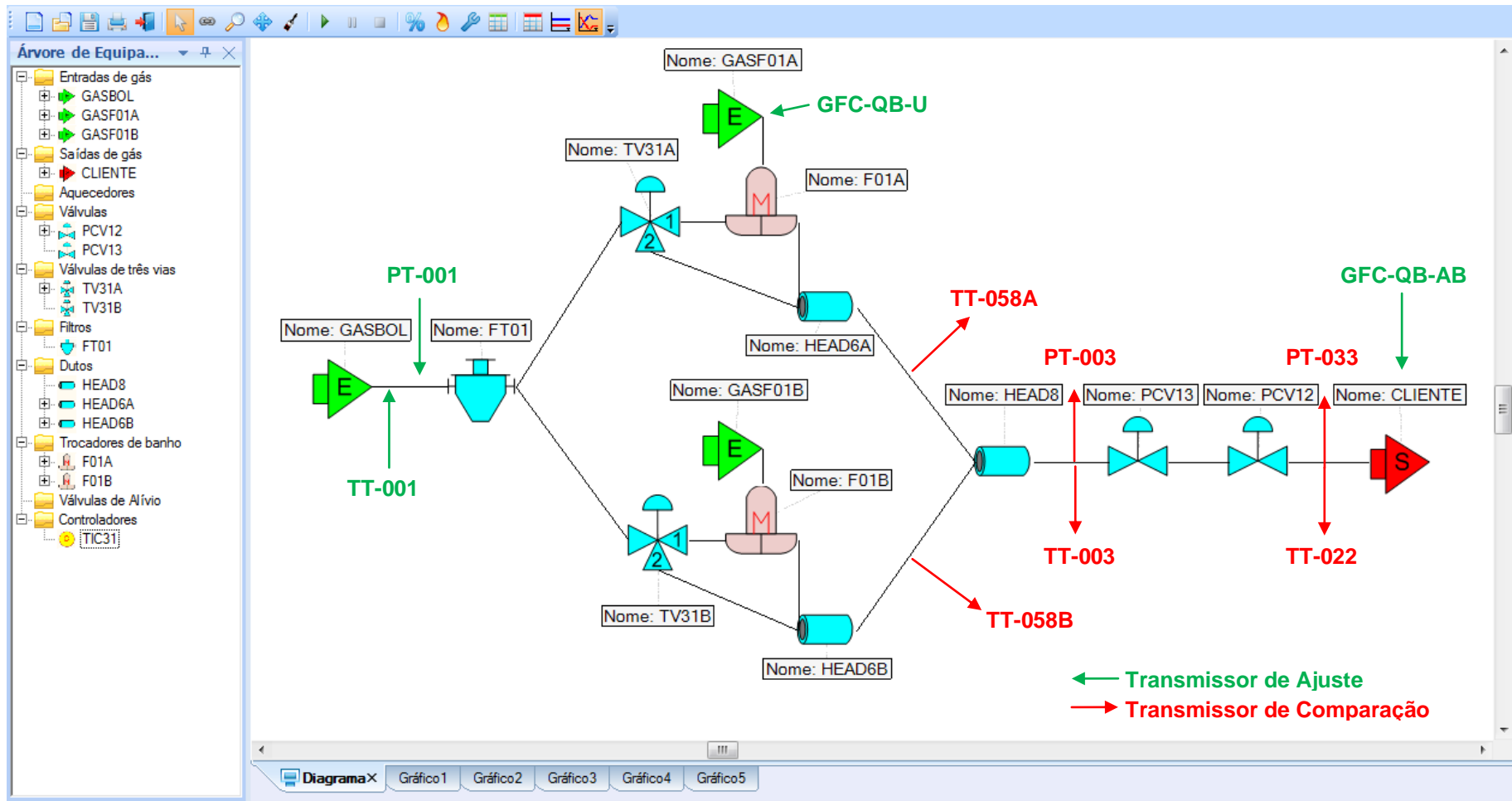


Figura 6.1– Esquemático do Modelo de Simulação da Estação de Entrega de São Carlos

**Tabela 6.2 – Propriedades do Gás Calculadas pelo SIMGAS e obtidas do SCADA**

<b>SIMGAS</b>	Densidade Relativa (Mg/Mar)	0,634
	Massa Específica Padrão (kg/Sm <sup>3</sup> )	0,7645
	Poder Calorífico Superior (MJ/Sm <sup>3</sup> )	39,71
	Poder Calorífico Inferior (MJ/Sm <sup>3</sup> )	35,88
<b>SCADA</b>	Densidade Relativa (Mg/Mar)	0,635
	Poder Calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )	39,74

## 6.2.

### Descrição dos Equipamentos

Os principais equipamentos encontrados na estação de entrega, e ilustrados na Fig. 6.1 são escritos a seguir.

#### 6.2.1.

##### Filtro Ciclone

Uma foto do filtro ciclone da EE de São Carlos encontra-se na Fig. 6.2. Este filtro foi definido no simulador SIMGAS usando o elemento FILTRO, denominado FT01, e utilizando os seguintes parâmetros de acordo com os valores existentes na folha de dados do projeto:

- Diâmetro do Corpo: 472,2 mm
- Tipo de Filtro: Lapple
- Fator de Forma: 16 (sem guia)

**Figura 6.2– Filtro Ciclone FT01**

### 6.2.2. Válvula de Três Vias

A Figura 6.3 ilustra a válvula de três vias na EE se São Carlos. Esta válvula foi denominada de TV31A/B no simulador. Para definir os parâmetros da válvula para o simulador, utilizaram-se as informações fornecidas no catálogo da válvula obtido na página do fabricante ([www.parcoll.com](http://www.parcoll.com)). A imagem do catálogo onde consta as informações referentes ao modelo PARCOL 1-8113 para o tamanho de 6" é ilustrado na Figura B.2 do Apêndice B. A curvas apresentadas nas Fig. 6.4 e Fig. 6.5 foram digitalizadas a partir do catálogo e mostram a variação do coeficiente de vazão da válvula  $C_v$  em função percurso da válvula (fração de abertura) para as duas saídas:

- Saída 1 (Saída Direta) : Conecta a entrada do aquecedor
- Saída 2 (Saída em Ângulo): Conecta a saída do aquecedor

De acordo com o catálogo do fabricante o coeficiente máxima da saída em ângulo máxima é 10% maior do que a saída direta. O comportamento de ambas as curvas é linear na faixa de 0,1 a 0,9.



