

## **5. Validação do Simulador de Estações de Entrega**

Para determinar o escoamento do gás natural em uma estação de entrega foi desenvolvido um simulador baseado na modelagem matemática apresentada nos Capítulos 3 e 4. Detalhes de implementação do simulador e validação individual de seus módulos podem ser encontrados no Apêndice A. Neste Capítulo são apresentados dois testes de validação do Simulador de Estações de Entrega. O primeiro exemplo investiga a influência do Efeito Joule-Thomson nas válvulas e fluxo de calor requerido nos aquecedores. O segundo exemplo analisa um escoamento adiabático compressível.

### **5.1. Efeito Joule-Thomson nas Válvulas e Fluxo de Calor Requerido nos Aquecedores.**

O primeiro exemplo de validação consiste na determinação do ganho de temperatura nos aquecedores considerando fluxo de calor constante, e a queda de temperatura nas válvulas de redução de pressão devido ao efeito Joule-Thomson. A validação ocorrerá através da comparação dos resultados com o simulador dinâmico desenvolvido para estações de entrega de gás natural denominado SIMGAS, com os valores obtidos pelo simulador comercial de processos HYSYS da AspenTech. O objetivo principal é avaliar as diferenças entre as equações de estado de Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong implementadas para o cálculo das propriedades termodinâmicas do gás natural que afetam o cálculo nos equipamentos principais; e também o impacto da mudança da composição do gás natural e das variáveis de processo (pressão e temperatura) na entrada da estação nos resultados. A Figura 5.1 apresenta o diagrama esquemático do exemplo 1 com indicação no nome e do modo de controle adotado em cada equipamento.

Para o estudo de variação da composição do gás natural foram consideradas três misturas somente com parafinas (alcanos) apresentadas na Tabela 5.1, onde se buscou variar a riqueza do gás natural dentro dos limites estabelecidos pela

Portaria 104 da Agência Nacional do Petróleo - ANP (2002), que determina a composição do gás natural em cada região do Brasil. A riqueza do gás natural é definida pelo teor de componentes pesados (C3, C4+) que possuem alto peso específico e poder calorífico.

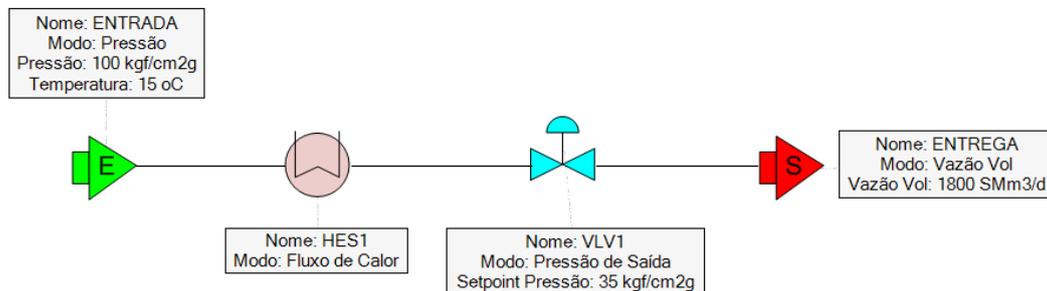


Figura 5.1 – Diagrama esquemático do exemplo 1

Tabela 5.1 – Frações Molares das Composições de Gás Natural do Exemplo 1

% Hidrocarboneto	C1 Metano	C2 Etano	C3 Propano	n-C4 nButano
Gas1	100,0	0,0	0,0	0,0
Gas2	90,0	7,0	3,0	0,0
Gas3	86,0	9,5	3,0	1,5

De acordo com a portaria 104 da ANP para a região Sudeste do Brasil o gás natural deve ser comercializado dentro das seguintes especificações:

