

SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM GASODUTOS



Claudio Veloso Barreto

cveloso@simdut.com.br

cvb-prg@puc-rio.br

SIMDUT

Núcleo de Simulação Termohidráulica de Dutos
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Mecânica

INTRODUÇÃO

❑ A solução de problemas em Mecânica dos Fluidos envolve a determinação das propriedades do fluido em função da posição e do tempo.

❑ Quando o problema envolve escoamentos, a propriedade mais procurada é a velocidade (vetorial)

$$\mathbf{V}(x,y,z,t) = u(x,y,z,t)\mathbf{i} + v(x,y,z,t)\mathbf{j} + w(x,y,z,t)\mathbf{k}$$

❑ Diversas outras propriedades podem ser determinadas a partir da velocidade como a **vazão volumétrica**

❑ Junto com o campo de pressão e de temperatura, formam o conjunto de propriedades mais procurados na solução de problemas de engenharia.

❑ Porém, devido à complexidade das equações envolvidas, muitas vezes é impossível obter soluções analíticas

❑ A crescente disseminação dos computadores e o desenvolvimento de técnicas de solução numérica, permitiram tratar problemas cada vez mais complexos.

ESCOAMENTO EM GASODUTOS

FORMULAÇÃO

Equações de Conservação

- ❑ A solução de escoamentos envolve a determinação das propriedades do fluido em função da posição e do tempo
- ❑ São empregadas as leis de conservação de massa, de quantidade de movimento, de energia, de quantidade de movimento angular e de variação de entropia
- ❑ Estas leis, transformadas num sistema de equações diferenciais, somente permitem soluções analíticas em casos muito particulares. Para o tratamento dos casos gerais são requeridas técnicas de solução numérica para a obtenção das soluções

ESCOAMENTO EM GASODUTOS

FORMULAÇÃO

Equações de Conservação para Análise de Escoamentos em Dutos:

□ Massa

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho a^2}{\xi} \left[\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\beta}{c_p} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] = 0$$

□ Quantidade de Movimento Linear

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f |V| V}{2 D} - g \operatorname{sen} \alpha$$

□ Energia

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{f V^2 |V|}{2 D} + \frac{1}{\rho A} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k A}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] - \frac{4 U_G}{\rho c_p D} (h - h_\infty)$$

ESCOAMENTO EM GASODUTOS

FORMULAÇÃO

Equação de Estado (Equação de Fechamento)

- Observa-se das cinco equações de conservação: 01 massa, 03 Q.M.L, 01 energia) o seguinte conjunto de variáveis:

P, u, v, w e T (ou \hat{u} , energia interna, ou h, entalpia)

- Porém, o sistema não está determinado, visto que existem propriedades nas equações que são funções das variáveis: a massa específica ρ , a viscosidade μ , a condutividade térmica k entre outras. Assim, é necessário que sejam utilizadas relações do tipo:

$$\rho = \rho(p, T)$$

$$\mu = \mu(p, T)$$

- Estas relações dependem do fluido que estiver sendo analisado

EQUAÇÕES DE ESTADO PARA GÁS

Equação de Estado (Gás Ideal ou Perfeito)

$$PV = nRT \quad n = m / w_m$$

■ onde

- n é o número de moles do gás
- w_m é o peso molecular do gás
- R é a constante universal dos gases, que no sistema métrico vale 8,3145 J/(mol.K)

■ A massa específica ρ é definida pela relação:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

■ Porém, um gás real não se comporta como um gás ideal, assim a equação de estado para um gás real é definida por:

$$P/\rho = ZR_g T$$

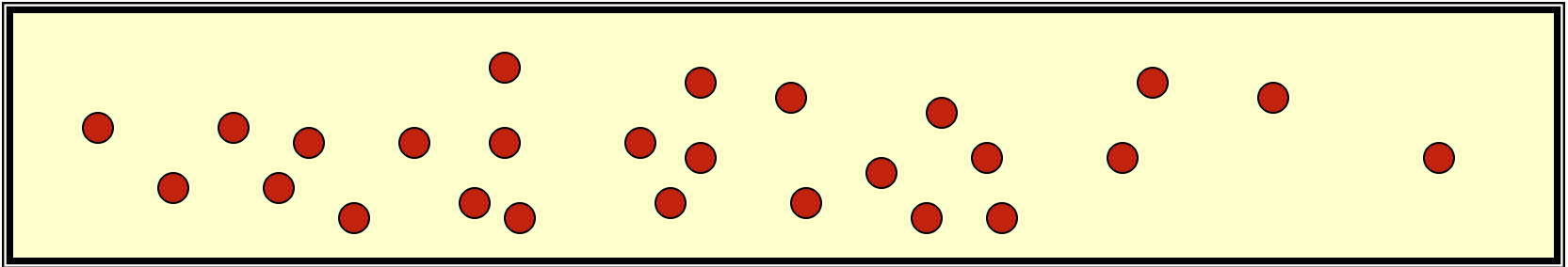
GÁS IDEAL


$$Pv = RT$$

- ❑ As moléculas do gás não tem qualquer efeito uma nas outras, nem atração nem repulsão.
- ❑ Gases reais em pressões muito baixas comportam-se como gases ideais.

GAS REAL

$$Pv = ZRT$$



- ❑ As moléculas tem efeito uma nas outras, atração e repulsão
- ❑ O aumento de pressão reduz a distância entre as moléculas.
- ❑ Temperaturas baixas reduzem a velocidade das moléculas – tornam-se mais suscetíveis a força das moléculas vizinhas.
- ❑ **Logo: quanto maior a pressão e menor a temperatura, mais os gases se afastam do modelo de gás ideal.**

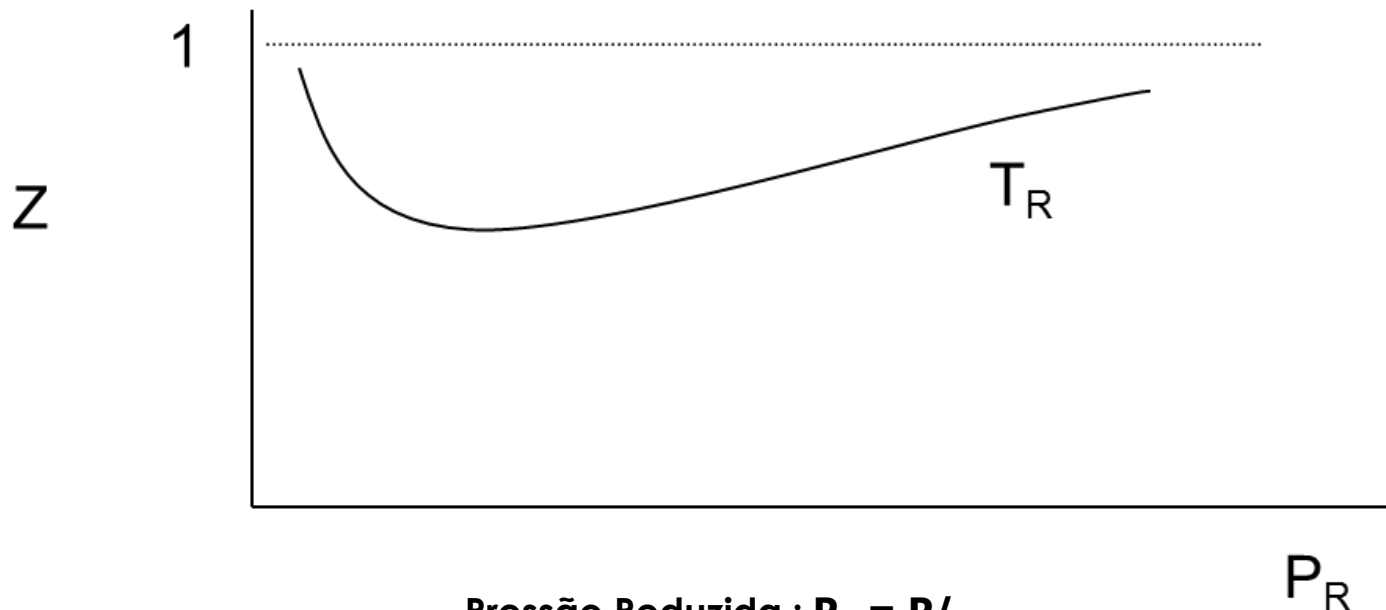
FATOR DE COMPRESSIBILIDADE

■ **Fator de compressibilidade Z:** razão entre o volume ocupado por um gás real e um ideal numa dada condição de pressão e temperatura.

$$Z(p, T) = \frac{\text{Volume}_{\text{Real}}}{\text{Volume}_{\text{Ideal}}} = \frac{p}{\rho \cdot R \cdot T}$$

Z é adimensional

Z = 1 (Gas Ideal)

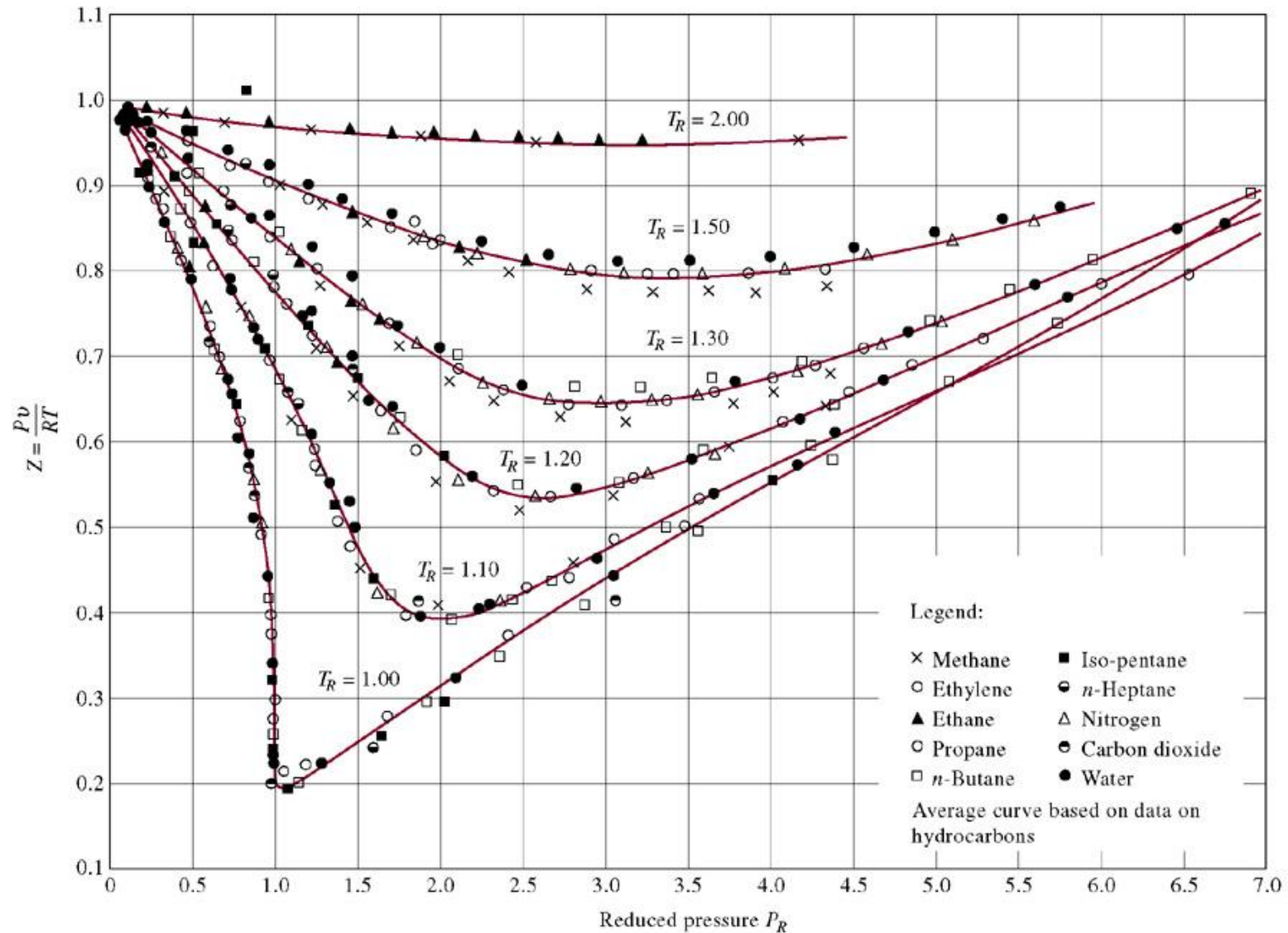


Pressão Reduzida : $P_R = P / P_{\text{crit}}$

Temperatura Reduzida : $T_R = T / T_{\text{crit}}$

FATOR DE COMPRESSIBILIDADE

Fator de compressibilidade Z para diversos gases:



DENSIDADE DO GÁS

- Considerando o peso molecular do ar é tomado como **28.9625 g/gmol**.
- A **G – Densidade relativa de uma mistura de gás** pode ser calculado como:

$$G = \frac{\sum y_i MW_i}{28.9625}$$

y_i = fração molar do componente i

MW_i = peso molecular do componente i

MASSA ESPECÍFICA PADRÃO

- Massa específica padrão

$$\rho_{std} = \frac{P_{std}}{Z_{std} \cdot R_g \cdot T_{std}}$$

$$R_g = \frac{\mathfrak{R}}{Mw_g}$$

Mwg: massa molecular

\mathfrak{R} Constante Universal dos Gases (8,314510 J/mol.K)

Condição Padrão Petrobrás:

$$T_{std} = 293,15 K (20^\circ C) \quad p_{std} = 101325 Pa \quad Z_{std} \approx 1$$

EQUAÇÕES DE ESTADO (GÁS)

Equações de Estado para Gás Natural (Não composicional)

■ CNGA – Califonia Natural Gas Association Equation

Utilizada para análises simplificadas.

$$0,554 \leq G \leq 0,75$$

$$Z = \left[1 + \frac{5,1706 \cdot 10^5 \times P \times 10^{1,785G}}{T^{3,825}} \right]^{-1}$$

$$0,75 \leq G \leq 1$$

$$Z = \left[1 + \frac{13,752 \cdot 10^5 \times P \times 10^{1,188G}}{T^{3,825}} \right]^{-1}$$

- T é a temperatura em graus K
- P é a pressão **manométrica** em kgf/cm²
- G é a razão entre os pesos moleculares do gás e do ar (28,97)

EQUAÇÕES DE ESTADO (GÁS)

Equação de Estado Cúbicas (Composicional)

■ Peng-Robinson

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v(v + b) + b(v - b)}$$

$$a = 0,45724 \cdot \frac{R^2 T_c^2}{p_c} \left[1 + m \left(1 - \sqrt{T/T_c} \right) \right]^2 \quad m = 0,37464 + 1,54226 \omega - 0,26992 \omega^2$$

$$b = 0,0778 \frac{RT_c}{p_c}$$

■ Fase Gás: Fator Z será igual a maior raiz real do polinômio:

$$Z^3 - Z^2(B - 1) + Z(A - 3B^2 - 2B) + B^3 - B^2 - AB = 0$$

$$A = \frac{aP}{R^2 T^2} \quad B = \frac{bP}{RT}$$

EQUAÇÕES DE ESTADO (GÁS)

Equação de Estado Cúbicas (Composicional)

■ Soave-Redlich-Kwong

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)}$$

$$a = 0,42748 \frac{R^2 T_c^2}{p_c} \left[1 + m \left(1 - \sqrt{T/T_c} \right) \right]^2 \quad m = 0,48 + 1,57\omega - 0,176\omega^2$$

$$b = 0,08664 \frac{RT_c}{p_c}$$

■ Fase Gás: Fator Z será igual a maior raiz real do polinômio:

$$Z^3 - Z^2 + Z(A - B^2 - B) - AB = 0$$

$$A = \frac{aP}{R^2 T^2} \quad B = \frac{bP}{RT}$$

EQUAÇÕES DE ESTADO (GÁS)

Equações de Estado – Pipeline Studio

■ **SAREM para Gás Natural - Não composicional**

- Utilizada para análises simplificadas.
- A correlação geral de SAREM requer como parâmetros de entrada, apenas a densidade relativa do gás, o poder calorífico e a composição de CO₂ .