Figura 6.3– Válvulas Controle de Três Vias TV31A/B

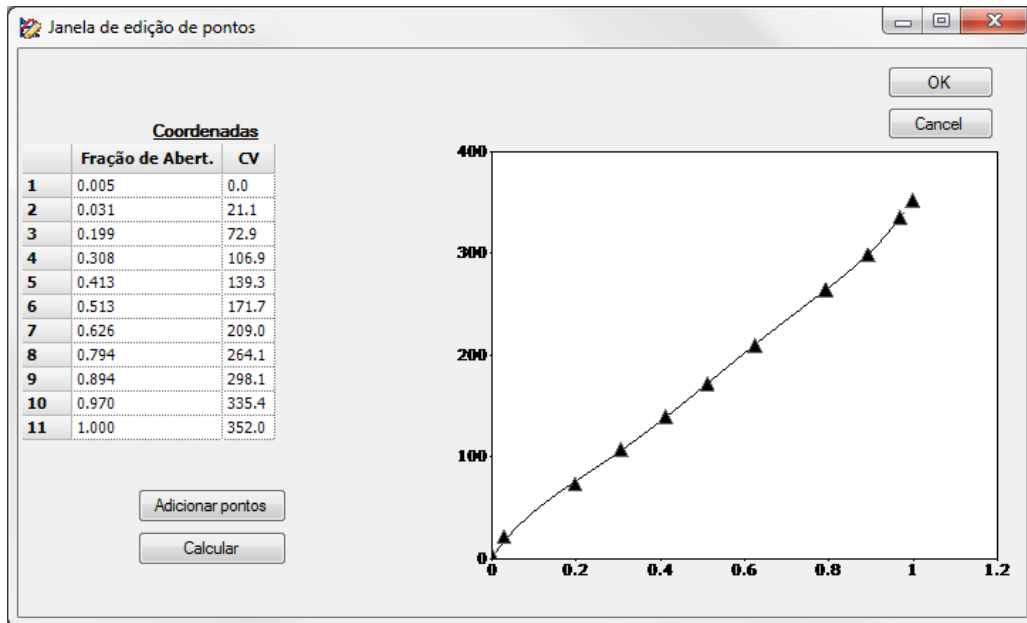


Figura 6.4 – Curva CV X Fração de Abertura para Saída 1 – Válvula PARCOL 6pol

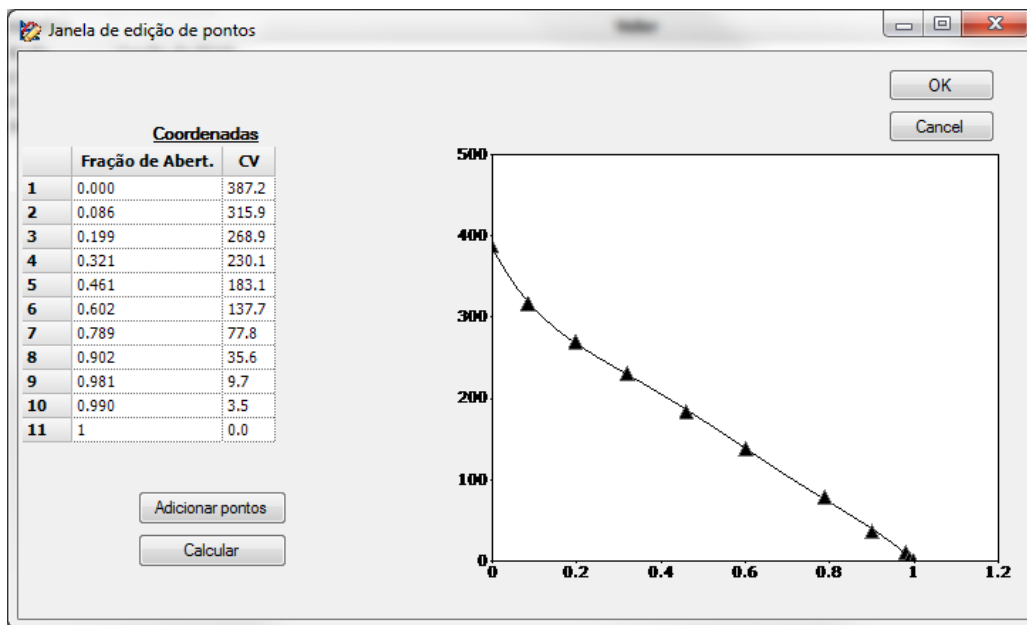


Figura 6.5 – Curva CV X Fração de Abertura para Saída 2 – Válvula PARCOL 6pol

**6.2.3. Aquecedores Indiretos de Gás de Banho de Água**

Os aquecedores indiretos de gás de banho de água da EE de São Carlos podem ser visualizados na Fig. 6.6. Estes aquecedores encontram-se indicados do esquema do simulador na Fig. 6.1, com a denominação F01A/B.



**Figura 6.6 – Aquecedores de Gás F01A/B**

Os parâmetros de projeto dos aquecedores indiretos de banho de água foram retirados da folha de dados (Figura B.3) apresentada no Apêndice B. Os seguintes parâmetros de projeto são comuns aos dois aquecedores (F01A/B) e são necessários para modelagem os aquecedores no SIMGAS:

- Massa de Água
- Eficiência ou Rendimento Térmico
- Coeficiente de Perda na Serpentina K1
- Coeficiente Global de Troca de Calor U (em relação a área da serpentina)
- Pressão de Gás Combustível (definido por um ponto de entrada de gás)
- Vazão de Gás Combustível (definido por um ponto de entrada de gás)

Os parâmetros de entrada do aquecedor relacionados com a temperatura do banho não são parâmetros de projeto do aquecedor e afetam o comportamento de cada aquecedor apenas durante os cenários dinâmicos. Estes parâmetros serão ajustados por aquecedor em função dos dados coletados no supervisório e de dados medidos em campo:

- Temperatura Inicial do Banho
- *Setpoint* de Temperatura do Banho
- Diferença Incremental da Temperatura do Banho

ou



- Temperatura Máxima do Banho
- Temperatura Mínima do Banho

A seguir é demonstrado o cálculo dos parâmetros de entrada do simulador a partir dos dados de projeto coletados:

- **Propriedades do Gás:**

- Poder Calorífico Inferior:  $PCI = 35580 \text{ kJ/Sm}^3$
- Calor Específico à Pressão Constante:  $C_{pg} = 3,02 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}$
- Massa Específica Padrão:  $\rho_{std} = 0,7646 \text{ kg/m}^3$

- **Massa de Água:**

- Massa de Água:  $m_w = 3200 \text{ kg}$

- **Fluxo de Calor de Combustão:**

- Pressão de Gás Combustível:  $P_b = 1,4 \text{ kgf/cm}^2$
- Vazão de Gás Combustível:  $SQ_b = 79,2 \text{ Sm}^3/\text{h} = 0,022 \text{ Sm}^3/\text{s}$
- Fluxo de Calor de Combustão
  - $q_b = SQ_b \times PCI = 0,022 \times 35580 = 789 \text{ kW}$

- **Fluxo de Calor Transferido ao Gás:**

- Vazão de Gás:  $SQ_e = 20625 \text{ Sm}^3/\text{h} = 495 \text{ SMm}^3/\text{d} = 5,7292 \text{ Sm}^3/\text{s}$
- Temperatura de Entrada:  $T_e = 10^\circ\text{C}$
- Temperatura de Saída:  $T_s = 47^\circ\text{C}$
- Vazão Mássica de Gás:  $\dot{m}_g = \rho_{std} \times SQ_e = 0,7645 \times 5,7292 = 4,38 \text{ kg/s}$
- Fluxo de Calor Transferido:
  - $q_a = \dot{m}_g \times C_{pg} \times (T_s - T_e) = 4,38 \times 3,02 \times (47 - 10) = 489,4 \text{ kW}$

- **Rendimento Térmico:**

- Rendimento Térmico:
  - $\eta = q_a / q_b = 0,62$

- **Coefficiente Global de Transferência de Calor**

- Temperatura do Banho:  $T_w = 85^\circ\text{C}$
- Área da Superfície da Serpentina:  $A = 25,3 \text{ m}^2$
- Temperatura Média Logaritimica
  - $LMTD = ((T_w - T_s) - (T_w - T_e)) / \ln((T_w - T_s) / (T_w - T_e)) = 54,42^\circ\text{C}$
- Coeficiente Global de Transferência de Calor
  - $U = q_a / (A \times LMTD) = 489400 / (25,3 \times 54,42) = 355 \text{ W/m}^2.\text{K}$



- **Coefficiente de Perda de Carga na Serpentina K1**

- Vazão de Gás:  $Q = 21250 \text{ Sm}^3/\text{h} = 495 \text{ SMm}^3/\text{d} = 5,729 \text{ Sm}^3/\text{s}$
- Pressão de Entrada:  $P_e = 56,033 \text{ kgf/cm}^2\text{a} = 5594,96 \text{ kPaa}$
- Pressão de Saída:  $P_s = 55,833 \text{ kgf/cm}^2\text{a} = 5474,36 \text{ kPaa}$
- Coeficiente de Perda de Carga
  - $K1 = (p_e^2 - p_s^2) / Q^2 = 6877,72 \text{ (kPaa)}^2 / (\text{Sm}^3/\text{s})^2$

#### 6.2.4.

#### **Tubulação de 6" na Saída do *By-pass* dos Aquecedores**

Dois dutos de diâmetro externo de 6", chamados de HEAD6A e HEAD6B, foram incluídos no modelo do simulador para permitir o monitoramento da temperatura da saída do *by-pass* dos aquecedores F01A e F01B, durante os cenários operacionais. A temperatura na saída do *by-pass* dos aquecedor é próxima da temperatura de saída do aquecedor apenas quando a abertura da válvula de três vias é máxima. A condição de escoamento adiabático é imposta na definição do coeficiente de troca de calor externo. A seguir os dados utilizados na modelagem do HEAD6A e HEAD6B.