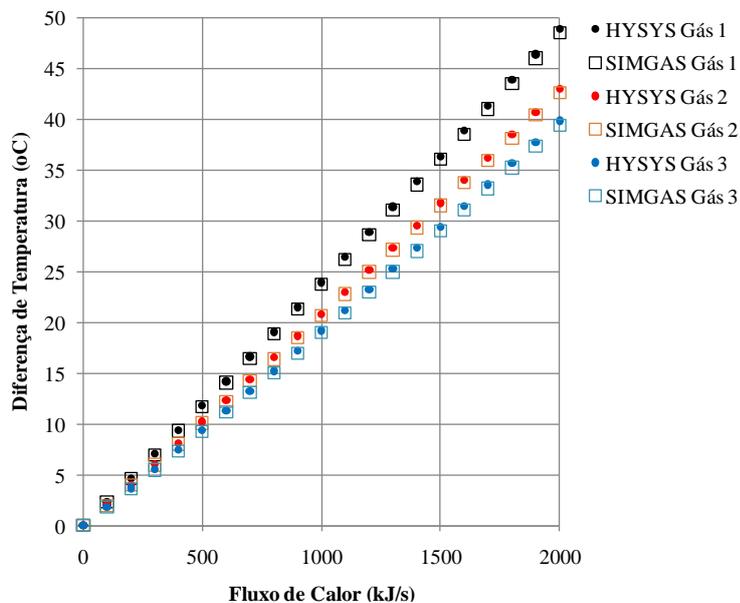
- Metano – C1 (mínimo): 86%
- Etano – C2 (máximo): 10%
- Propano – C3 (máximo): 3%
- Butano e Superiores – C4+ (máximo): 1,5%
- Oxigênio (máximo): 0,5%
- Inertes Máximo (N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>) (máximo): 4%
- Poder Calorífico Superior: 9,72 a 11,67 kWh/m<sup>3</sup>
- Índice de Wobbe: 46500 a 52500 kJ/m<sup>3</sup>

Os resultados obtidos nos simuladores SIMGAS e HYSYS são apresentados em gráficos comparativos para avaliação do desempenho dos equipamentos isoladamente. No aquecedor HES1 foi realizada a variação do fluxo de calor desprezando a perda de pressão; na válvula VLV1 foi avaliada a queda de temperatura promovida pela variação da pressão de entrada da estação considerando o aquecedor desligado. Nestes gráficos são apresentados os resultados dos casos testados com diferentes composições de gás natural segundo a Tabela 5.1 e as equações de estado: Peng-Robinson (PR) e Soave-Redlich-Kwong (SRK).

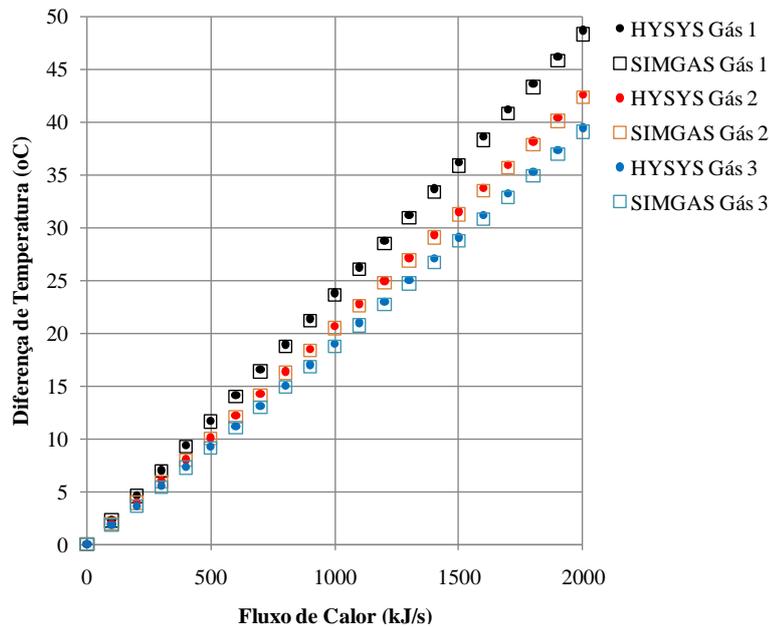
As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam o ganho de temperatura no aquecedor HES1 em função do fluxo de calor transferido ao gás, para as duas equações de estado, considerado as seguintes condições:

- Pressão de Entrada: 100 kgf/cm<sup>2</sup>
- Temperatura de Entrada: 15 °C
- Vazão Volumétrica de Entrega: 1.800.000 Sm<sup>3</sup>/dia
- Fluxo de Calor em HES1: 0 a 2000 kJ/s

Pode-se observar tanto na Fig. 5.2 quanto 5.3, uma perfeita concordância entre os resultados obtidos aqui, indicados nos gráficos como SIMGAS, que é o nome do simulador desenvolvido neste trabalho e os resultados obtidos com o simulador comercial HYSYS.