■ **BWRS (Benedict – Webb –Rubin - Starling) - Composicional**

- Gera resultados mais precisos.
- Requer uma análise completa da composição molecular do gás (cromatografia) para caracterizar o fluido.

VISCOSIDADE GÁS NATURAL

Equação de Viscosidade

■ Correlação de Lee (Gás natural):

$$\mu = 10^{-4} K \exp(X\rho^Y)$$

$$K = \frac{(9,4 + 0,02M)T^{1,5}}{209 + 19M + T}$$

$$X = 3,5 + \frac{986}{T} + 0,01M$$

$$Y = 2,4 - 0,2X$$

sendo T em R, ρ em g/cm³ e μ em cP

- A viscosidade de gases é muito menor que a de líquidos. Como exemplo, um petróleo pode ter a viscosidade de 10cP (centipoise), enquanto a viscosidade de um gás natural é da ordem de 0,011cP

ESCOAMENTO EM REGIME

Escoamento compressível em regime permanente

- **Pressão:** é definida como força exercida sobre uma determinada área. Algumas unidades utilizadas: Pa (N/m²), psi (lbf/in²), atm, kgf/cm²
- **Pressão absoluta:** é a pressão do gás medida por um manômetro somada à pressão atmosférica (1,03322kgf/cm²a)
- **Pressão absoluta média** num duto com escoamento de gás é determinada por:

$$P_m = \frac{2}{3} \left[\frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 - P_2^2} \right] = \frac{2}{3} \left[P_1 + P_2 - \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2} \right]$$

ESCOAMENTO EM REGIME

Escoamento compressível em regime permanente

- **Empacotamento:** é o volume de gás contido num determinado trecho do gasoduto, nas condições padrões :

$$V_b = M \cdot \rho_{std} \quad M = A \cdot L \cdot \rho_m \quad \rho_m = \frac{P_m}{Z_m \cdot R_g \cdot T_{std}}$$

- Onde:
 - V_b = inventário ou volume de gás (a 20 °C, 1 atm) em Pm^3
 - M é a massa de gás no duto (kg)
 - A = área transversal – m^2
 - L = comprimento do gasoduto - m
 - P_m = pressão absoluta média - kgf/cm^2 abs
 - T_m = Temperatura absoluta média - K
 - Z_m = fator de compressibilidade com P_m e T_m (adimensional)
 - ρ_{std} = massa específica (a 20 °C, 1 atm) – kg/m^3

EXERCÍCIO #1

EXERCÍCIO 1

Calcule o **empacotamento** e a **velocidade média** do escoamento num duto de **150km**, **32"** de diâmetro externo, **0,5"** de espessura, que transporta **32 MMm³/d** de gás natural, sendo a pressão no início de **100kgf/cm²** e pressão no final de **39,0 kgf/cm²**.

- Condição de referência: 20 °C e 1 atm**
- Temperatura média do escoamento: 18 °C**
- Densidade do gás nas condições de referência: 0,65**
- Equação de estado: Gás ideal ($Z = 1$)**

EXERCÍCIO #1

CALCULO_VAZÃO_GASODUTO.XLS (VELOCIDADE E INVENTÁRIO GÁS IDEAL)

Dados do problema e demais constantes

Variável	Valor SI	Unidade SI		
Tstd	293.15	K		
Pstd	101325	Paa		
G	0.65			
Rho ar	1.023	kg/m ³	Valor	Unidade
p1	9907975	Paa	100	kgf/cm ²
p2	3925918.5	Paa	39	kgf/cm ²
Rho std	0.78	kg/m ³		
L	150000	m	150	km
Diametro externo	0.8128	m	32	pol
Espessura	0.0127	m	0.5	pol
Diametro interno	0.7874	m	32	pol
Qstd	370.37	Sm ³ /s	32	MM Sm ³ /dia
T med	291.15	K	18	oC

Variáveis intermediárias calculadas:

Pm	7348074	Paa
Rho médio	57.14	kg/m ³
Área	0.487	m ²

Rho entrada	77.052	kg/m ³
Rho saída	30.531	kg/m ³

EXERCÍCIO #1

CALCULO_VAZÃO_GASODUTO.XLS (VELOCIDADE E INVENTÁRIO)

Resultados da vazão mássica, velocidade entrada, saída e média

Variável	Resultado	Unidade
Vazão mássica	289.85	kg/s
Vazão entrada	3.76	m ³ /s
Vazão saída	9.49	m ³ /s
Velocidade entrada	7.73	m/s
Velocidade saída	19.50	m/s
Velocidade média	10.42	m/s

Inventário de gás (Z=1)

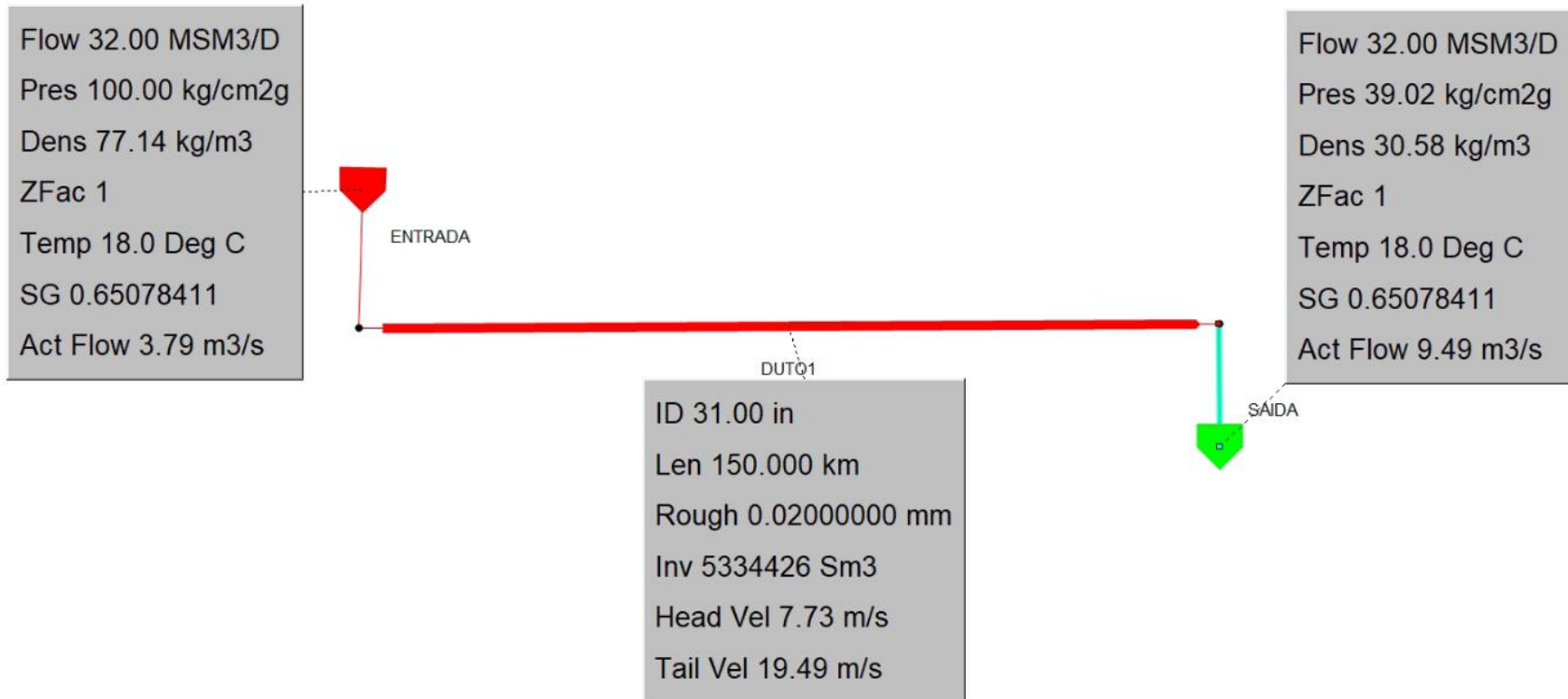
Empacotamento	5333216	Sm³
----------------------	----------------	-----------------------

5.3332 Milhões de Sm³

$$V_{\text{gas}} = \rho_{\text{médio}} / \rho_{\text{std}} * (L * A)$$

EXERCÍCIO #1

EXERCÍCIO #1 (GAS IDEAL . Z=1)



VAZÃO EM GASODUTOS

Vazão Volumétrica de Gás – Regime Permanente

■ Equação Geral para determinação da vazão num gasoduto:

$$Q_{std} = \eta C_1 C_2 \frac{T^{std}}{p^{std}} \left[\frac{p_1^2 - p_2^2 - \frac{2G_g p_m^2}{Z_m R T_m} g(z_2 - z_1)}{G_g^A L Z_m T_m} \right]^B D^C$$

Q_{std} = vazão volumétrica

L = comprimento desenvolvido do gasoduto

D = diâmetro interno

H_1, H_2 = Elevação inicial e final

P_1, P_2 = Pressões inicial e final

P_m = Pressão média

T = temperatura absoluta média do fluxo

G = Densidade do gás (em relação ao ar)

Z = fator de compressibilidade médio do gás

η = eficiência

f = coeficiente de atrito

$C_1 = 13,305$

R em m^2/s^2K

VAZÃO EM GASODUTOS

Vazão Volumétrica de Gás – Regime Permanente

Equação Geral para determinação da vazão num gasoduto

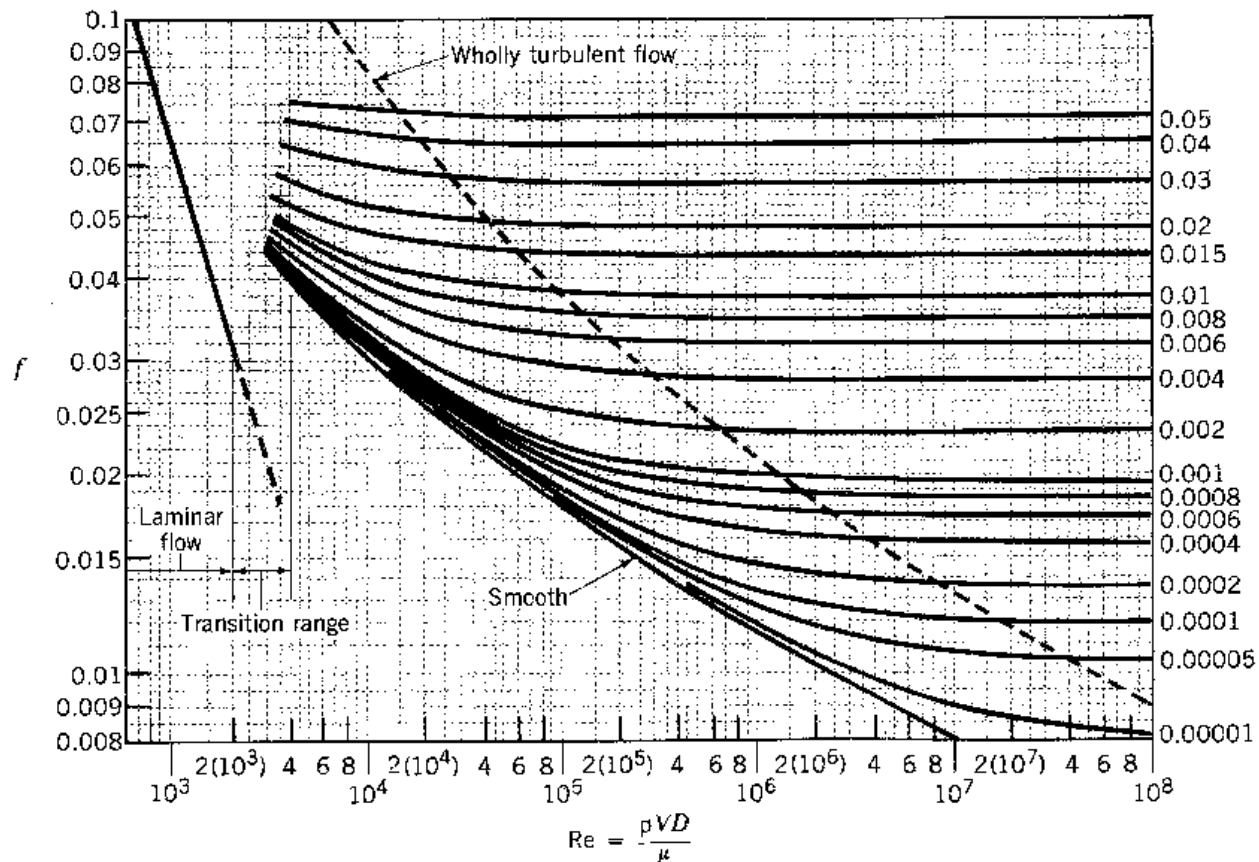
$$Q_{std} = \eta C_1 C_2 \frac{T^{std}}{p^{std}} \left[\frac{p_1^2 - p_2^2 - \frac{2G_g p_m^2}{Z_m R T_m} g(z_2 - z_1)}{G_g^A L Z_m T_m} \right]^B D^C$$