- Diâmetro Externo:  $D_e = 0,1524 \text{ m}$  (6")
- Espessura:  $e = 9,906 \text{ mm}$  (0,39")
- Comprimento:  $L = 20 \text{ m}$
- Rugosidade Interna:  $Ru = 0,02 \text{ mm}$
- Equação Fator de Atrito:  $f = \text{Colebroke}$
- Coeficiente Externo de Troca Térmica:  $h_{\text{ex}} = 1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

#### 6.2.5.

#### **Tubulação de 8" entre Aquecimento e a Redução de Pressão**

O duto de diâmetro externo de 8" representado no simulador pelo elemento HEAD8 possui comprimento de 20m e interliga a saída do *by-pass* dos aquecedores até a área de redução de pressão. Foi calculado pela equação de Churchill-Bernstein (Incropera, 1996) o número de Nusselt externo  $Nu_{\text{ex}}$  e o coeficiente externo de troca térmico por convecção forçada  $h_{\text{ex}}$ . Com isso, neste elemento parte do calor gerado pelos aquecedores é perdido para o ambiente externo. No cálculo do  $h_{\text{ex}}$  foi considerado um tubo sem revestimento exposto a

correntes de ventos moderados (10 m/s). Considerando os seguintes dados de entrada podemos calcular o coeficiente externo de troca térmica:

- Diâmetro Externo:  $D_e = 0,2032$  m (8")
- Espessura:  $e = 7,925$  mm (0,312")
- Comprimento:  $L = 20$  m
- Rugosidade Interna:  $Ru = 0,02$  mm
- Equação Fator de Atrito:  $f = \text{Colebroke}$
- Temperatura Ambiente:  $T_{ar} = 20^\circ\text{C}$
- Propriedades do ar seco a  $20^\circ\text{C}$  e 1 atm
  - Massa Específica:  $\rho_{ar} = 1.1845$  kg/m<sup>3</sup>
  - Condutividade Térmica:  $k_{ar} = 0,025969$  W/m.K
  - Calor Específico:  $C_{p,ar} = 1006,3$  J/kg.K
  - Prandtl :  $Pr_{ar} = C_{p,ar} \mu_{ar} / k_{ar} = 0,71$
- Coeficiente Externo de Troca Térmica (Equação de Churchill)
  - Velocidade do Vento:  $v_{ex} = 10$  m/s
  - Número de Reynolds:  $\rho_{ar} v_{ex} D_{ex} / \mu_{ar} = 130498$
  - Número de Nusselt:  $Nu_{ex} = 258,79$
  - Coeficiente Externo de Troca:  $h_e = Nu_{ex} k_{ar} / D_{ex} = 33,07$  W/m<sup>2</sup>.K

### 6.2.6. Válvula Redutora de Pressão – Monitora

A válvula monitora PCV13A é uma válvula do tipo globo de 3". Seu modelo é Reflux 819. Geralmente os catálogos de válvulas monitoras e reguladoras de pressão, diferentemente das válvulas de controle de três vias, apresentam como parâmetros de dimensionamento os coeficientes  $C_g$  e  $K_1$ . Na conversão de  $C_g$  para  $C_v$  utiliza-se no simulador o coeficiente  $C_1$  que corresponde a razão entre os diferentes coeficientes de vazão ( $C_1 = C_g / C_v$ ). O fator de forma ou *body shape factor*  $K_1$  varia de acordo com o modelo da válvula e corresponde a  $K_1 = 3417 / C_1$ , o coeficiente de vazão  $C_g$  varia em função do tamanho da válvula.

Os parâmetros de dimensionamento  $K_1$  e  $C_g$  para o modelo Reflux 819 de 6" foram extraídos do catálogo de válvulas do fabricante Pietro Fiorentini

ilustrado na Figura B.1 do Apêndice B. A Figura 6.7 ilustra o coeficiente de vazão  $C_v$  em função da fração de abertura  $f_o$ , de acordo com os dados do fabricante.

- Modo: Fração de Abertura
- Fórmula: ISA
- *Setpoint* de Vazão: 0,0
- *Setpoint* de Pressão: 35,0 kgf/cm<sup>2</sup>
- Fração de Abertura: 1.0
- Fator de Forma  $K_I$  (Modelo Reflux 819): 106,78
- Coeficiente de vazão de gás  $C_g$  (Tamanho 3''): 4937
- Curva da Válvula no SIMGAS ( $C_v \times f_o$ )
  - $C_I = 3417 / 106,78 = 32$
  - $C_v = C_g / C_I = 4937 / 32 = 154$
  - Igual Percentagem  $y = x^2 / (2 - x^4)^{0,5}$

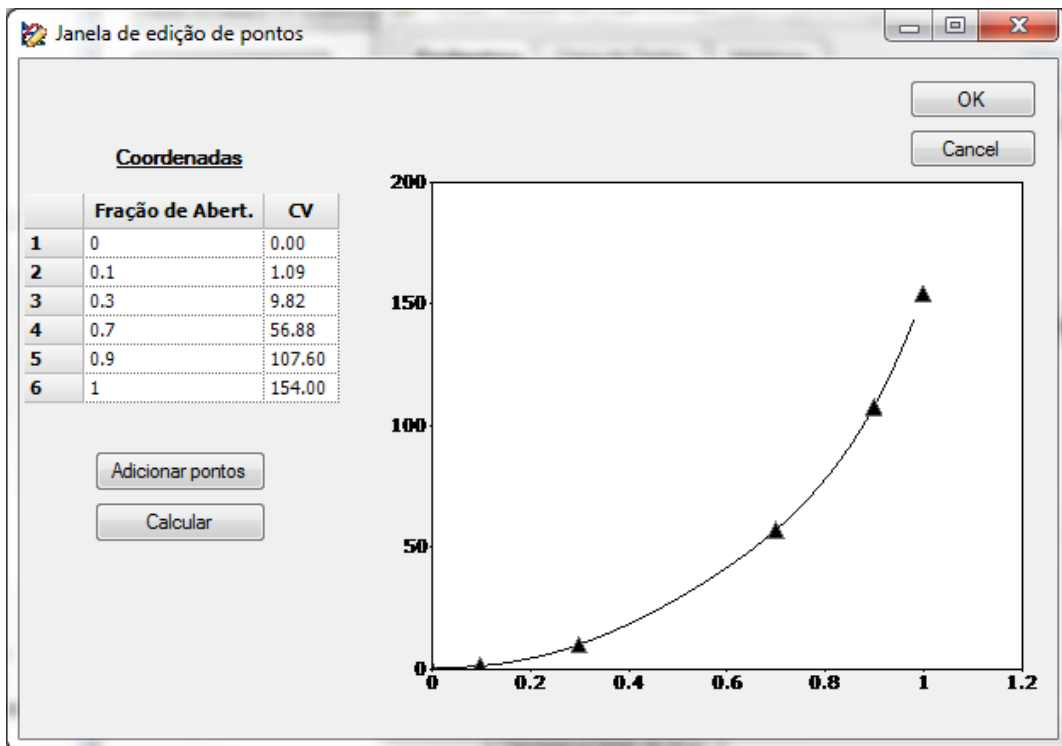


Figura 6.7 – Curva CV X Fração de Abertura– Válvula Reflux 819 (3’')

### 6.2.7. Válvula Redutora de Pressão - Reguladora

A válvula redutora de pressão, reguladora PCV12A é uma válvula globo 3’’ modelo Aperflux 851, do fabricante Pietro-Fiorentini. A curva apresenta na Figura

6.8 o coeficiente de descarga  $C_v$  em função da abertura  $f_o$  foi gerada considerando o comportamento de igual percentagem indicado na folha de dados do equipamento. Os parâmetros de dimensionamento  $K_I$  e  $C_g$  para o modelo Aperflux 851 de 6” foram extraídos do catálogo de válvulas do fabricante Pietro Fiorentini ilustrado na Figura B.1 do Apêndice B

- Modo: Fração de Abertura
- Fórmula: ISA
- *Setpoint* de Vazão: 0,0
- *Setpoint* de Pressão: 35,0 kgf/cm<sup>2</sup>
- Fator de Forma  $K_I$  (Modelo Aperflux 819): 113,9
- Coeficiente de vazão de gás  $C_g$  (Tamanho 3”): 3790
- Fração de Abertura: 1,0 (comandado pelo controlador PIC12A)
- Curva da Válvula no SIMGAS ( $C_v \times f_o$ )
  - $C_I = 3417 / 113,9 = 30$
  - $C_v = C_g / C_I = 3790 / 30 = 126$
  - Igual Percentagem  $y = x^2 / (2 - x^4)^{0,5}$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812204/CA