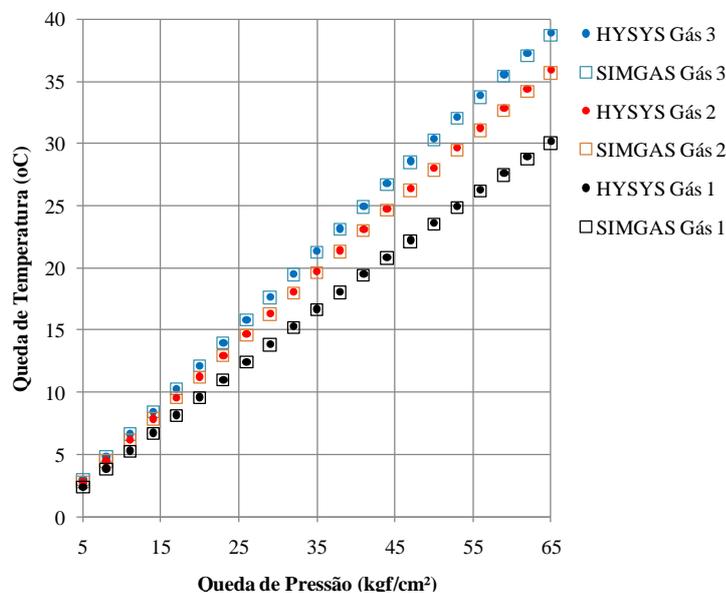
**Figura 5.2 – Ganho de Temperatura vs Fluxo de Calor no Aquecedor (Peng-Robinson)**



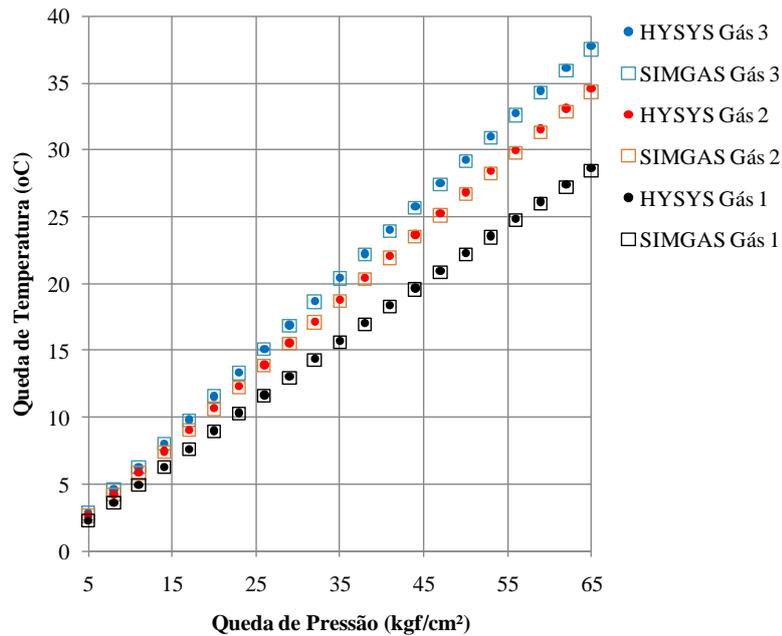
**Figura 5.3 – Ganho de Temperatura vs Fluxo de Calor no Aquecedor (Soave-Redlich-Kwong)**

A queda de temperatura em função da queda de pressão na válvula VLV1 pode ser analisada na Fig. 5.4 e 5.5 para as duas equações de estado. Estes resultados foram obtidos para as condições indicadas a seguir. Mais uma vez, observa-se perfeita concordância entre os resultados dos dois simuladores.

- Temperatura de Entrada: 15 °C
- Pressão de Entrega (Setpoint): 35 kgf/cm<sup>2</sup>
- Pressão de Entrada: 40 a 100 kgf/cm<sup>2</sup>



**Figura 5.4 – Queda de Temperatura vs Queda de Pressão na Válvula (Peng-Robinson)**



**Figura 5.5 – Queda de Temperatura vs Queda de Pressão na Válvula (Soave-Redlich-Kwong)**

Com o objetivo de avaliar a influência simultânea da variação de pressão e temperatura nas propriedades termodinâmicas que afetam o ganho de temperatura no aquecedor e a queda de temperatura na válvula, foram obtidos no SIMGAS e no HYSYS a variação do fator de compressibilidade em função da pressão para diferentes temperaturas, assim como a variação do coeficiente Joule-Thomson com a pressão e a temperatura na entrada da VLV1. Selecionou-se a equação de estado de Peng-Robinson (PR), e duas composições diferentes de gás foram empregadas: composições do Gás 1 e Gás 3.