Equação	A	B	C	C ₁	C ₂
Colebrook	1,0	0,5	2,5	13,305	$1/\sqrt{f}$
Weymouth	1,0	0,5	2,6667	137,32	1,0
Panhandle-A	0,8539	0,5394	2,6182	99,51	1,0
Panhandle-B	0,9608	0,51	2,53	137,24	1,0
AGA-A	1,0	0,5	2,5	13,303	$20 \cdot C_f \log_{10}(\text{Re}\sqrt{f}/2,51)$
AGA-B	1,0	0,5	2,5	13,303	$2,0 \log_{10}(3,7 D/Ru)$

FATOR DE ATRITO

Estado Estacionário: principais equações

■ Reynolds



$Re < 2000$

$$f = \frac{64}{Re}$$

$Re > 4000$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$\epsilon \sim 0,0018 \text{ in}$

FATOR DE ATRITO

Estado Estacionário: principais equações

■ Fator de Atrito – Eq. Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,87 \cdot \ln \left(\frac{Ru/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

■ Onde:

D é o diâmetro interno

Ru é a rugosidade

f é o fator de atrito
(adimensional)

Re é o n. de Reynolds

■ **Número de Reynolds:** é um valor adimensional que permite inferir as condições do escoamento

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{VD\rho}{\mu}$$

■ Onde:

V é a velocidade

ρ é a massa específica

μ é a viscosidade absoluta

ν é a viscosidade

cinemática, definida por μ/ρ

Determinação de vazão:

- **150km** de extensão
- **32"** de diâmetro externo
- **0,5"** de espessura
- **0,02mm** de rugosidade
- Temperatura do escoamento: 18 °C
- Pressão no início de **100** kgf/cm²
- Pressão no final de **39,0** kgf/cm²

EXERCÍCIO #2

COMPOSIÇÃO DO GÁS

Composição do Gás	Porcentagem	Peso Molecular
Metano C1	85	16,01
Etano C2	10	30,07
Propano C3	5	44,10

Determine as seguintes variáveis do problema

- Peso molecular
- Densidade
- Pressão média
- Fator de compressibilidade
- Fator de atrito
- Vazão
- Compare as equações de **Colebrook** e **Weymouth**

EXERCÍCIO #2

PLANILHA CALCULO_VAZÃO_GASODUTO.XLSX

Peso molecular

Composição do Gás	Porcentagem	Peso Molecular
Metano C1	85	16.01
Etano C2	10	30.07
Propano C3	5	44.1

Peso molecular	18.8205	
Peso molecular ar	28.8	
Densidade SG	0.653489583	
Rho ar	1.023	kg/m ³
Rg	441.78	J/kmol.K

Cálculo do Fator Z médio

Z-CNGA	0.824
---------------	--------------

EXERCÍCIO #2

PLANILHA CALCULO_VAZÃO_GASODUTO.XLSX

Coefficiente de atrito

Equação de dimensionamento

Equação Gás	Colebrook	
Pm	7348073.87	Pa
A	1.000	Constantes
B	0.500	Constantes
C	2.500	Constantes
C1	13.305	Constantes
C2	10.541	F atrito

1Pa.s=	1000cP
Visc	0.0110125 cP
e/D	2.54001E-05
Re	48106185.77
f para Colebroke	
f	0.009532224

$$Q_{std} = \eta C_1 C_2 \frac{T^{std}}{p^{std}} \left[\frac{p_1^2 - p_2^2 - \frac{2G_g^A p_m^2}{Z_m R_{ar} T_m} g(z_2 - z_1)}{G_g^A L Z_m T_m} \right]^B D^C$$

EXERCÍCIO #2

PLANILHA CALCULO_VAZÃO_GASODUTO.XLSX

COLEBROOK

Cálculo da vazão

Variável	Resultado	Unidade	Valor	Unidade
Qstd	418.73	m³/s	36.17860859	MMm³/d
Rho std	0.78	kg/m ³		
Rho médio	69.32	kg/m ³		
Veloc média	9.71	m/s		

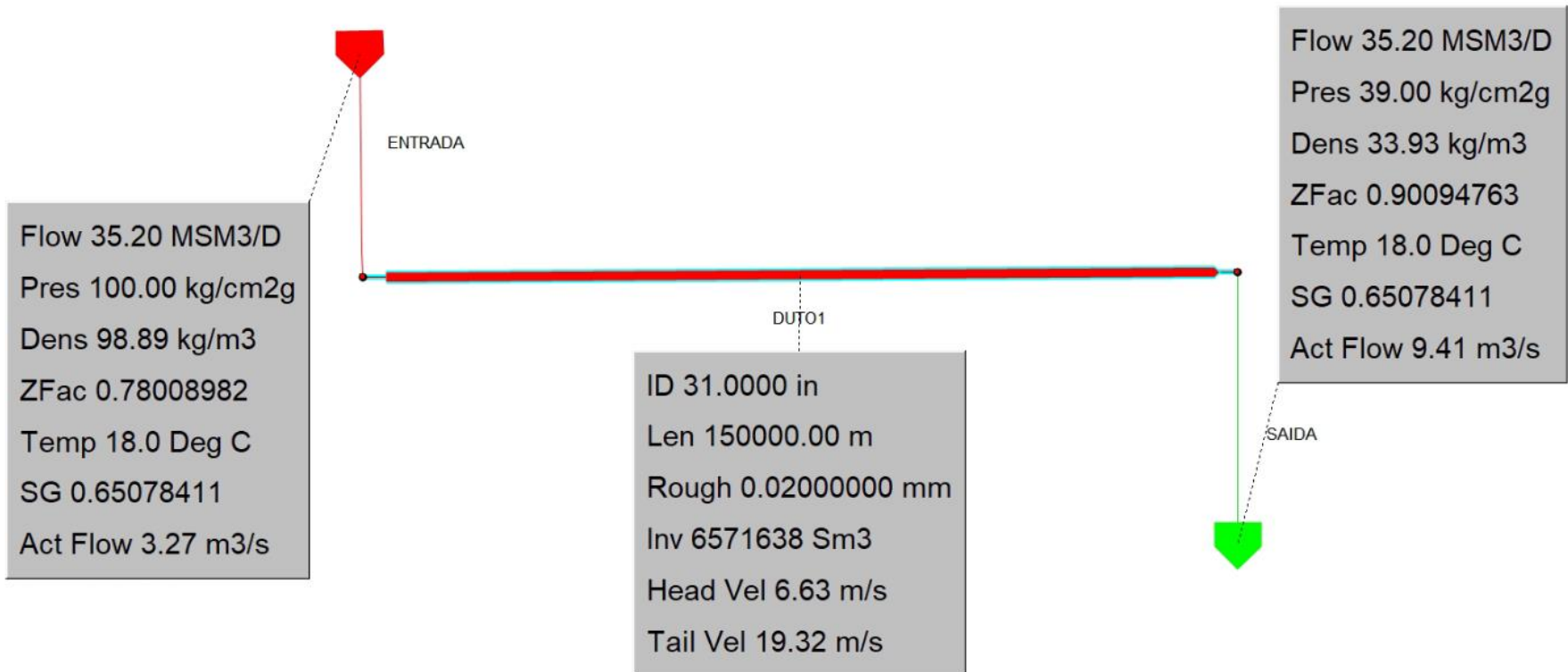
WEYMOUTH

Cálculo da vazão

Variável	Resultado	Unidade	Valor	Unidade
Qstd	393.98	m³/s	34.03986317	MMm³/d
Rho std	0.78	kg/m ³		
Rho médio	69.32	kg/m ³		
Veloc média	9.13	m/s		

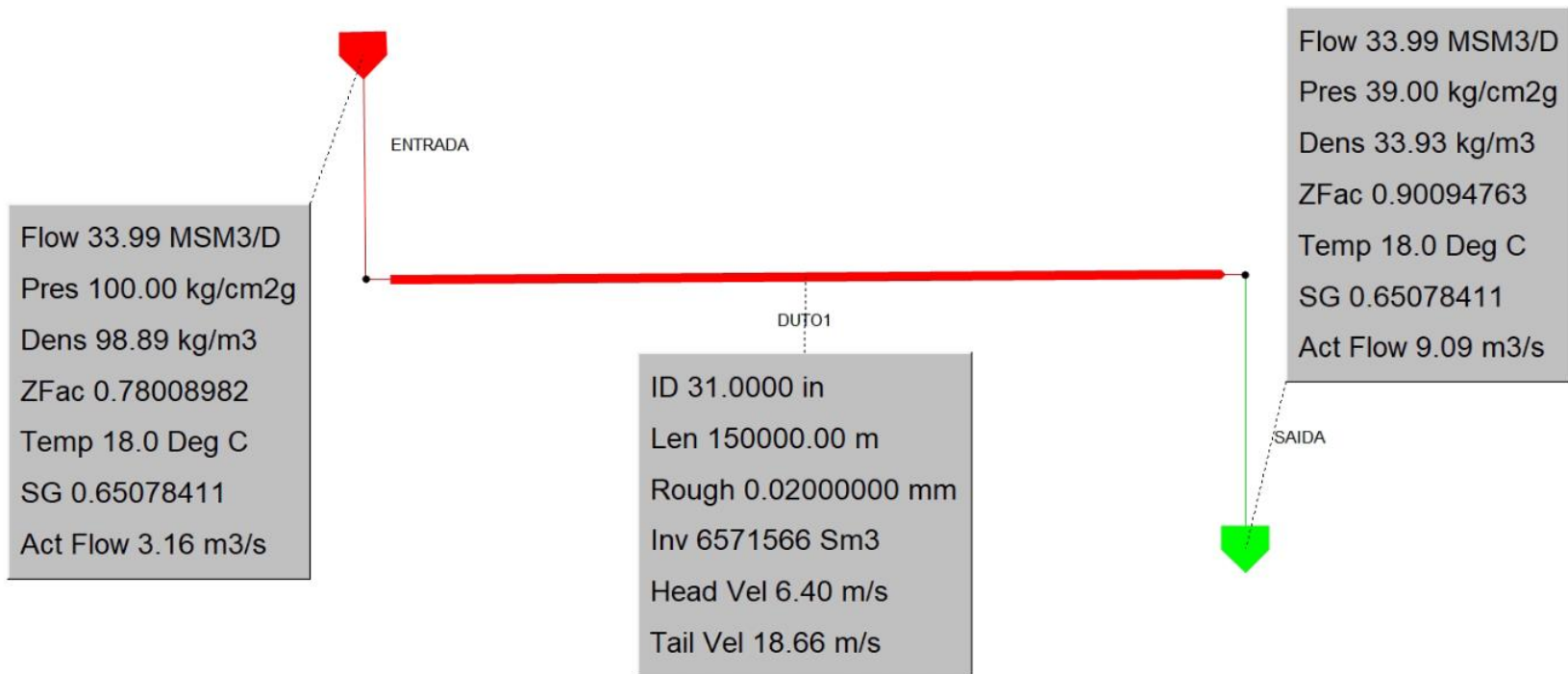
EXERCÍCIO #1

EXERCÍCIO #2 (CNGA E COLEBROOK)



EXERCÍCIO #1

EXERCÍCIO #2 (CNGA E WEYMOUTH)



ELEMENTOS BÁSICOS PARA A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS

Ponto de Recebimento (Supply)

- O ponto de recebimento é o elemento pelo qual o fluido entra no sistema
- Além disto, as características específicas do fluido devem ser passadas para que o simulador possa calcular suas propriedades
- O ponto de recebimento do gás normalmente é modelado para trabalhar com uma condição de contorno de pressão ou de vazão máximas
- Em alguns casos, dependendo da lógica do simulador, pode-se selecionar uma variável para condição de contorno, mas informar o valor da outra variável
- Desta forma o simulador interpreta que a primeira condição deve ser obedecida até que a segunda seja violada

ELEMENTOS BÁSICOS PARA A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS

Pontos de Entrega (Delivery)

- Em sistemas de transporte de fluidos, o ponto de entrega normalmente representa o cliente que espera (contratou) receber uma determinada quantidade do fluido (produto)
- A condição de contorno mais comum é de vazão máxima. Porém, normalmente os pontos de entrega podem ter uma restrição extra de pressão mínima.
- Assim, como no caso do ponto de recebimento, pode-se também informar esta condição extra ao simulador e, dependendo da lógica de funcionamento, esta condição será utilizada como nova condição de contorno caso esta seja violada

ELEMENTOS BÁSICOS PARA A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS

Dutos (Pipes)

- Dutos de comprimento de centenas de metros ou mais devem ser simulados utilizando as instruções de modelagem de dutos de transferência
 - Cada linha de transferência (segmento de duto) deve ter diâmetro, espessura, revestimento e elevação uniformes
 - Se houver qualquer mudança nestas características, ou algum equipamento intermediário que necessite ser modelado, o duto deve ser dividido em múltiplos segmentos, cada um com características uniformes ao longo do comprimento
- O perfil de elevação do terreno é simulado através de segmentos retos de duto de inclinação constante. Deve-se criar tantos segmentos quantos forem necessários para acompanhar o terreno.
- Cada extremo de um segmento de duto é chamado de um nó. Assim, dois dutos estão conectados quando o nó da extremidade final de um é o mesmo nó da extremidade inicial do outro.
- Normalmente os nós carregam a informação da elevação dos extremos do segmento de duto.