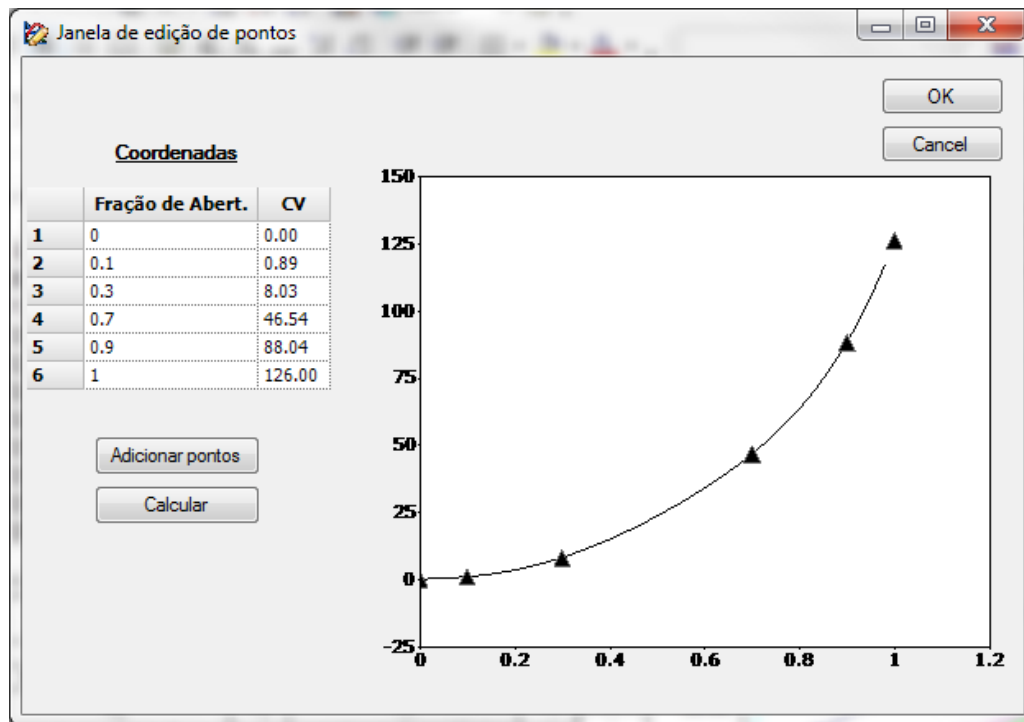


Figura 6.8 – Curva  $C_v$  X Fração de Abertura– Válvula Aperflux 851 (3”)

### 6.3. Comparação com Condições Operacionais de Projeto

Com a finalidade de verificar se as condições limites operacionais da EE de São Carlos encontram-se de acordo com as premissas estabelecidas em projeto, determinou-se o escoamento em regime permanente na condição de projeto. O diagrama esquemático deste caso encontra-se na Fig. 6.9.

O modelo foi ajustado para simular a condição de vazão máxima de entrega para estação de São Carlos:

- **Ponto de Entrada GASBOL**
  - Modo: Controle de Pressão
  - Pressão: 100,0 kgf/cm<sup>2</sup> (Pressão Máxima)
  - Temperatura: 10 °C (Temperatura Mínima)
- **Válvula de Três Vias TV31A/B**
  - Fração de Abertura = 1,0 (Fluxo Máximo para os Aquecedores)
- **Aquecedores F01A/B**
  - Vazão de Combustível: 1,9 SMm<sup>3</sup>/dia
- **Reguladora PCV12**
  - Modo: Controle de Pressão
  - *Setpoint* de Pressão: 35,0 kgf/cm<sup>2</sup>
- **Ponto de Saída CLIENTE**
  - Modo: Controle de Vazão
  - Vazão: 990,0 SMm<sup>3</sup>/d (Vazão Máxima)

Os resultados obtidos por equipamento para as duas equações de estado Peng-Robinson (PR) e Soave-Redlich-Kwong (SRK) na condição máxima operacional são apresentados na Tabela 6.3.

A queda de pressão calculada pelo SIMGAS para o filtro ciclone na vazão máxima de projeto de 990 SMm<sup>3</sup>/dia (41250 Sm<sup>3</sup>/h) foi de 0,4 kgf/cm<sup>2</sup>, segundo o fabricante do filtro a queda de pressão estimada é de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

A temperatura de saída dos aquecedores está próxima da temperatura prevista no projeto dos aquecedores de 47,0 °C para a condição de metade da vazão máxima de uma EE Tipo IV 495 SMm<sup>3</sup>/dia (20625 Sm<sup>3</sup>/h). Pode-se afirmar que os resultados obtidos pelo simulador são satisfatórios, pois encontram-se dentro das especificações de projeto.