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam o comportamento do fator de compressibilidade com pressão e temperatura para os dois gases. Observa-se que o mesmo cai com o aumento da pressão e diminuição da temperatura. Os dois gases apresentam comportamento semelhante. Ambos os simuladores apresentam exatamente os mesmos resultados.

Os resultados referentes ao coeficiente Joule-Thomson em função da pressão de entrada na VLV1, mantendo a temperatura de entrada constante e igual a 15 °C são ilustrados nas Figuras 5.8 e 5.9. Neste teste variou-se a pressão de entrada de 40 a 100 kgf/cm<sup>2</sup> e utilizou-se as duas equações de estado de Soave-Redlich-Kwong e Peng-Robinson.

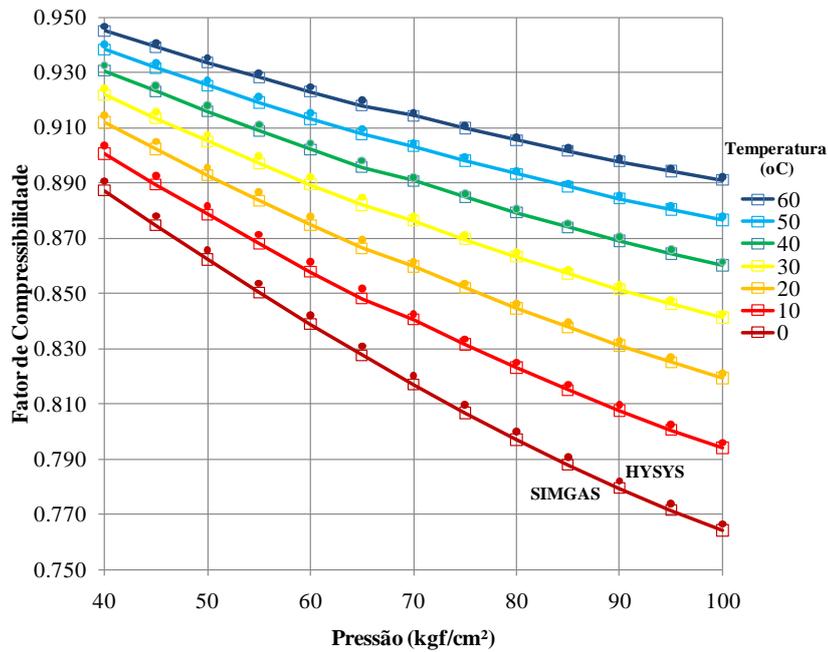


Figura 5.6 – Curvas isotérmicas para o fator de compressibilidade  
(Gás 1 – Peng-Robinson)

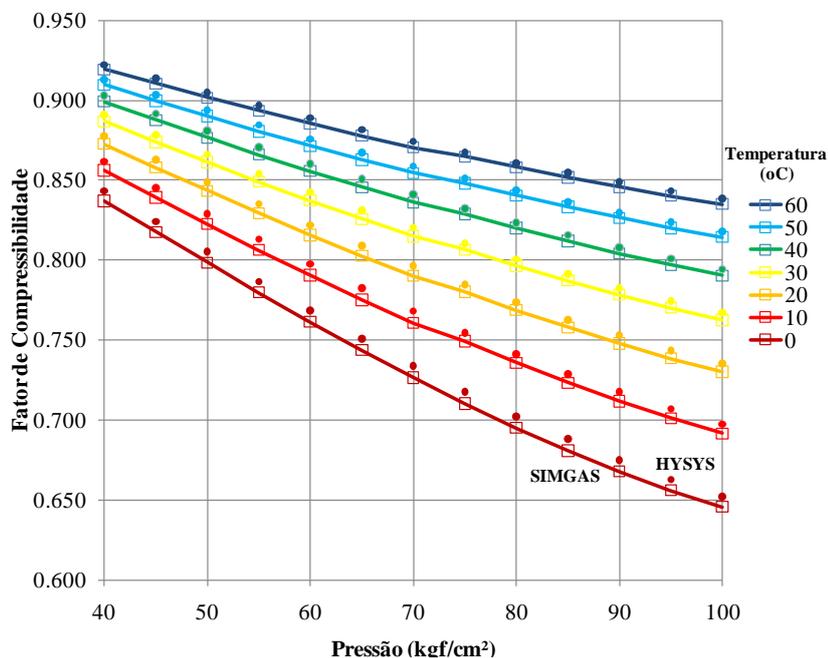


Figura 5.7 – Curvas isotérmicas para o fator de compressibilidade  
(Gás 3 – Peng-Robinson)