ELEMENTOS BÁSICOS PARA A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS

Válvulas

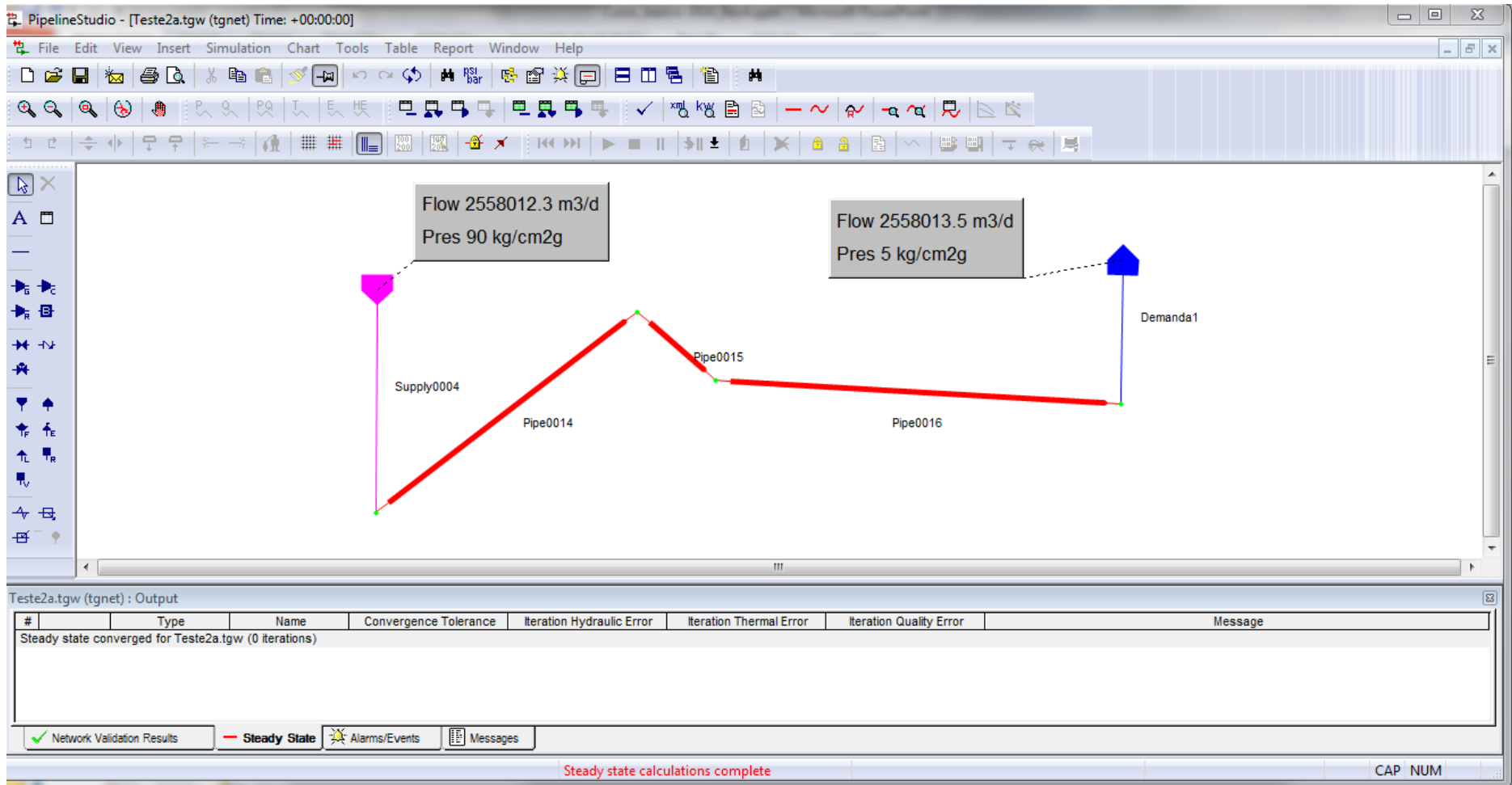
- Válvulas podem ser conectadas entre dois extremos de dutos ou entre dutos e equipamentos através dos nós. Normalmente os simuladores permitem modelar válvulas de bloqueio, válvulas unidirecionais (para evitar fluxo reverso) e válvulas de controle (de vazão ou de pressão).

Compressores

- São equipamentos instalados próximos a pontos de fornecimento ou entre dois segmentos de duto para elevação da pressão.
- Normalmente os simuladores permitem que se trabalhe com duas situações
 - equipamentos com algumas características pré-definidas pelo programa: útil nas fases iniciais do projeto
 - equipamentos com características totalmente fornecidas pelo usuário: já foi definido através das características requeridas pelo projeto e da conseqüente seleção das opções no mercado

MODELAGEM PLS

Modelagem no PLS

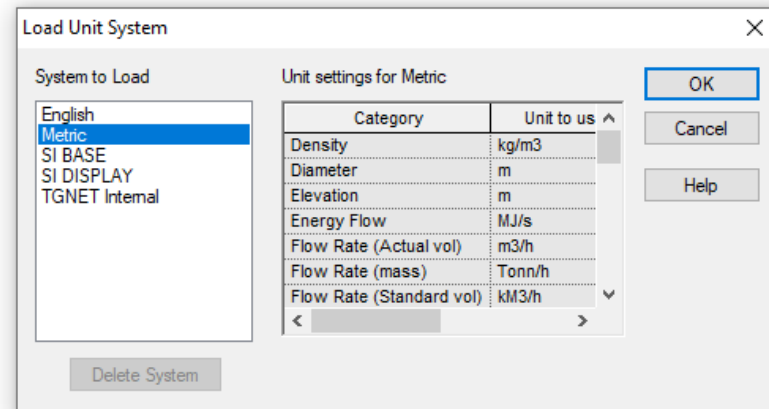
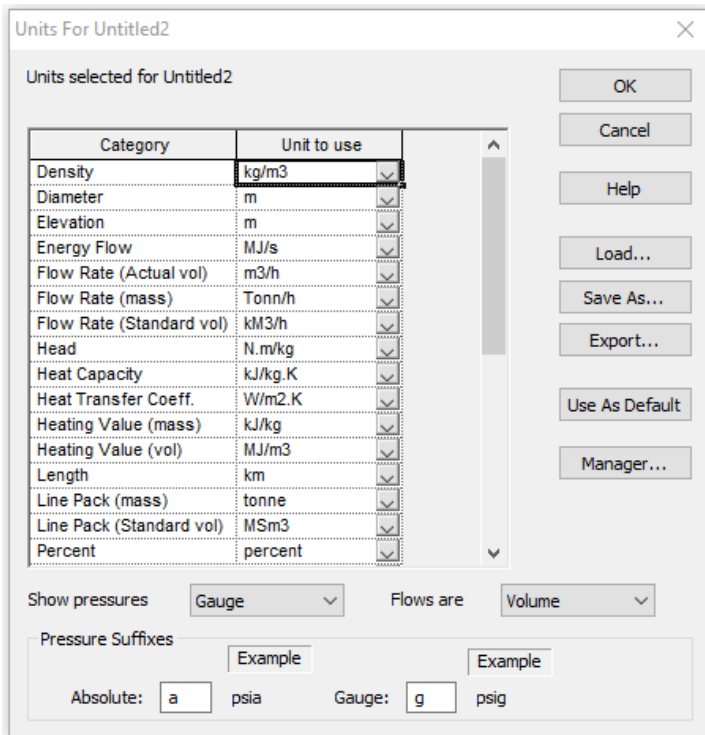


MODELAGEM

Exercício 3 : Modelagem no PLS

Sistema de Unidades:

– Definir Sistema Métrico:



MODELAGEM

Exercício 3 : Modelagem no PLS

- Condição Padrão de Temperatura e Pressão:

- Pstd: 101325 Pa

- Tstd: 2913.15 K

The image shows a screenshot of the 'Simulation Options - Untitled2' dialog box. The 'General' tab is selected. The 'Title for simulation' field contains 'Exercicio 2'. Under 'Reference for Standard Conditions', the 'Pressure' is set to 101325 Pa and the 'Temperature' is set to 2913.15 K. The 'Tracking' section has three unchecked checkboxes: 'Quality', 'Temperature', and 'Wall Temperature'. The 'Date/Time' section has an unchecked checkbox for 'Specify Start Date/Time' and a dropdown menu set to 'RELATIVE'. The dialog box has buttons for 'OK', 'Cancelar', 'Aplicar', and 'Ajuda' at the bottom.

Equipment Reports	Station Reports	Alarm	Volume			
General	Controls	Fluid	Leak	Report	Pipe Reports	External Regulator Reports

Title for simulation:

Reference for Standard Conditions

Pressure	<input type="text" value="101325"/>	Pa
Temperature	<input type="text" value="2913.15"/>	K

Tracking

- Quality
- Temperature
- Wall Temperature

Date/Time

Specify Start Date/Time

OK Cancelar Aplicar Ajuda

Exercício 3 : Modelagem no PLS

Equação de Estado:

- CNGA

Temperatura do Sistema

- 293.15 K (18 °C)

Viscosidade

- LGE (Lee-Gonzalez-Eakin)

Simulation Options - Exercício_3

General Controls Fluid Leak Report Pipe Reports External Regulator Reports Equipment Reports Station Reports SubNetwork Reports

Equation of State: CNGA

Default Fluid: Fluid Type: *GN_Molar

System-wide temperature: 18 Deg C

Heating value: Type: Low/Net High/Gross; Calculation Method: Mole Average ISO6976

Cv Calculation: GPSA Correlation Thermodynamic Relationship

Viscosity: Constant 1.10125e-0 Ns/m2

Friction Factor Reynolds Number Transitional Zone: Lower Limit: 2100; Upper Limit: 3900

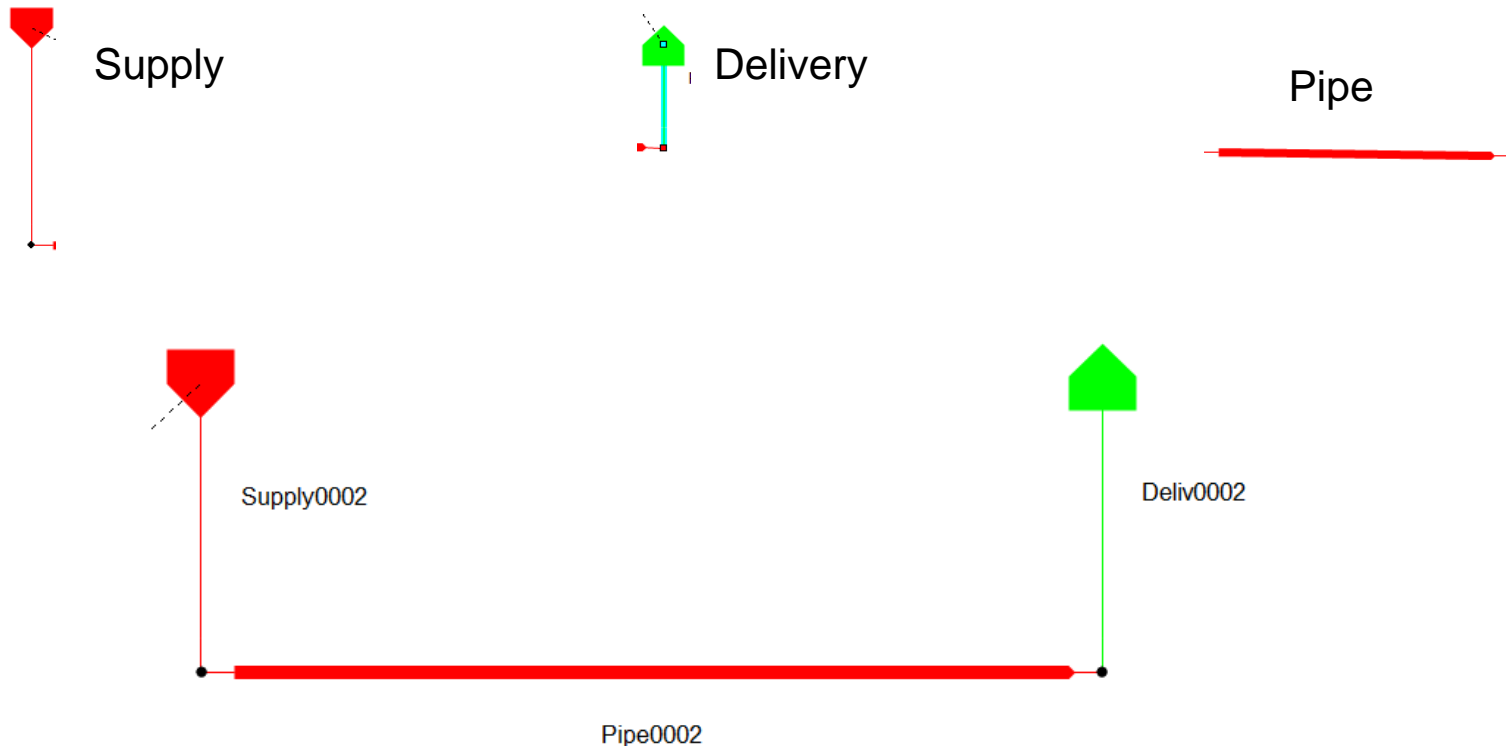
PVT: Full Fast

Computations: Pressure tolerance for: Heat capacity: 0.70307 kg/cm2; Z-factor: 0.70307 kg/cm2; Temperature tolerance for: Heat capacity: 2.77778 Deg C; Z-factor: 2.77778 Deg C; Compositional tolerance: 10 percent

OK Cancelar Aplicar Ajuda

Exercício 3 : Modelagem no PLS

- Incluir elementos no modelo
- Conectar elementos
- Definir geometria do duto e condições de contorno nos pontos de recebimento (supply) e entrega (delivery)



Exercício 3: Modelagem no PLS

• Cadastro de Fluido Não Composicional (Sarem, CNGA)

❑ Definição das propriedades do fluido :

❑ Densidade

❑ Poder calorífico

❑ Percentual de CO²

Details for Supply ENTRADA

Flow Alarm Limits	Energy Flow Alarm Limits	Volume Accumulator
General	Connection	Trends
		Pressure Alarm Limits

Name: ENTRADA

Fluid: GasNatural

Fluid Temperature: 20 Deg C

Maximum Flow: MSM3/D

Maximum Energy Flow: J/s

Maximum Pressure: 100 kg/cm2g

Minimum Pressure: kg/cm2g

Check Valve: No

Mode: Max Pressure Lock

Details for Simplified Fluid GasNatural

Base Qualities

Name: GasNatural

Specific Gravity: 0.6534

Heating Value: 35000 J/m3

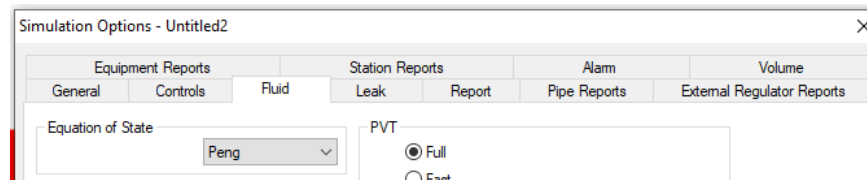
Carbon Dioxide: 0.1 percent

Hydrogen Sulfide (H2S): percent

Exercício 2: Modelagem no PLS

• Cadastro de Composição do Gás

- ❑ Equação de Estado Composicional: Peng, SRK, BWRS



- ❑ Definição da composição no Ponto de Recebimento (Supply)

Details for Supply ENTRADA

Pressure Alarm Limits Flow Alarm Limits Volume Accumulator
General Connection Trends

Name: ENTRADA Rename...