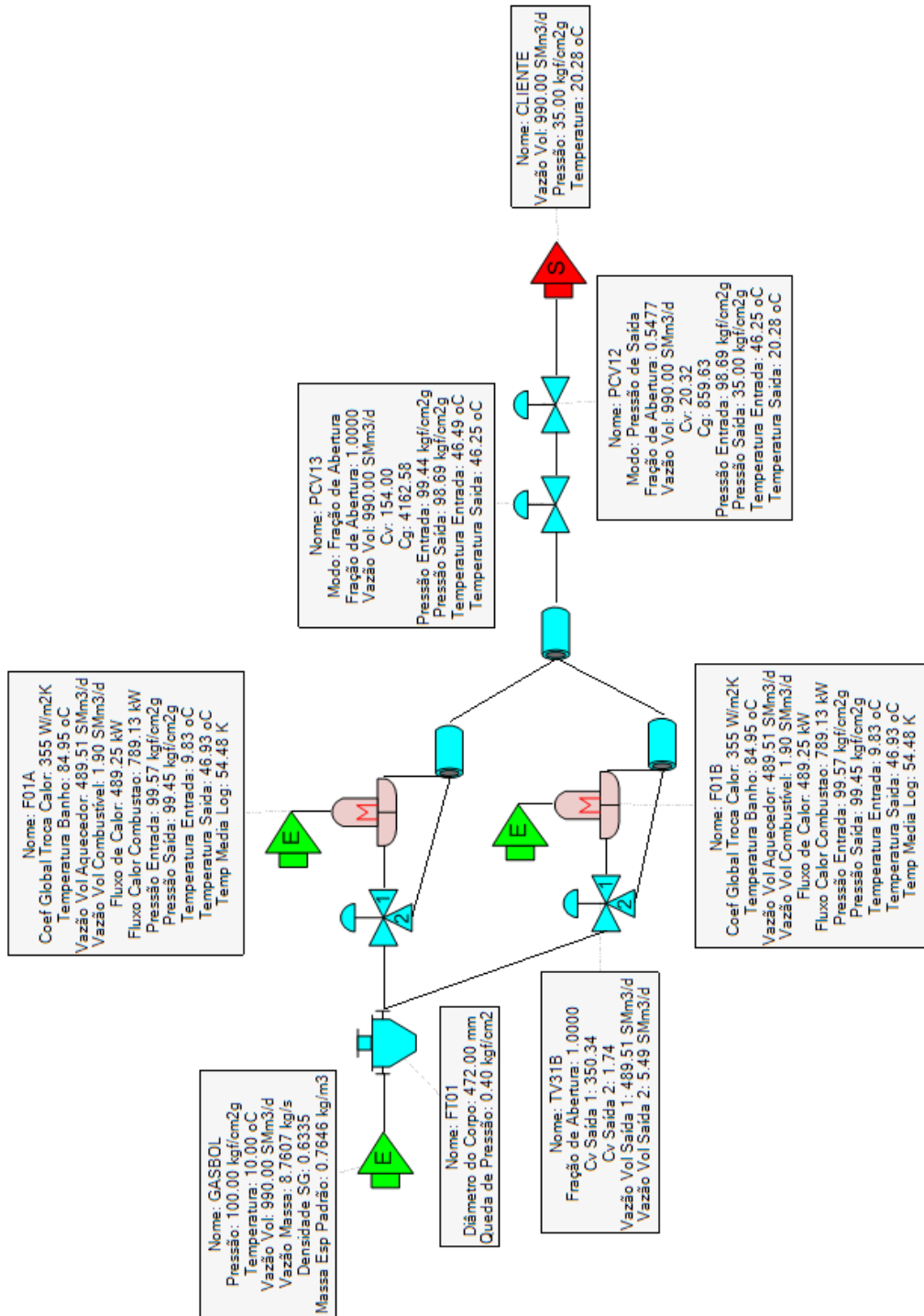


Figura 6.9.– Resultados do Regime Permanente na Condição Máxima

**Tabela 6.3 – Regime Permanente para Condição Máxima Operacional**

<b>Equipamento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Soave</b>	<b>Peng</b>	<b>Projeto</b>	<b>Unid.</b>
FT01	Dif. Pressão no Filtro	0,4	0,4	0,5	kgf/cm <sup>2</sup>
F01A/B	Temperatura de Entrada	9,8	9,8	10,0	°C
F01A/B	Temperatura do Banho	84,95	85,14	85,0	°C
F01A/B	Temperatura de Saída	46,93	47,25	47,0	°C
F01A/B	Vazão Volumétrica	489,5	489,4	495,0	SMm <sup>3</sup> /dia
F01A/B	Fluxo de Calor Combustão	789,1	789,1	789,0	kW
F01A/B	Fluxo de Calor	489,3	489,4	489,4	kW
PCV13A	Temperatura à Montante	46,25	46,55	-	°C
PCV13A	Temperatura à Jusante	20,28	19,02	20,0	°C
PCV12A	Pressão à Montante	98,69	98,72	-	kgf/cm <sup>2</sup>
PCV12A	Pressão à Jusante	35,0	35,0	35,0	kgf/cm <sup>2</sup>
PCV12A	Fração de Abertura	0,5477	0,5422	-	

**6.4.****Cenários Dinâmicos na Estação de Entrega sem Malha de Controle de Temperatura (comparação com dados do SCADA)**

Nesta seção dois casos são investigados e os resultados da simulação são comparados com os dados de campo medidos na EE de São Carlos e armazenados com o sistema SCADA. A primeira situação envolve a operação com dois aquecedores, enquanto na segunda investiga-se a influência do apagamento da chama do aquecedor.

O diagrama esquemático ilustrado na Fig. 6.9, com a nomenclatura dos equipamentos, ligações, etc., também se aplica a este caso.

Foi verificado na visita a EE que as válvulas de três vias TV31A/B apresentaram uma posição de abertura que oscilava entre 5 a 8 mm num curso de 60mm, onde 60mm indica fluxo total pelo saída em ângulo ou seja pelo desvio do aquecedor. No simulador isto corresponde a uma fração de abertura oscilando entre 0,91 e 0,87.

Para identificar o efeito da atuação da malha de controle, duas situações foram analisadas: uma as válvulas de três vias TV31A/B totalmente abertas e sem



a malha de controle de temperatura e outra com a malha de controle atuando. Este último caso será apresentado com detalhes no Capítulo 7.

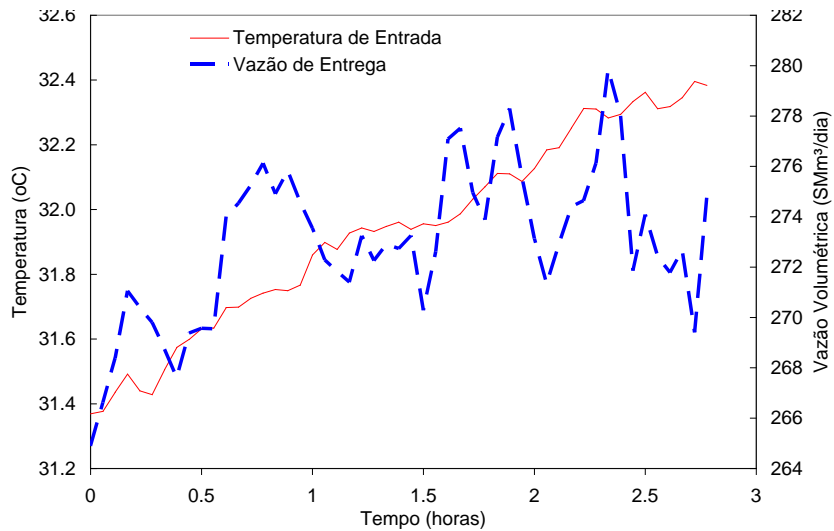
#### **6.4.1. Operação com Dois Aquecedores**

Investigou-se o escoamento no regime transiente na EE de São Carlos, visando reproduzir o cenário de operação observado durante a visita à estação ocorrida no dia 20/05/2010 durante o período de 11:00hs ( $t=0h$ ) às 13:45hs ( $t=2,8hs$ ). Os históricos de temperatura na entrada e vazão na saída medidos e especificados como condição de contorno para o problema encontram-se ilustrados na Figura 6.10. Os históricos de pressão nos transmissores localizados na entrada (PT-001) e na saída (PT-033) da EE indicaram que houve uma variação de pressão menor que  $0,2 \text{ kgf/cm}^2$  durante este período. A Figura 6.11 apresenta o histórico de vazão de combustível medido consumido em cada aquecedor. As configurações iniciais dos equipamentos e os cenários dinâmicos utilizados no modelo base são descritos a seguir.

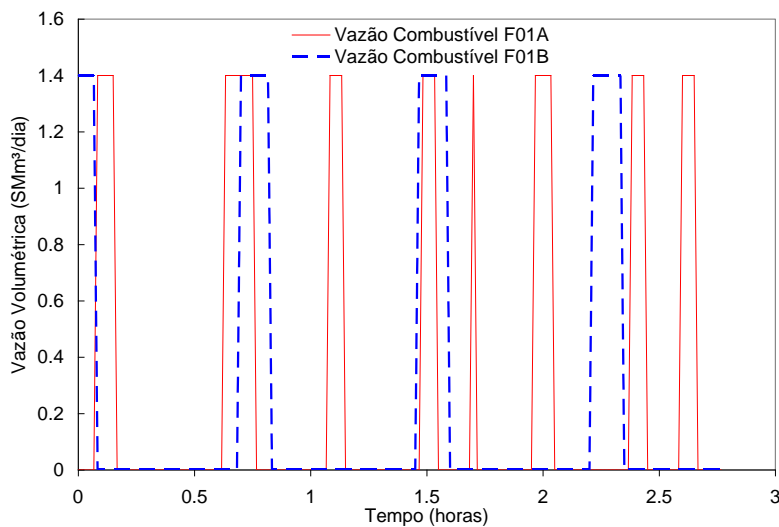
- **Entrada de Gás (GASBOL)**
  - Modo: Controle de Pressão
  - Pressão:  $97,2 \text{ kgf/cm}^2$  (Constante)
  - Cenário de Temperatura: Histórico de Temperatura (Figura 6.10)
- **Saída de Gás (CLIENTE)**
  - Modo: Controle de Vazão
  - Cenário de Vazão: Histórico de Vazão (Figura 6.10)
- **Aquecedor F01A/B**
  - Temperatura Inicial da Água:  $58 \text{ }^\circ\text{C}$
  - Cenário de Vazão de Combustível: Histórico de Vazão (Figura 6.11)
- **Válvula de Três Vias TV31A/B**
  - Fração de Abertura: 1,0
- **Válvula Reguladora PCV12A/B**
  - Pressão de Ajuste:  $33,4 \text{ kgf/cm}^2$  (Constante)

O modelo dinâmico foi configurado com os seguintes parâmetros de solução:

- Equação de Estado: Peng-Robinson
- Passo de Tempo: 60s
- Tempo Final: 10000s
- Tolerância Global: 0,001



**Figura 6.10 – Cenário de Temperatura de Entrada e Vazão de Saída da EE**

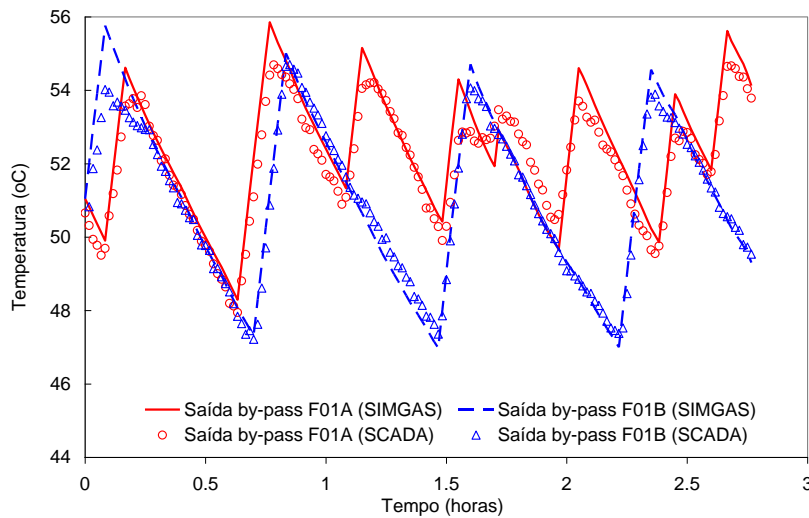


**Figura 6.11 – Cenário de Vazão de Combustível nos Aquecedores F01A/B**

As curvas de históricos de temperatura nos equipamentos calculados pelo SIMGAS foram comparadas com os valores obtidos nos transmissores de temperatura existentes na EE: TT058A, TT058B, TT-003 e TT-022.