Analisando os resultados para os dois casos, nas Figs. 5.8 e 5.9, observa-se que os resultados obtidos no presente trabalho apresentam o mesmo comportamento que o simulador HYSYS, porém com valores ligeiramente inferiores. Ambas as equações de estado e gases, apresentam um máximo no coeficiente de Joule-Thomson para uma determinada pressão, porém a pressão

correspondente ao máximo não é a mesma. Adicionalmente, observa-se que a equação de estado de Peng-Robinson prevê maiores valores que a equação de estado de Soave-Redlich-Kwong.

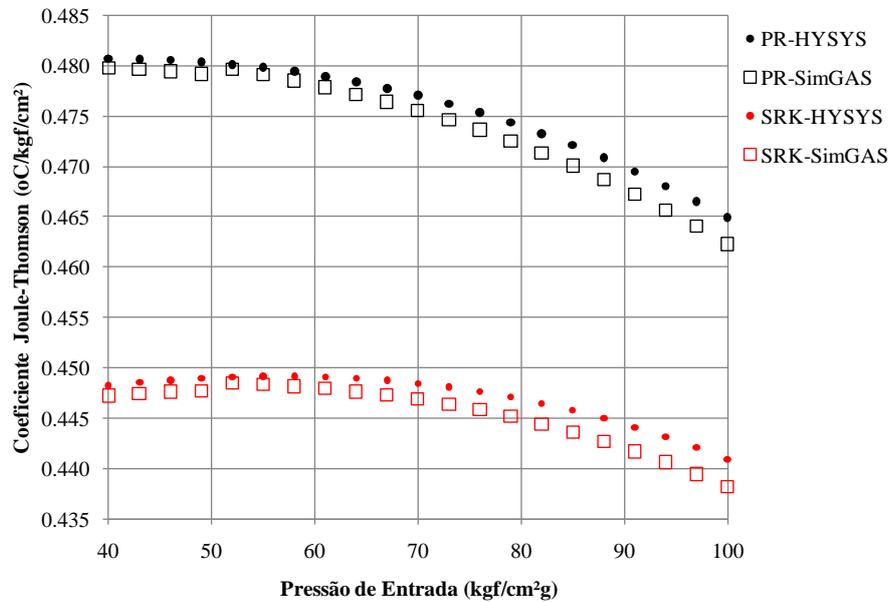


Figura 5.8 – Coeficiente J-T vs Pressão de Entrada (Gás 1)

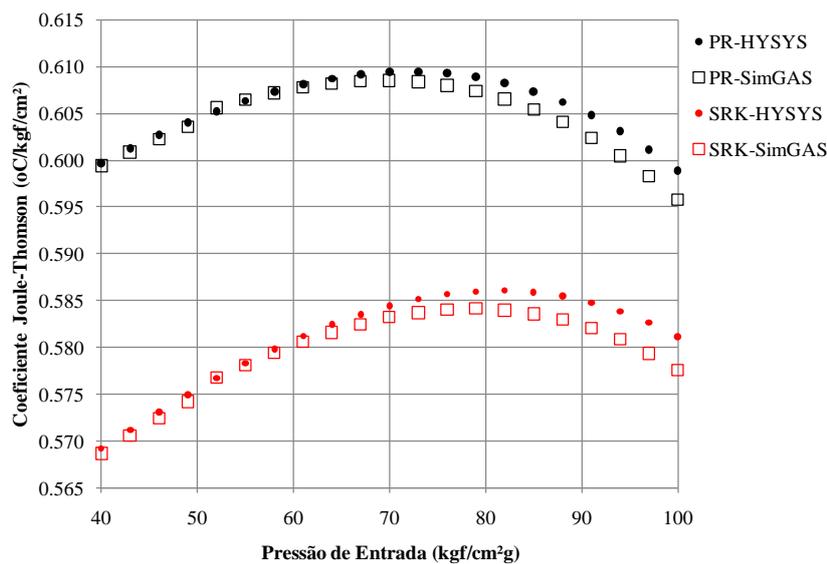


Figura 5.9 – Coeficiente J-T vs Pressão de Entrada (Gás 3)