Fluid: *GN1 Details... New...

Fluid Temperature: 45 Deg C

Maximum Flow: kM3/h

Maximum Pressure: 85 kg/cm2g

Minimum Pressure: kg/cm2g

Check Valve: No

Mode: Max Pressure Lock

OK Cancelar Aplicar Ajuda

Details for Compositional Fluid GN1

Mole Percent

Name: GN1 Rename...

Available Components

- Isobutane (IC4)
- N-butane (NC4)
- Isopentane (IC5)
- N-pentane (NC5)
- Hexane (C6)
- Heptane+ (C7+)
- Carbon Dioxide (CO2)
- Nitrogen (N2)
- Hydrogen Sulfide (H2S)
- Hydrogen (H2)

Add >> << Remove

Component	Percent
Methane (C1)	85
Ethane (C2)	10
Propane (C3)	5

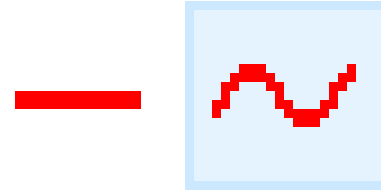
Modify... Normalize

Total: 100

OK Cancelar Aplicar Ajuda

Exercício 2: Modelagem no PLS

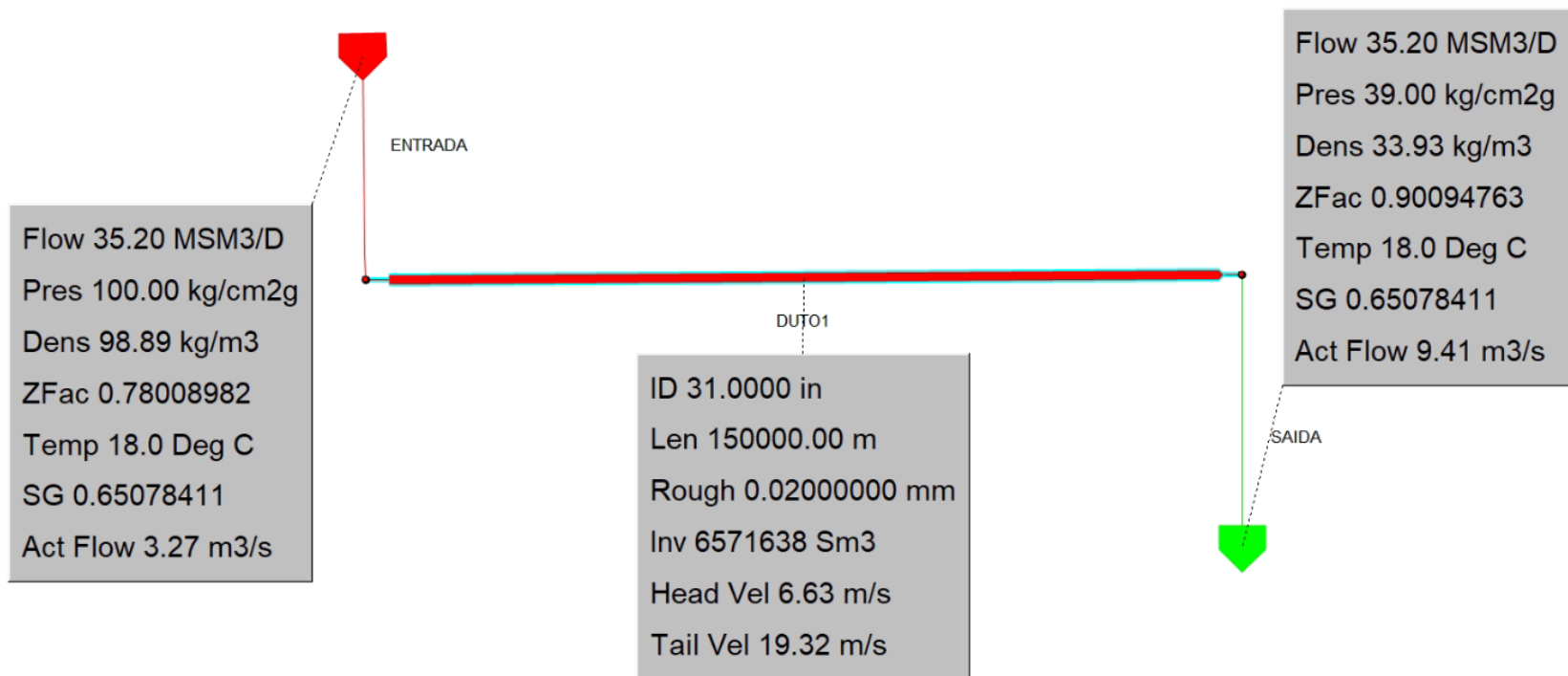
Regime permanente ou transiente?



EXERCÍCIO #2

EXERCICIO 2 – RESULTADOS NO PLS (COLEBROOK)

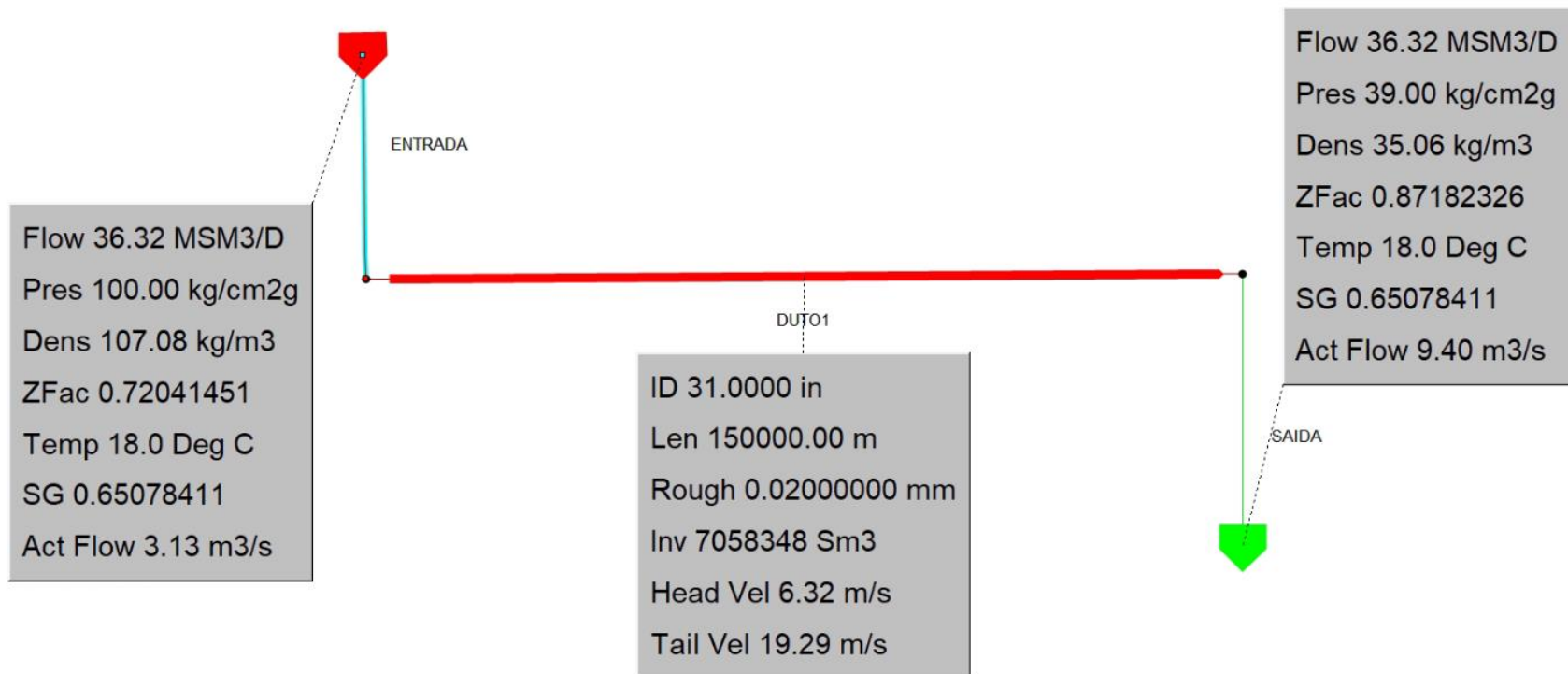
- Equação: Colebrook
- Equação de estado: CNGA
- Isotérmico



EXERCÍCIO #2

EXERCICIO 2 – RESULTADOS NO PLS

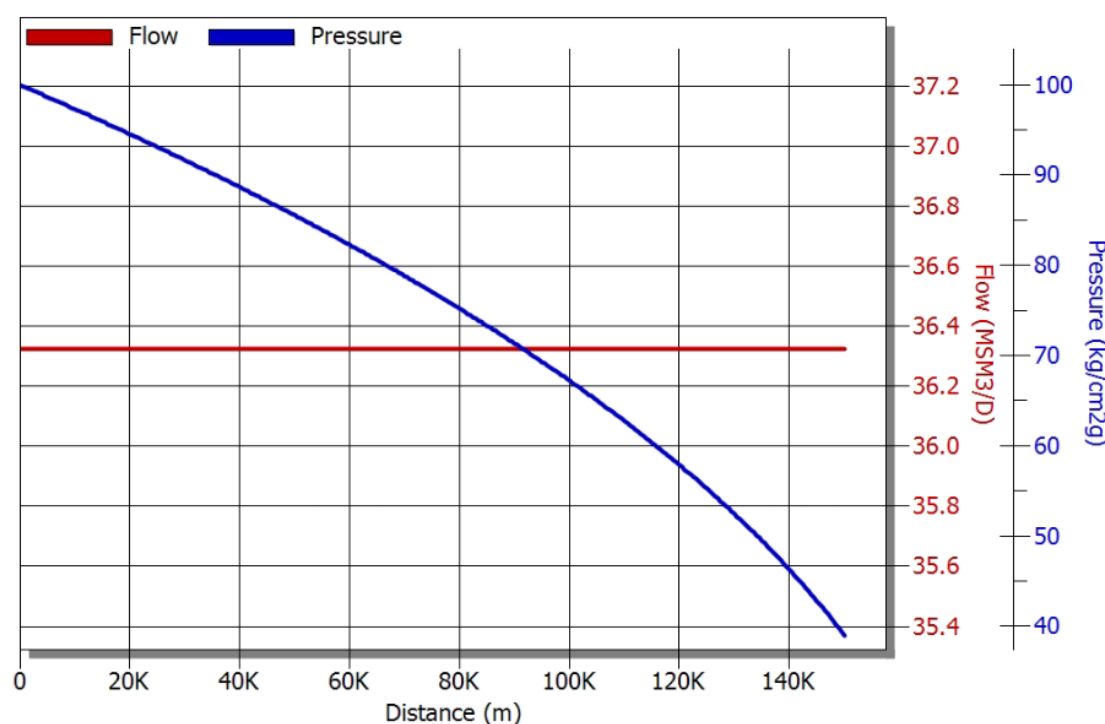
- **Equação: Colebrook**
- **Equação de estado: Peng-Robinson**
- **Isotérmico**



ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

- Observa-se que o perfil de pressão deixa de ser uma reta, como no caso de líquidos, e passa a ter um comportamento próximo ao parabólico
- Uma das causas é que a velocidade local varia ao longo do duto, e como para gases tem-se:

$$Q^2 \sim P_1^2 - P_2^2$$



ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

- Diferente da maioria dos líquidos, os efeitos da compressibilidade dos gases em escoamentos em dutos devem ser levados em conta na fase de projeto.
- Estes efeitos, provocados pela variação da temperatura e da pressão, podem ser observados, principalmente, na variação da velocidade ao longo do duto.
- A compressibilidade também permite procedimentos de operação que não são possíveis em dutos com líquidos

ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

Efeitos da expansão do gás na temperatura e velocidade

Variável	Unidade	Valor
Diâmetro Externo	m	0,812
Espessura da parede	mm	12,7
Vazão	MMm ³ /d	30
Comprimento	km	150
Rugosidade	mm	0,02
Densidade relativa do gás		0,651
Temp. referência	C	20
Pressão de referência (abs)	kgf/cm ²	1,01
Temp. de entrada	C	20
Pressão de entrada (manométrica)	kgf/cm ²	85
Pressão de saída (man.) esperada	kgf/cm ²	?
Coeficiente global de transf. de calor	W/m ² C	0,0

ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

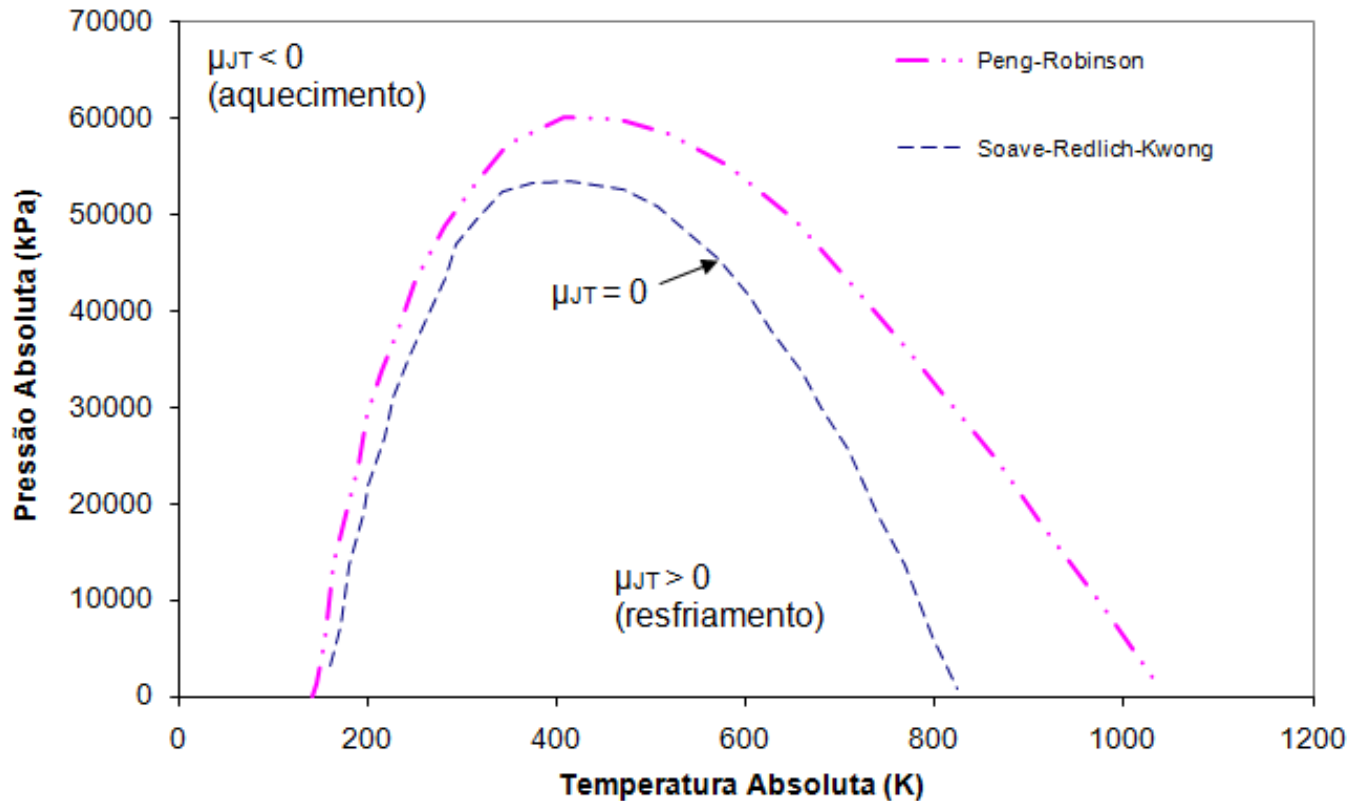
Efeitos da expansão do gás na temperatura e velocidade

- Ao utilizar um coeficiente global de transferência de calor igual a zero anula-se a troca de calor com o ambiente
- Porém, existe uma variação de temperatura ao longo do duto devido à expansão do gás (Efeito
- Quando a situação observada atinge o estado estacionário, a vazão mássica que entra no duto tem que ser igual a vazão mássica saindo
- A vazão volumétrica é calculada de seguinte forma

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

EFEITO JOULE-THOMPSON

Curvas de Inversão – 100 % C1



$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

Efeitos da expansão do gás na temperatura e velocidade

- Como ρ é função da pressão e temperatura, para se calcular a vazão volumétrica é necessário determinar de que forma a massa específica será calculada
- Assim, quando a massa específica é calculada segundo condições padrão de temperatura e pressão constantes, tem-se a vazão volumétrica corrigida ou padrão (standard flow) e que apresenta um comportamento idêntico ao da vazão mássica.
- A vazão volumétrica (actual flow), quando calculada baseada na massa específica obtida segundo as condições locais de um determinado ponto do duto, varia, pois a pressão e a temperatura em cada ponto está variando
- A velocidade do escoamento é um parâmetro local, e conseqüentemente calculada a partir da vazão volumétrica local.

ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

Efeitos da expansão do gás na temperatura e velocidade

Simulation Options - Exercício3.tgw

Equipment Reports Station Reports Alarm Volume

General Controls Fluid Leak Report Pipe Reports External Regulator Reports

Title for simulation: Exercício 3

Reference for Standard Conditions

Pressure: -2.49225e-1 kg/cm2g

Temperature: 20 Deg C

Tracking

Quality

Temperature

Wall Temperature

Date/Time

Specify Start Date/Time

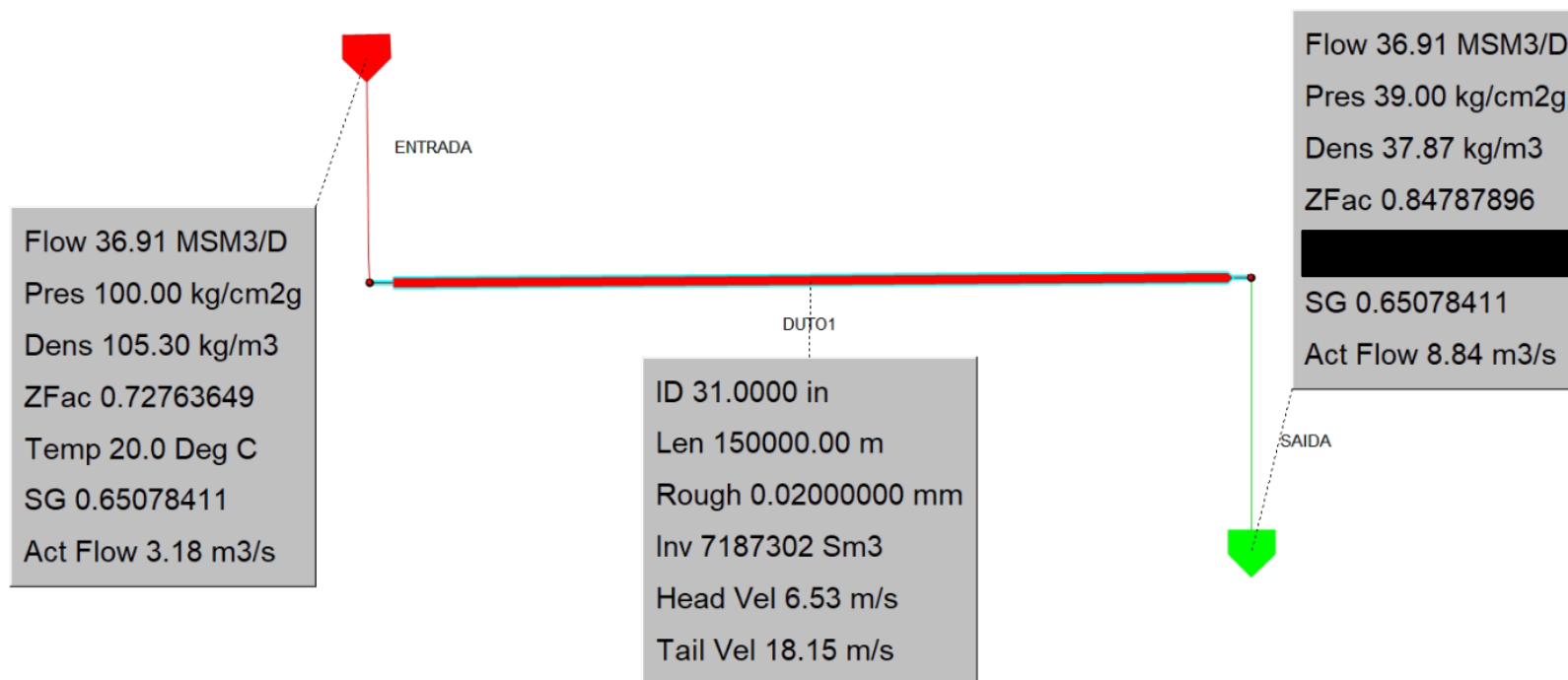
RELATIVE

OK Cancelar Aplicar Ajuda

ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

Efeitos da expansão do gás na temperatura e velocidade

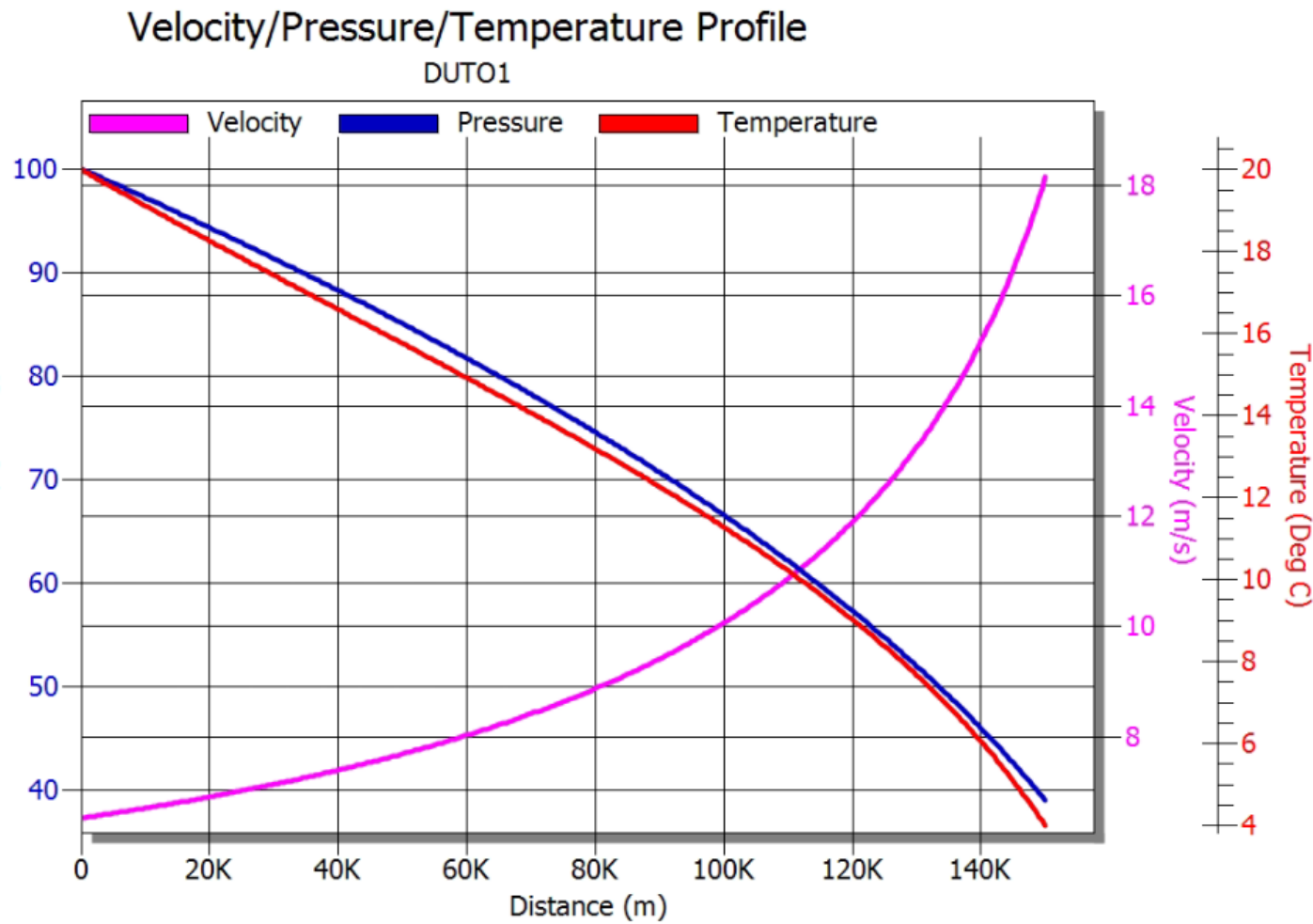
- **Modo Térmico**
- **Temperatura de envio: 20 oC**



Qual a temperatura de recebimento??

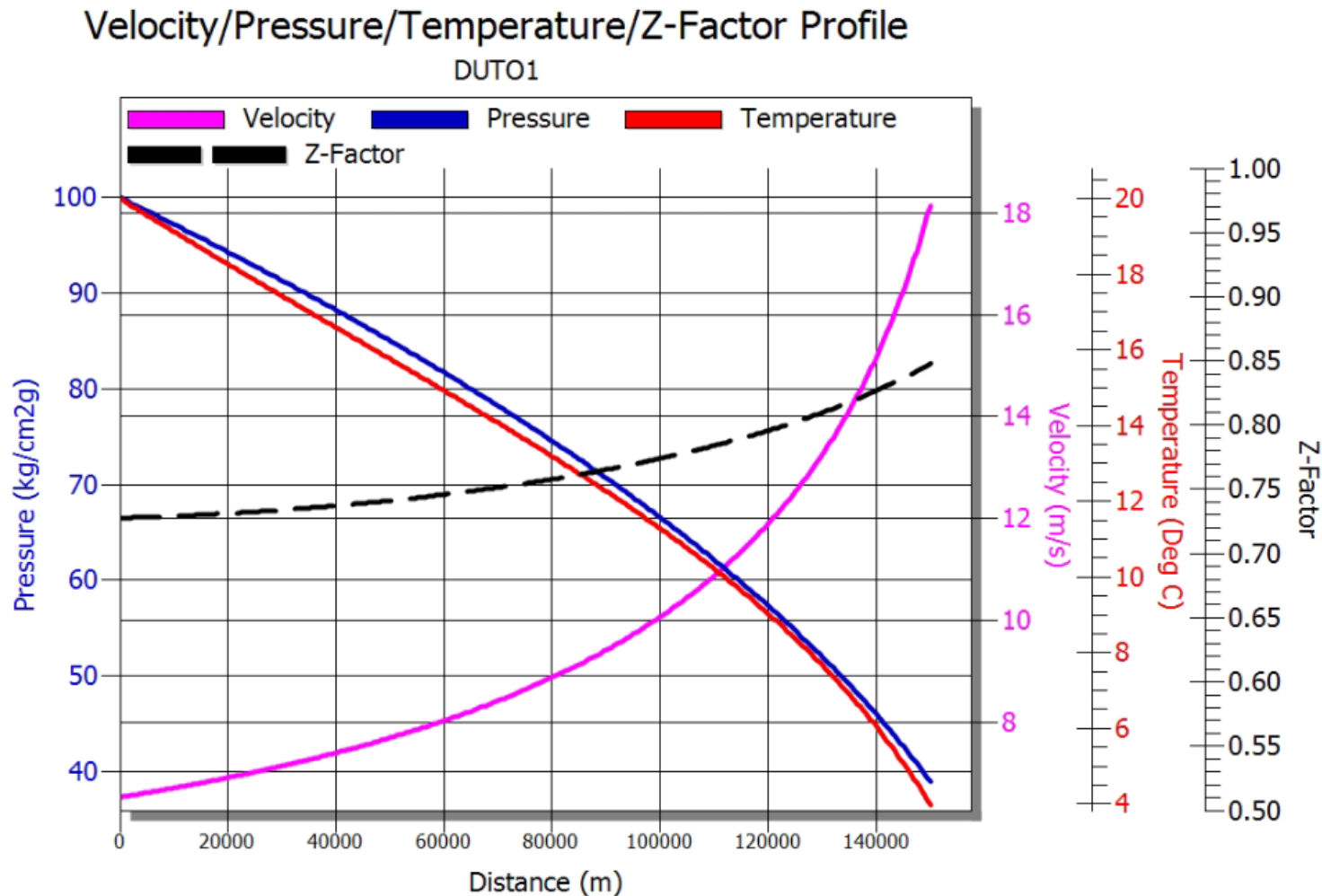
ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

Efeitos da expansão do gás na temperatura e velocidade



ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

Efeitos da expansão do gás na temperatura, fator Z e massa espec.