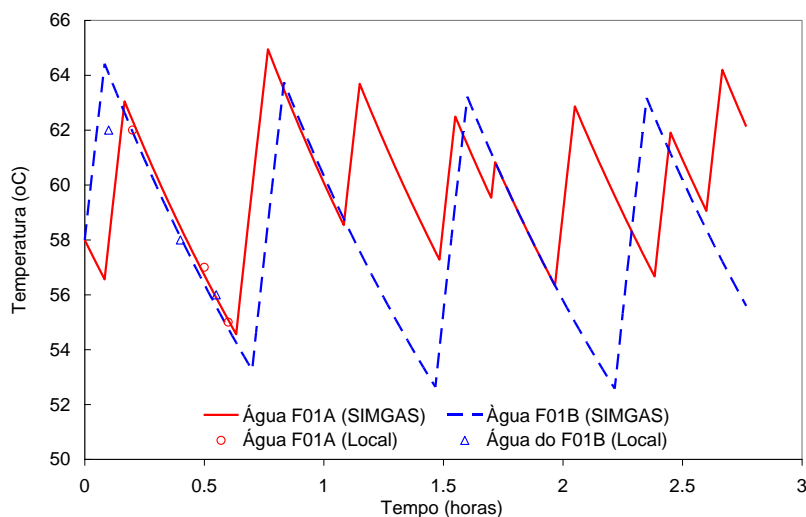
A Figura 6.12 apresenta as curvas de histórico de temperatura do gás após o *by-pass* dos aquecedores F01A/B correspondente aos transmissores de temperatura TT58A e TT58B. O desvio máximo encontrado no período de

comparação foi de 3,3% para TT-58A e 3,2% para TT-058B. Os resultados comparativos para estes instrumentos foram considerados satisfatórios e valida o procedimento adotado para o cálculo do calor de combustão e calor transferido ao gás nos aquecedores F01A/B.



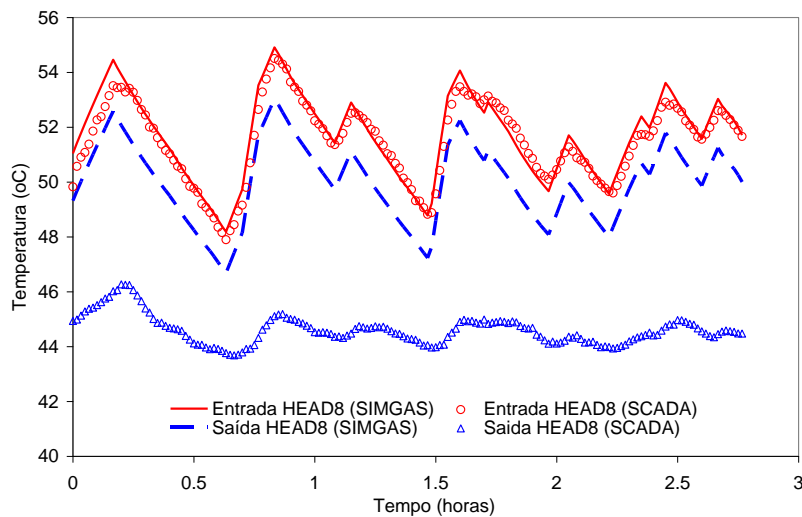
**Figura 6.12 – Históricos de temperatura na saída do by-pass dos aquecedores (SIMGAS e SCADA – 02 aquecedores)**

A Figura 6.13 apresenta as curvas de histórico de temperatura da água dos aquecedores calculado pelo SIMGAS e o registro de três leituras de temperatura da água para cada aquecedor durante a visita a EE, através dos indicadores locais TI-060A e TI-060B. Estas leituras ocorreram no início do período de comparação e mostram que há boa concordância com os valores obtidos pelo simulador.



**Figura 6.13 – Históricos de temperatura da água nos aquecedores (SIMGAS e instrumentos locais – 02 aquecedores)**

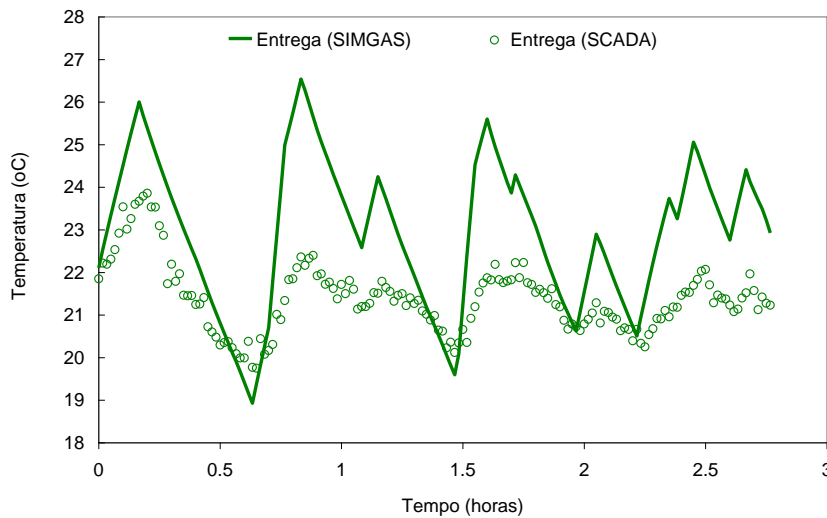
Na Figura 6.14 é ilustrado o histórico de temperatura na entrada e na saída da tubulação aérea de 8” (HEAD8), que interliga a saída do *by-pass* dos aquecedores F01A e F01B a entrada das válvulas redutoras de pressão. O histórico de temperatura de entrada do HEAD8 no SCADA corresponde ao valor médio dos transmissores TT058A e TT058B; e a curva de temperatura de saída registrada pelo transmissor TT003 localizado antes da válvula PCV13A. No simulador foi definido um coeficiente de troca térmica externo no HEAD8 considerando velocidade do vento igual a 10m/s. Neste caso a diferença máxima obtida entre a temperatura de entrada e saída do HEAD8 é de ( $\Delta T_{\text{máx}}=1,9^{\circ}\text{C}$ ) e o fluxo de calor transferido ao ambiente é de 11,6 kJ/s. A diferença entre a temperatura de entrada e saída do HEAD8 registrada pelo SCADA mostrou-se muito superior ao simulado ( $\Delta T_{\text{máx}}=9,4^{\circ}\text{C}$ ). Esta diferença de temperatura somente seria possível no simulador se o fluxo de calor transferido ao ambiente fosse cinco vezes superior. Nota-se a partir dos dados do SCADA um amortecimento da curva de temperatura de saída do HEAD8, que pode estar associado à capacidade térmica de elementos estruturais dos trocadores de calor (tubo de chama e serpentina) ou a atuação da malha de controle na válvula de três vias.