A variação do coeficiente Joule-Thomson como função da temperatura de entrada na VLV1, mantendo a pressão de entrada constante e igual a 100 kgf/cm<sup>2</sup>, é apresentada nas Figuras 5.10 e 5.11 para os dois gases selecionados. Novamente as duas equações de estado foram testadas para os dois gases. Neste caso,

observa-se que o coeficiente de Joule-Thomson caiu com o aumento da temperatura para os dois gases e duas equações de estado. Novamente, os valores preditos com a equação de Peng-Robinson são superiores aos preditos com a equação de estado de Soave e-Redlich-Kwong, porém a concordância é melhor do que a observada no teste anterior, indicando uma menor sensibilidade deste coeficiente à temperatura.

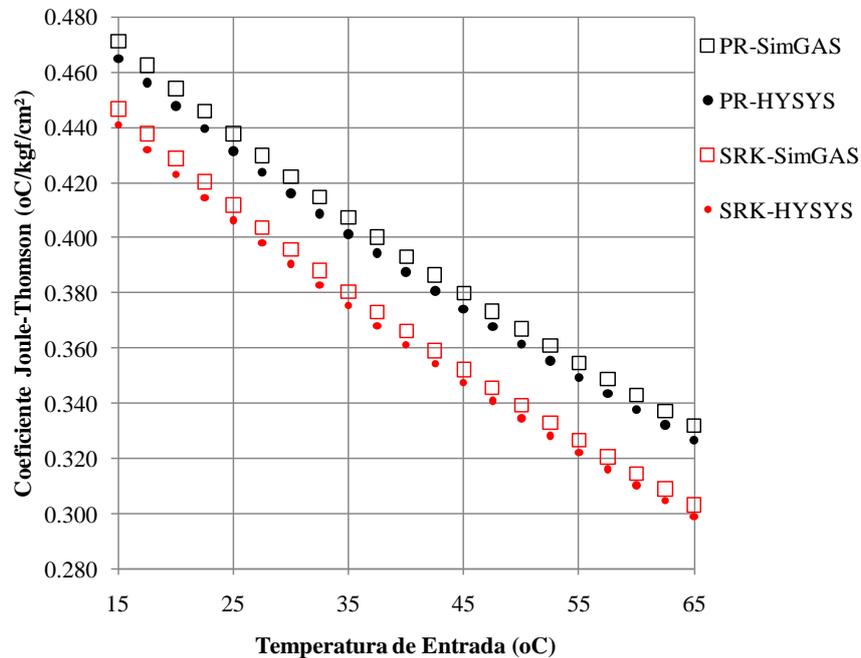


Figura 5.10 – Coeficiente J-T vs Temperatura de Entrada (Gás 1)

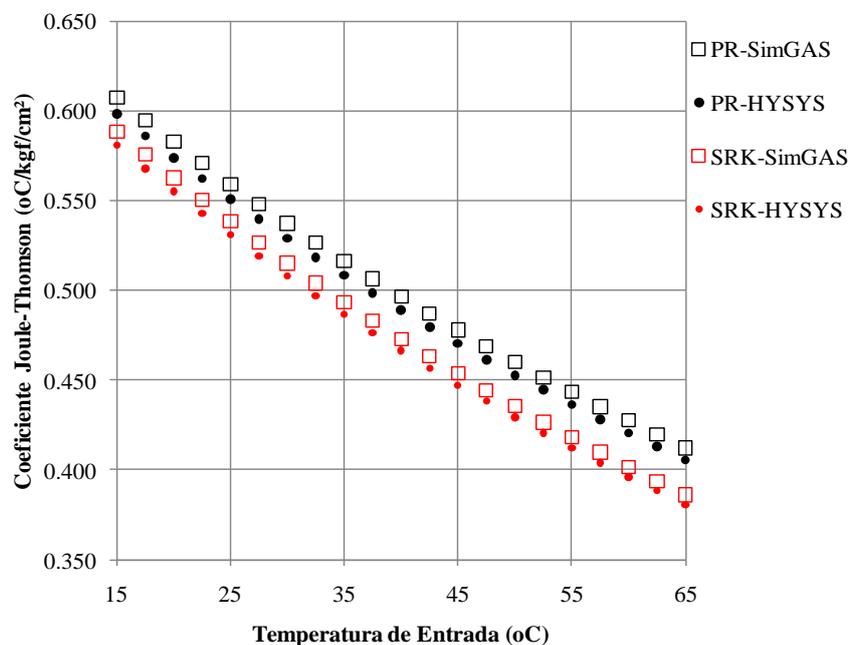


Figura 5.11 – Coeficiente J-T vs Temperatura de Entrada (Gás 3)