Aumento de Vazão e Loops

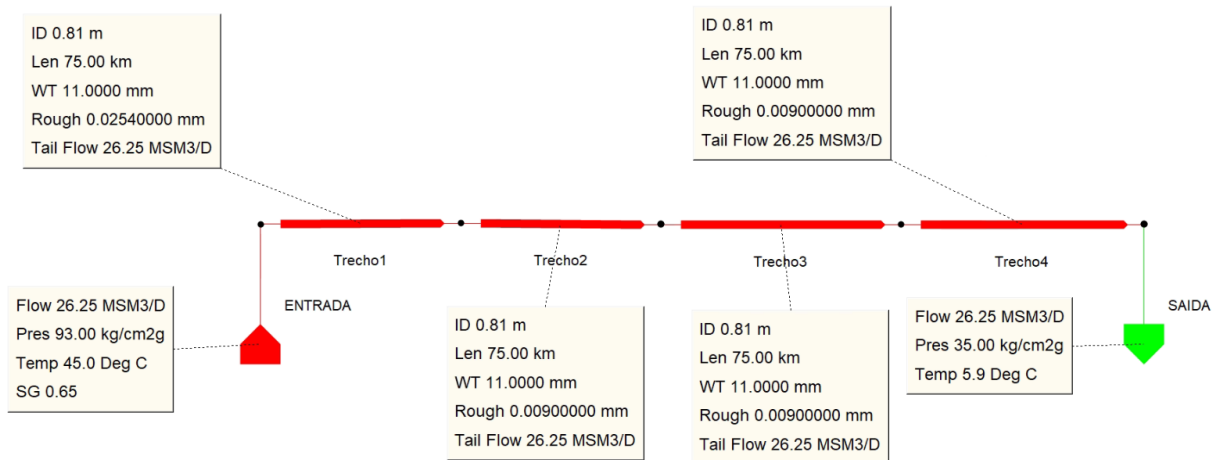
- Loops, ou segmentos de dutos ligados em paralelo ao duto original, são utilizados para aumentar o volume transportado ou diminuir a queda de pressão na tubulação
- Normalmente não é necessário duplicar todo o comprimento do duto, bastando fazê-lo num trecho do duto
- O projeto de um loop envolve a definição do diâmetro, do comprimento e da posição do loop
- Em escoamentos de líquidos esta última variável não interfere no resultado. Porém, para escoamento de gases os efeitos de variação de pressão e temperatura podem determinar uma posição ótima para o loop.

- Devido à velocidade aumentar ao longo do duto, o gradiente de perda de carga vai aumentando em direção ao fim do duto
- Assim, a colocação de um loop nas regiões de maior velocidade tende a reduzir a perda de carga total
- Porém, em dutos reais existe uma elevação considerável da temperatura após as estações de compressão. Este aumento da temperatura provoca uma expansão do gás e um conseqüente aumento da velocidade e da perda de carga
- Assim, posicionando um loop após uma estação de compressão, além de diminuir a perda de carga pelo aumento da seção de escoamento, provoca uma maior dissipação de calor para o meio ambiente nas regiões de escoamento com temperatura mais elevada (devido ao aumento da superfície troca) e reduzindo mais rapidamente este efeito
- A escolha final da posição vai depender, desta forma, de cada caso particular.

Esta questão pode ser avaliada pelo escoamento de gás natural nas condições apresentadas na tabela abaixo:

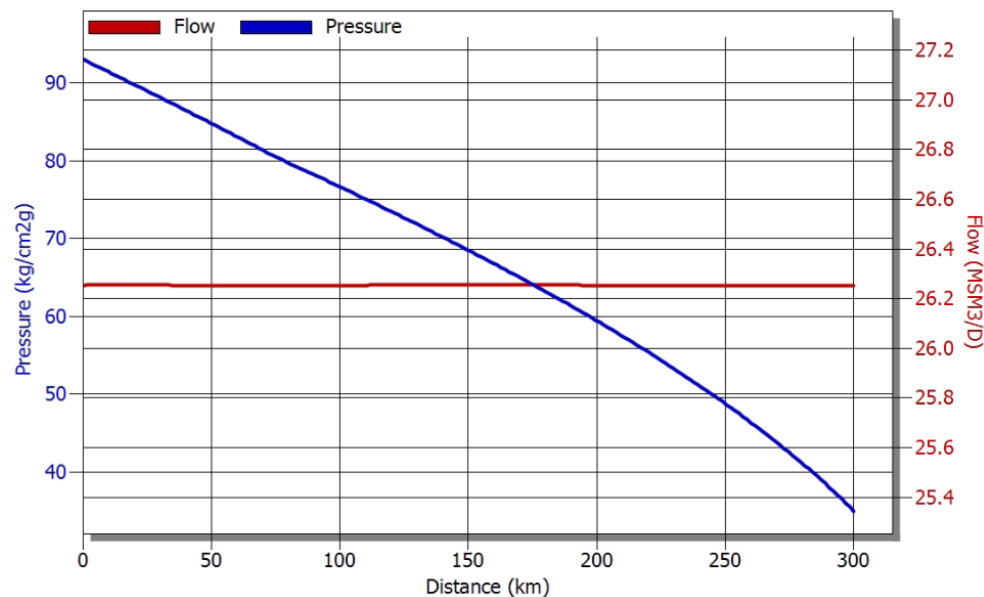
Variável	Unidade	Valor
Diâmetro Interno	m	0,812
Espessura da parede	mm	11
Vazão	MMm ³ /d	?
Comprimento	km	300
Rugosidade	mm	0,009
Densidade relativa do gás		0,70
Temp. referência	C	20
Pressão de referência (abs)	kgf/cm ²	1,01
Temp. de entrada	C	45
Pressão de entrada (manométrica)	kgf/cm ²	93
Pressão de saída (man.) mínima	kgf/cm ²	35
Coefficiente global de transf. de calor	W/m ² C	2
Temperatura do ambiente	C	15
Condição do duto	-	Enterrado

Caso 4 – Sem Loop



Flow/Pressure Profile

Trecho1 to Trecho4

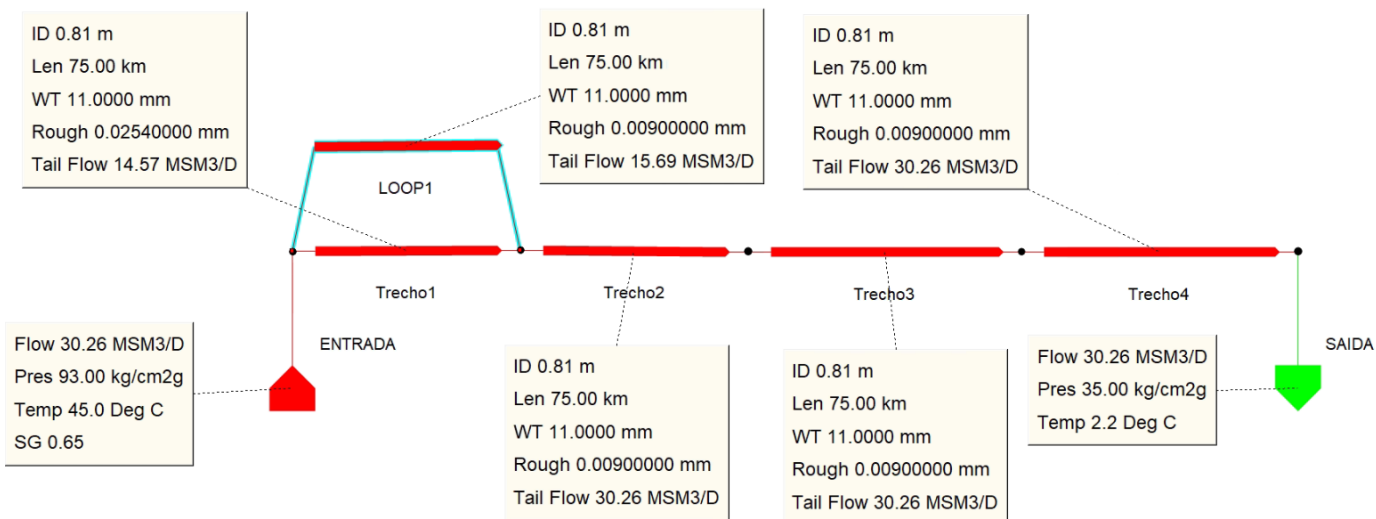


- Caso as condições de operação requeiram um aumento da vazão para 30MMm3/d, com o mesmo diferencial de pressão, uma solução seria a instalação de um loop
- Por questões de simplicidade, será considerado que o loop terá o mesmo diâmetro da tubulação original
- Assim, a incógnita do problema passa a ser o comprimento do loop, que pode ser calculado, aproximadamente, pela expressão:

- $$\left(\frac{Q_f}{Q_o}\right)^{1/c} = \frac{1 + L_2/L_1}{1 + 0,5^{1/c} \frac{L_2}{L_1}}$$

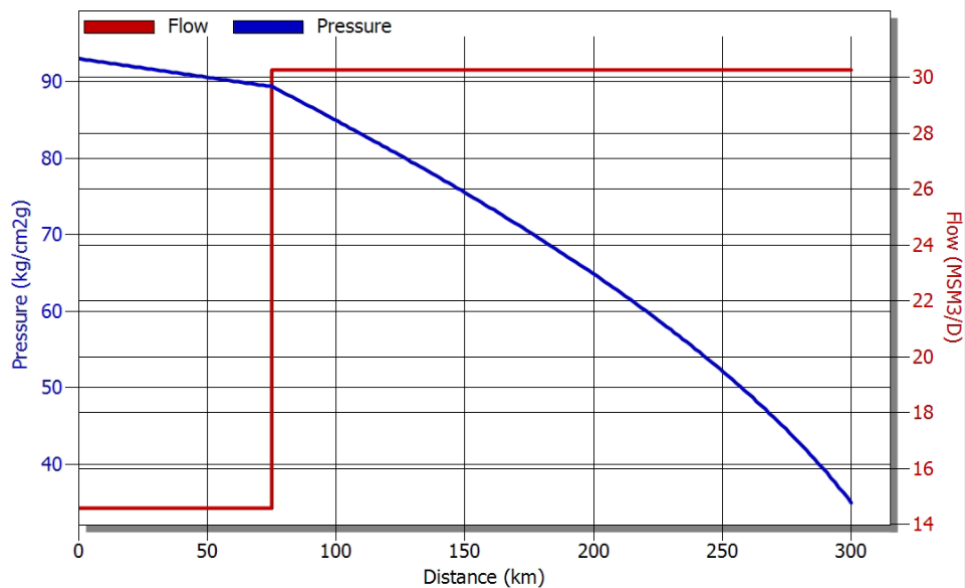
onde Q_f é a nova vazão desejada, Q_o é a vazão inicial, L_1 é o comprimento sem loop e L_2 é o comprimento do loop. O valor de c é igual a 0,5.

- Para uma nova vazão de $30 \text{ MMm}^3/\text{d}$ o loop necessita ter um comprimento de 75 km
- O problema que se configura agora é determinar qual a melhor posição para o loop, mantendo o mesmo diferencial de pressão?
- A simulação, com a colocação do loop no início do duto, demonstra que é possível transportar uma vazão de $30,03 \text{ m}^3/\text{h}$
- Enquanto que a vazão é de $29,21 \text{ m}^3/\text{h}$ quando o loop é colocado no último trecho do duto.
- Assim, verifica-se que o loop instalado no trecho inicial do duto traria mais vantagens para a operação
- O efeito do loop é claramente observado, onde no trecho inicial, com o loop aí posicionado, tem-se um gradiente de pressão **menor** que no resto do duto
- Observa-se a redução na velocidade na região do loop devido à divisão da vazão pelos dois ramos e uma queda de temperatura ligeiramente mais acentuada.