**Figura 6.14 – Históricos de temperatura de entrada e saída do HEAD8 (SIMGAS e SCADA)**

Na Figura 6.15 é ilustrado o histórico de temperatura de entrega calculado no simulador e os dados registrados pelo transmissor TT022 localizado no tramo de medição à jusante da válvula de redução de pressão PCV12A. Foi observado

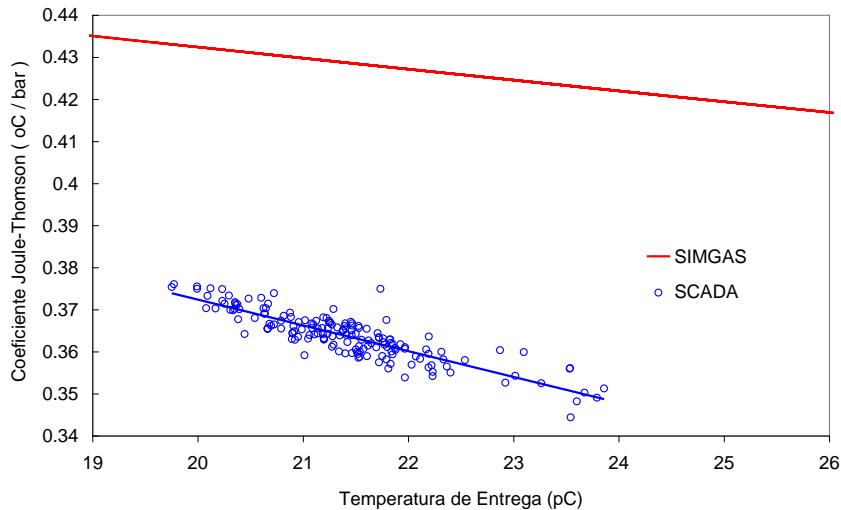
que o desvio máximo entre o SIMGAS e o SCADA de 4,2°C (18,7%) ocorre quando os dois aquecedores estão ligados. Confirma-se no histórico do TT022 um amortecimento na temperatura de entrega, sendo a amplitude de temperatura ( $T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$ ) no SIMGAS de 5,4 °C e no SCADA de 4,1°C.



**Figura 6.15 – Históricos de temperatura de entrega (SIMGAS e SCADA)**

Não foi possível avaliar a perda de pressão no filtro ciclone FT01 e nos aquecedores F01A e F01B devido à falta de indicadores locais de pressão na entrada e na saída destes equipamentos. O manômetro local PI003 localizado à montante da válvula PCV13A não indicou diferença de pressão em relação à entrada da EE. No simulador para a vazão de escoamento de 273 SMm<sup>3</sup>/dia a queda de pressão no filtro e nos aquecedores é menor que 0,05 kgf/cm<sup>2</sup>. A perda de pressão calculada na válvula monitora PCV13A foi de 0,05 kgf/cm<sup>2</sup>. Logo no período de comparação a perda de temperatura por efeito Joule-Thomson somente ocorre na válvula reguladora PCV12A.

A Figura 6.16 mostra a variação do coeficiente JT em função da temperatura de entrega no SIMGAS e no SCADA. O coeficiente JT foi obtido usando a razão da diferença de temperatura na válvula PCV12A com o diferencial de pressão entre a entrada e a saída da EE. Uma curva de tendência foi incluída para os dados obtidos no SCADA, onde na temperatura de 20 °C o coeficiente JT do SIMGAS para a equação de estado de Peng-Robinson é 12% maior que o obtido com dados da instrumentação.



**Figura 6.16 – Variação do coeficiente JT com a temperatura de entrega (SIMGAS e SCADA - 02 aquecedores)**

#### **6.4.2. Apagamento de um Aquecedor**

Neste item, apresenta-se uma análise do desempenho da metodologia desenvolvida no presente trabalho na previsão de apagamento do aquecedor. Esta análise foi comparada com um evento real de apagamento do aquecedor F01A que foi registrado pelo sistema supervisório da TBG no dia 05/02/2010 às 6:45. Visando reproduzir o evento, a simulação inicia-se 45 minutos antes do apagamento do aquecedor F01A e termina após seu resfriamento total. Durante este intervalo de tempo o aquecedor F01B continua operando e transferindo calor ao gás no segundo tramo de aquecimento. As pressões de entrada e de entrega registradas nos instrumentos PT001 e PT033 não sofreram variações significativas durante o cenário sendo então consideradas constantes.

Os históricos de temperatura do gás na entrada (Fig. 6.17) e vazão de combustível nos dois aquecedores (Fig. 6.18) medidos em campo foram especificados como condição de contorno. As configurações iniciais dos equipamentos e os cenários dinâmicos utilizados no modelo base são descritos a seguir:

- **Entrada de Gás (GASBOL)**
  - Modo: Controle de Pressão
  - Pressão: 97,7 kgf/cm<sup>2</sup>
  - Cenário de Temperatura: Histórico de Temperatura (Figura 6.17)

- **Saída de Gás (CLIENTE)**
  - Modo: Controle de Vazão
  - Vazão Volumétrica Padrão: 276 SMm<sup>3</sup>/dia
- **Aquecedor F01A**
  - Temperatura Inicial da Água: 58 oC
  - Cenário de Vazão de Combustível: Histórico de Vazão (Figura 6.18)
- **Aquecedor F01B**
  - Temperatura Inicial da Água: 46 oC
  - Cenário de Vazão de Combustível: Histórico de Vazão (Figura 6.18)
- **Válvula de Três Vias TV31A/B**
  - Fração de Abertura: 1.0 (Fluxo Total para os Aquecedores)
- **Válvula Reguladora PCV12A/B**
  - Pressão de Ajuste: 33,5 kgf/cm<sup>2</sup>g

O modelo dinâmico foi configurado com os seguintes parâmetros de solução:

- Equação de Estado: Peng-Robinson
- Passo de Tempo: 60s
- Tempo Final: 20000s
- Tolerância Global: 0,001

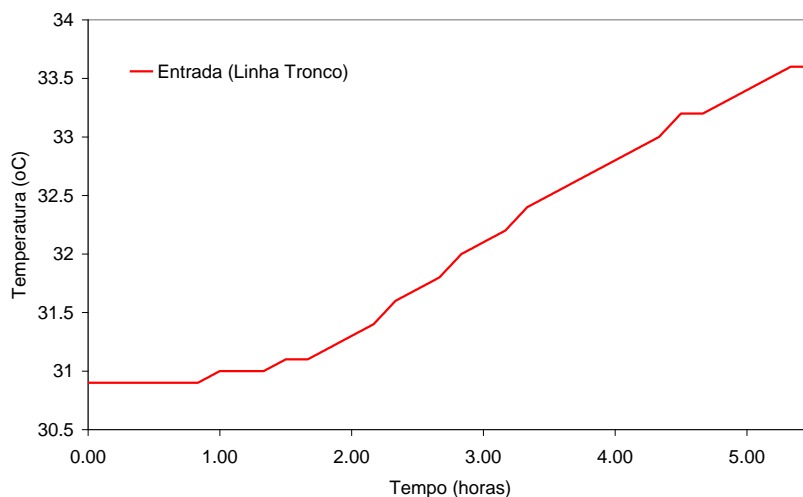
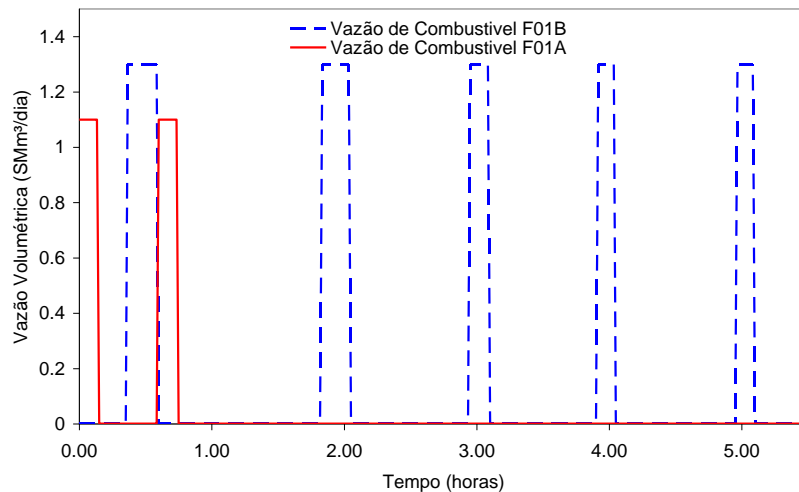