Como conclusão dos testes realizados, pode-se mencionar que os gráficos comparativos de diferenças de temperatura nos equipamentos mostram uma boa concordância entre os simuladores SIMGAS e HYSYS para ambas as equações de estados e todas as composições.

Os maiores desvios de temperatura nos equipamentos foram obtidos na composição de maior peso molecular Gás 3.

O maior desvio de temperatura no aquecedor HES1 entre os simuladores SIMGAS e HYSYS é de 0,43 °C (2,03 %) para PR e 0,42 °C (1,98 %) para SRK. O desvio encontrado é atribuído a diferenças no polinômio do calor específico à pressão zero e no cálculo do fator de compressibilidade.

A razão da queda de temperatura com a queda de pressão na válvula (coeficiente Joule-Thomson) varia de acordo com a composição do gás, com a pressão e a temperatura de entrada da válvula, e também de acordo com a equação de estado selecionada. O desvio máximo de temperatura entre as equações de estado de PR e SRK é de 1,57°C (5,51%) no SIMGAS e de 1,56 °C (5,44%) no HYSYS. Entre os simuladores o desvio da temperatura na válvula aumenta com a pressão e atinge valor máximo de 0,21 °C para SRK e 0,24 para PR na pressão máxima de 100 kgf/cm<sup>2</sup>.

Finalmente, pode-se afirmar que os testes de validação realizados apresentaram resultados satisfatórios.

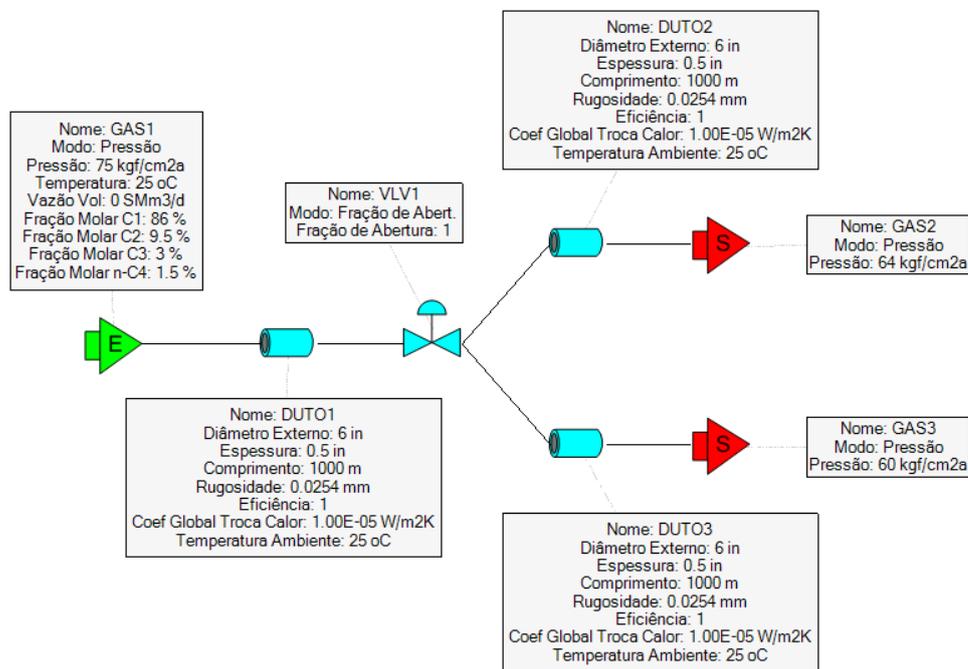
## 5.2.

### **Cálculo da vazão e da queda de pressão num escoamento adiabático compressível**

O segundo exemplo de validação verifica a modelagem das equações de conservação de quantidade de movimento linear (QML) aplicada a válvulas e dutos considerando escoamento compressível adiabático. A Figura 5.12 ilustra o diagrama esquemático composto por 03 dutos e 01 válvula. Para este exemplo considerou-se que os seguintes parâmetros são fornecidos:

- Equação de Estado de Peng-Robinson
- Condição padrão para vazão volumétrica: 20 °C e 1 atm
- Condições na entrada de GAS1:
  - Pressão de entrada: 75,0 kgf/cm<sup>2</sup>
  - Temperatura de entrada: 25,0 °C

- Composição molar do gás natural: 86% metano 9,5% etano 3,0% propano e 1,5% n-butano
- Propriedades nos dutos DUTO1, DUTO2 e DUTO3:
  - Coeficiente global de transferência:  $U=1e-5$  W/m<sup>2</sup>.K
  - Temperatura ambiente: 25 °C
  - Diâmetro externo: 6 pol
  - Espessura de parede: 0,5 pol
  - Rugosidade: 0,0254 mm
  - Comprimento: 1000 m
  - Fator de atrito calculado pela equação de Colebrook.
- Válvula VLV1:
  - Fração de Abertura: 1,0 (Curva de Abertura Linear)
  - $C_v$  máximo = 100 gpm/psi<sup>0,5</sup>



**Figura 5.12 – Diagrama esquemático do exemplo 2 (Parâmetro de Entrada)**

Neste exemplo serão comparados os resultados obtidos entre o simulador de estação de entrega SIMGAS e o simulador de rede de gás TGNET 2.1 (Pipeline Studio) da empresa Energy Solutions considerando duas condições diferentes nos pontos de saída de gás:

- Condição de Pressão nas Saídas: de 64,0 kgf/cm<sup>2</sup> em GAS2 e 60,0 kgf/cm<sup>2</sup> em GAS3

- Condição de Vazão nas Saídas: 200,0 SMm<sup>3</sup>/d em GAS2 e 1000,0 SMm<sup>3</sup>/d em GAS3

A partir da Tabela 5.2 é possível avaliar como a vazão volumétrica, pressão, temperatura e velocidade nos dutos é afetada em ambos os simuladores por mudanças nas condições de contorno. No SIMGAS a variação de temperatura nos dutos e válvulas é promovida apenas pelo efeito Joule-Thomson, pois foi desconsiderando o efeito do trabalho viscoso na equação da energia.

**Tabela 5.2 – Comparação entre simuladores SIMGAS e TGNET (exemplo 2)**

SIMGAS - Pressão definida nas saídas							
Nome	Vazão Vol	Pressão	Pressão	Temperatura	Temperatura	Velocidade	Velocidade
		Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Unidade	SMm <sup>3</sup> /d	kgf/cm <sup>2</sup> a	kgf/cm <sup>2</sup> a	°C	°C	m/s	m/s
DUTO1	1260,52	75,00	68,28	25,00	21,75	12,88	14,12
DUTO2	304,81	64,45	64,00	19,80	19,57	3,61	3,64
DUTO3	955,71	64,45	60,00	19,80	17,46	11,33	12,17
TGNET - Pressão definida nas saídas							
DUTO1	1257,78	75,00	68,26	25,00	22,30	12,82	14,11
DUTO2	305,979	64,45	64,00	20,13	20,33	3,66	3,63
DUTO3	951,798	64,45	60,00	20,33	18,36	11,29	12,16
SIMGAS - Vazão definida nas saídas							
DUTO1	1200,00	75,00	68,94	25,00	22,07	12,26	13,31
DUTO2	200,00	65,51	65,31	20,34	20,24	2,33	2,34
DUTO3	1000,00	65,51	60,70	20,34	17,83	11,67	12,58
TGNET - Vazão definida nas saídas							
DUTO1	1200,00	75,00	68,89	25,00	22,55	12,23	13,33
DUTO2	200,00	65,48	65,29	20,72	20,80	2,34	2,34
DUTO3	1000,00	65,48	60,63	20,80	18,68	11,68	12,64

Os desvios máximos encontrados entre os simuladores SIMGAS e TGNET para as condições estudadas foram:

- Caso de Pressão Conhecida:
  - vazão: 3,9 SMm<sup>3</sup>/dia (0,41%) e temperatura: 0,9 °C (4,89%)
- Caso de Vazão Conhecida:
  - pressão: 0,22 kgf/cm<sup>2</sup> (0,34%) e temperatura: 0,85 °C (4,53%)

Mais uma vez, em face aos excelentes resultados, pode-se considerar que os testes mostraram a metodologia empregada no presente trabalho é adequada.