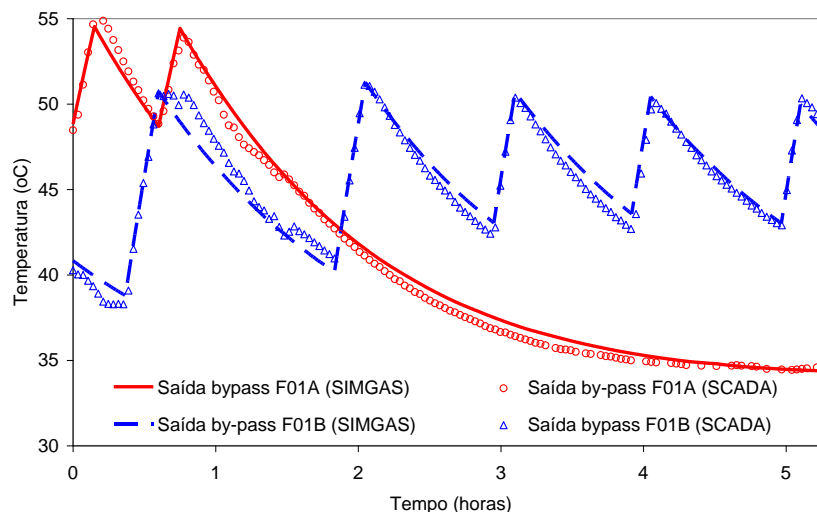
Figura 6.17 – Cenário de Temperatura de Entrada (Linha Tronco)





**Figura 6.18 – Cenário de Vazão de Combustível nos Aquecedores F01A/B**

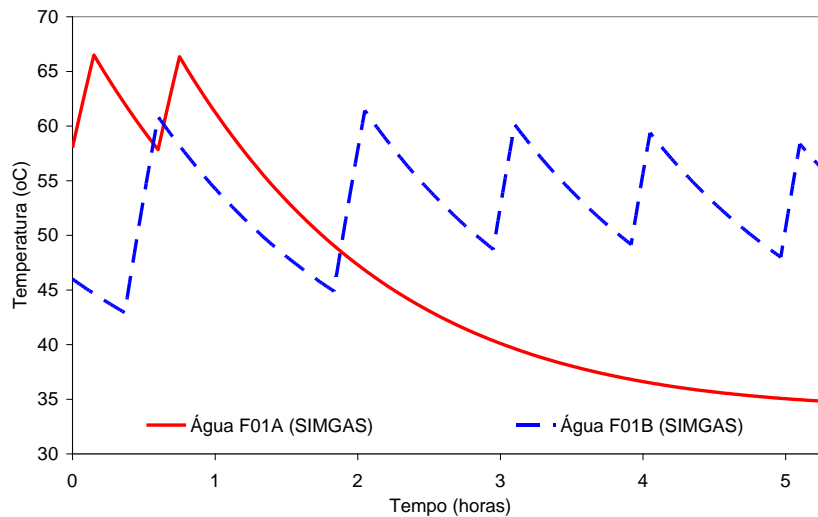
A Figura 6.19 apresenta as curvas de histórico de temperatura do gás após o *by-pass* dos aquecedores F01A/B correspondente aos transmissores de temperatura TT58A e TT58B. O desvio máximo encontrado no cenário de apagamento de F01 foi de 2,3% para TT-58A e 4,1% para TT-058B. Este resultado confirma o bom desempenho da metodologia empregada usando algoritmo RK-4 para determinação do tempo de resfriamento em função da capacidade térmica dos aquecedores indiretos de banho.



**Figura 6.19 – Históricos de temperatura na saída do by-pass dos aquecedores (Apagamento do aquecedor F01A)**

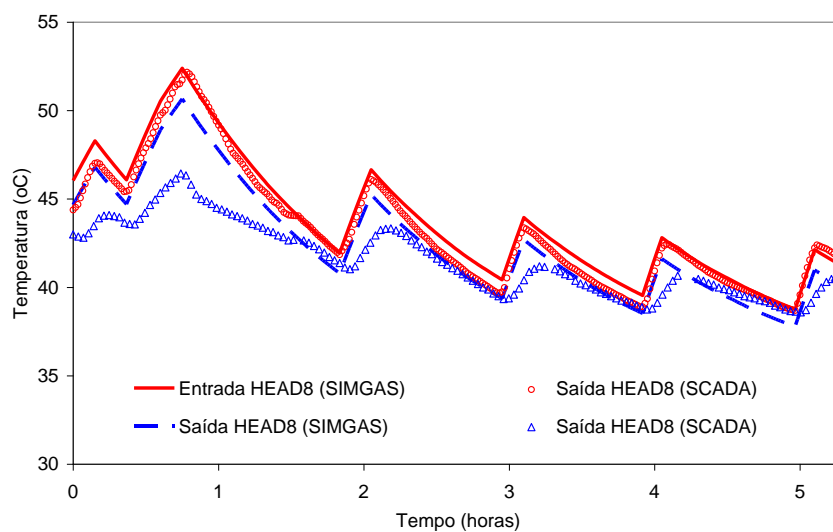
A Figura 6.20 apresenta as curvas de histórico de temperatura da água dos aquecedores calculado pelo SIMGAS. Não há registro da temperatura da água dos aquecedores no supervisório para comparação. Nota-se que tanto a temperatura da

água (Fig 6.20) como temperatura de saída do *by-pass* do aquecedor F01A (Fig 6.19) tende para uma temperatura de equilíbrio próxima a temperatura de entrada do gás na EE (Fig 6.17).



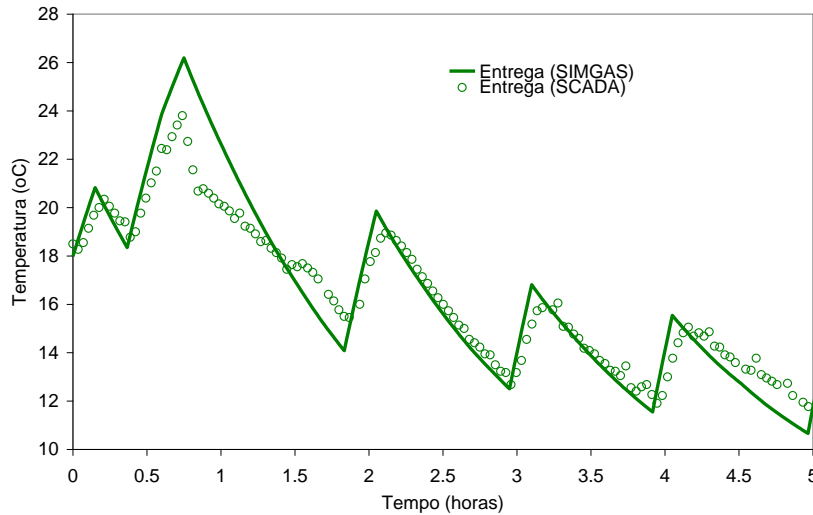
**Figura 6.20 – Históricos de temperatura da água dos aquecedores (Apagamento do aquecedor F01A)**

Na Figura 6.21 é ilustrado o histórico de temperatura na entrada e na saída da tubulação de 8" (HEAD8), neste cenário o amortecimento da temperatura de saída obtida pelo supervisor foi menor que no cenário operacional anterior com dois aquecedores ligados.



**Figura 6.21 – Históricos de temperaturas na entrada e na saída do HEAD8 (Apagamento do aquecedor F01A)**

Na Figura 6.22 é ilustrado o histórico de temperatura de entrega calculada pelo simulador e os dados registrados pelo transmissor TT022B localizado no tramo de medição. O desvio máximo encontrado entre o SIMGAS e o SCADA é de  $4,0^{\circ}\text{C}$  (16,2%) e ocorre no instante  $t=0,85\text{h}$ , e a amplitude de temperatura no SIMGAS ( $T_{\text{máx}}-T_{\text{mín}}=15,5^{\circ}\text{C}$ ) é maior que no SCADA ( $T_{\text{máx}}-T_{\text{mín}}=11,9^{\circ}\text{C}$ ).



**Figura 6.22 – Históricos de temperaturas de entrega  
(Apagamento do aquecedor F01A)**

Como conclusão do presente teste, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido apresentou bom desempenho, sendo capaz de prever o escoamento na estação de entrega tanto em condições normais de projeto, como em situações operacionais, quando eventos não esperados ocorrem.