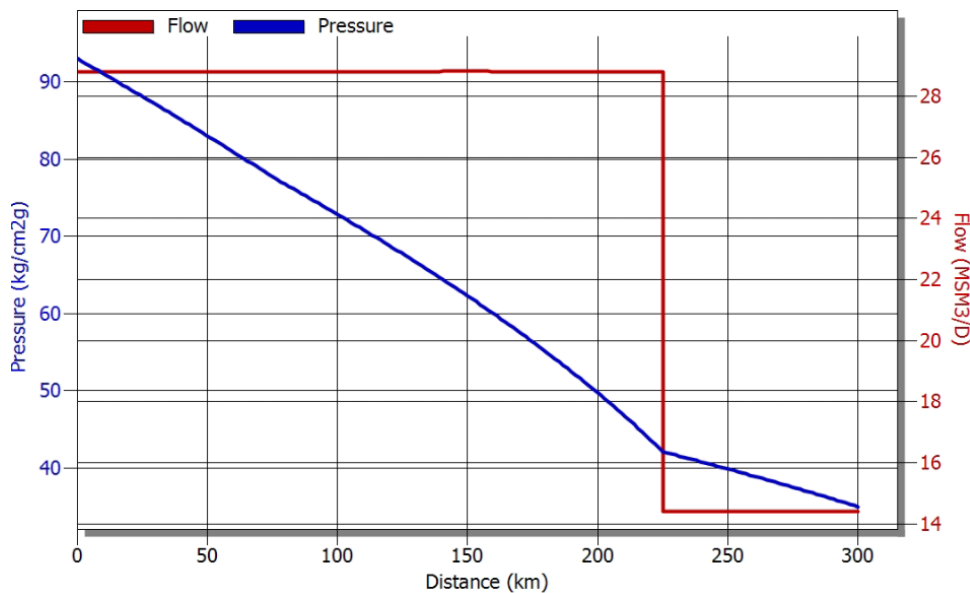
Flow/Pressure Profile

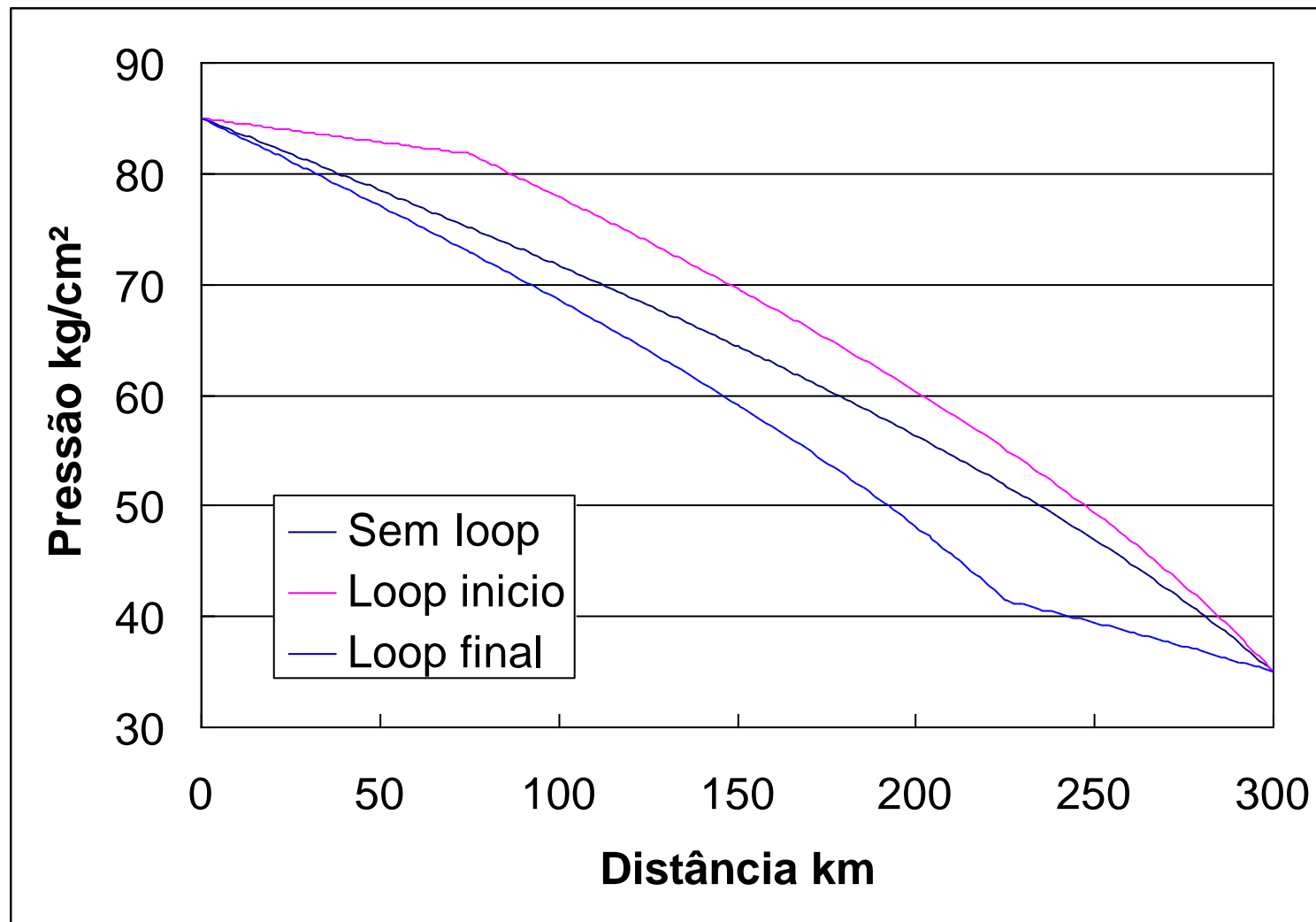
Trecho1 to Trecho4





Flow/Pressure Profile
Trecho1 to Trecho4





SIMULAÇÃO DE GASODUTOS

Projeto Gasbol Simplificado

- O projeto de simulação do Gasoduto Bolívia-Brasil ilustrado neste item apresenta várias simplificações para facilitar a didática do caso
- São apresentados somente dois segmentos iniciais de duto a partir de Rio Grande, na Bolívia, com uma estação de compressão intermediária
- Um dos pontos mais delicados da modelagem diz respeito às estações de compressão. Uma estação, com quatro compressores iguais trabalhando em paralelo, foi modelada através de um único compressor teórico. Este processo é útil nas fases iniciais do projeto e da modelagem
- Da mesma forma, todas as retiradas a jusante foram reunidas numa única com o volume totalizado. Assim, a modelagem pode seguir acrescentando mais elementos, de forma a facilitar a depuração de erros.

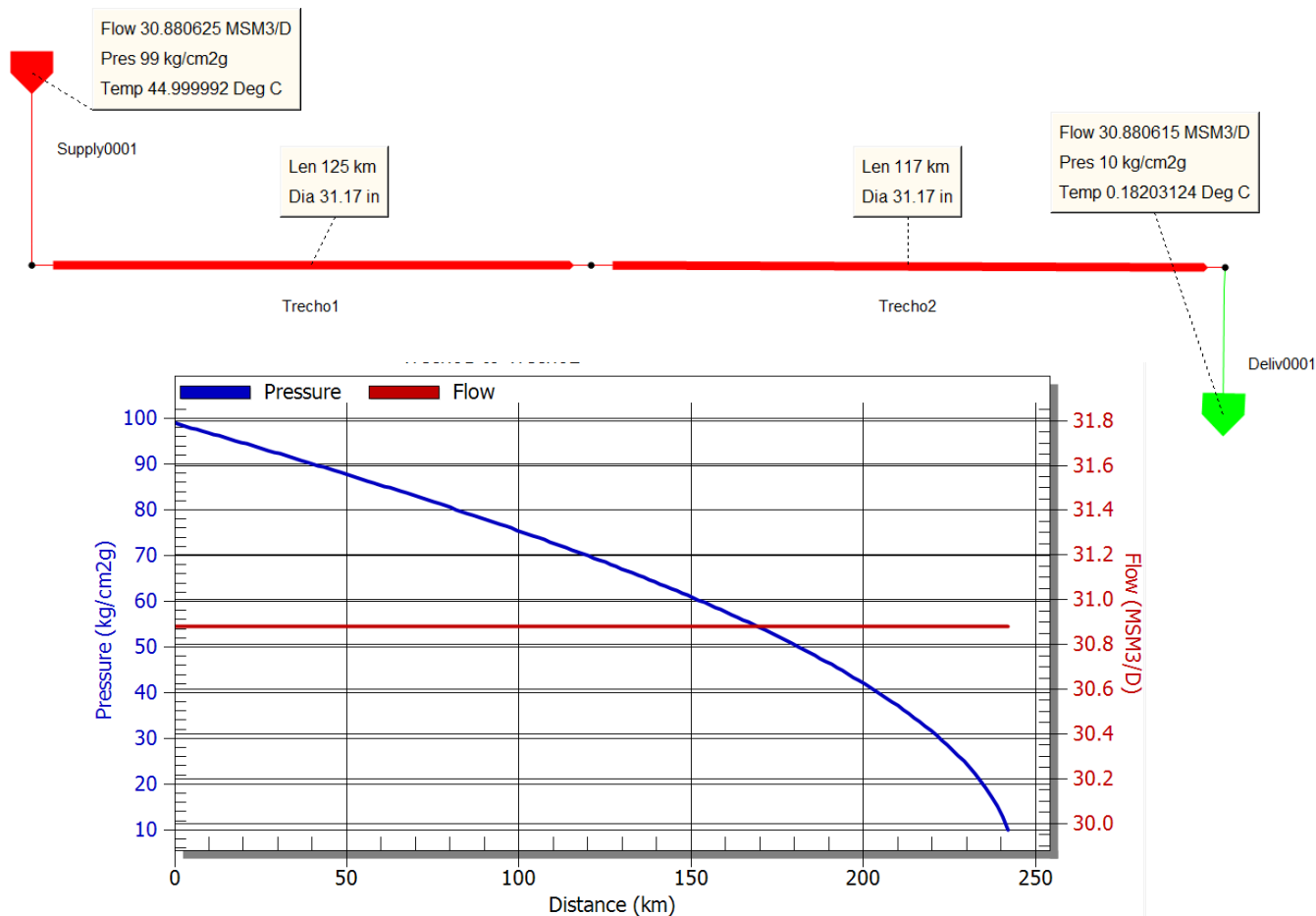
SIMULAÇÃO DE GASODUTOS

Variável	Unidade	Valor
Diâmetro nominal	in	32
Espessura parede	mm	11
Vazão	MMm ³ /d	32
Comprimento 1o trecho	km	125
Comprimento 2o trecho	km	117
Rugosidade	mm	0,009
Densidade gás		0,70
Tem. Referência	C	20
Pressão de referência	atm	1
Tem. de entrada	C	45
Pressão de entrada	kgf/cm ² (g)	99
Pressão de sucção (mínima)	kgf/cm ² (g)	65
Coef. Transf. calor	W/m ² C	2
Temp. ambiente	C	15

SIMULAÇÃO DE GASODUTOS

❑ Caso 5 – Sem Compressor

- ❑ O resultado do cálculo sem uma estação de compressão intermediária demonstra que mesmo com pressões de chegada muito baixas (10 kgf/cm^2) não é possível atingir a vazão desejada

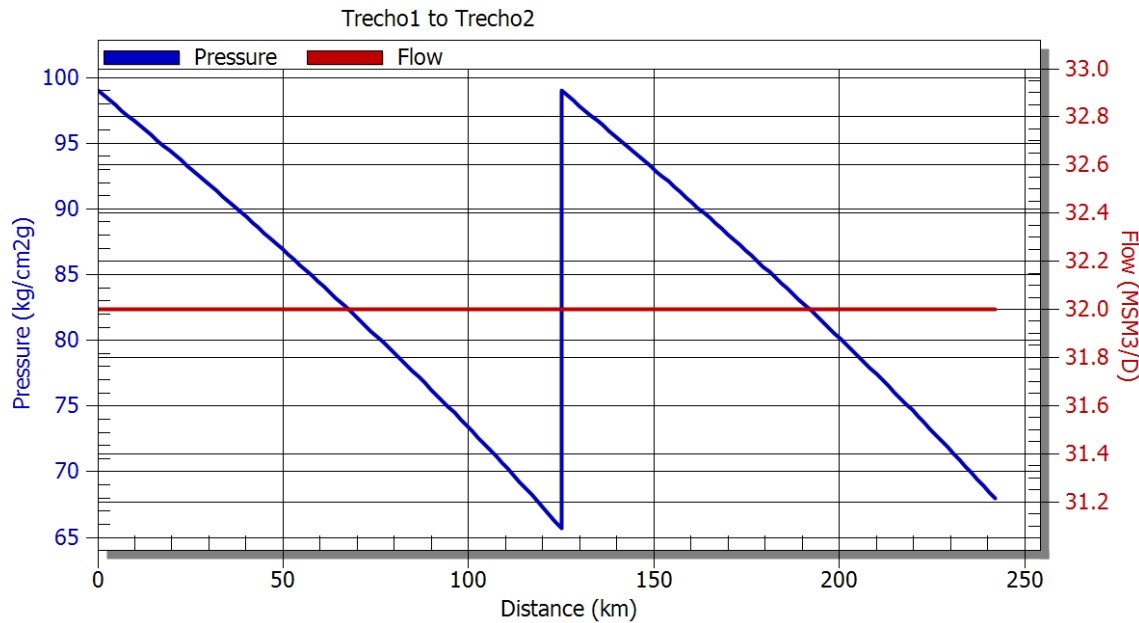
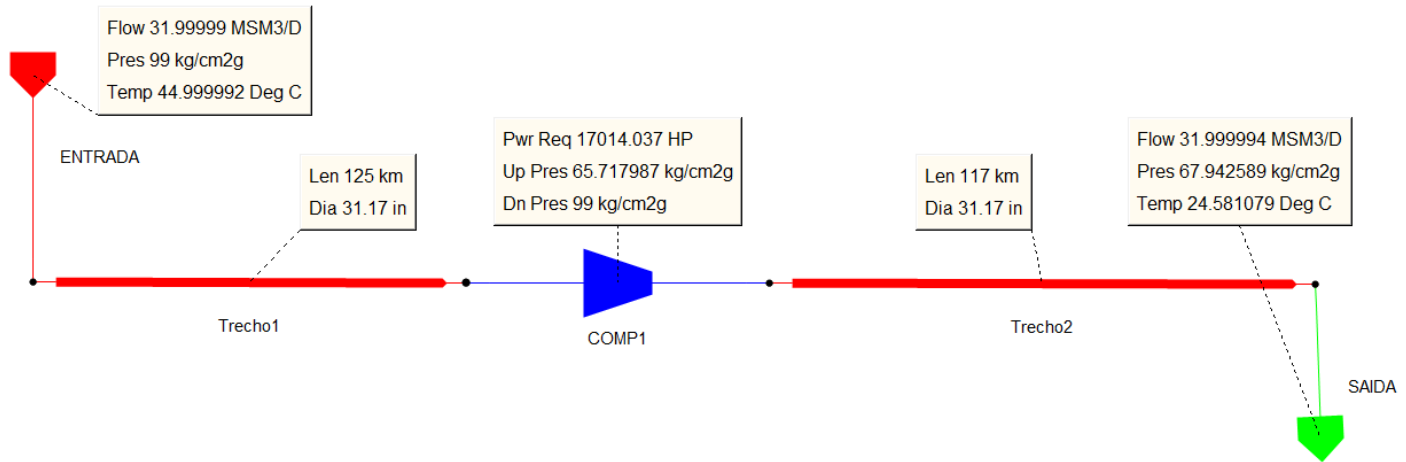


SIMULAÇÃO DE GASODUTOS

- Estudos de viabilidade econômica demonstram que a taxa de compressão (razão entre a pressão de descarga e a de sucção) deve estar entre 1,3 e 1,5
- Um valor **menor** do que este implica num número excessivo de estações de compressão. Por outro lado, uma taxa de compressão **maior** implica num consumo excessivo de combustível.
- Como a máxima pressão de descarga é de 99kg/cm^2 , utilizando uma taxa de compressão de 1,5 tem-se uma pressão de sucção da ordem de 66kg/cm^2 . Como o ponto de entrega na verdade é a sucção de uma nova estação de compressão, este deve ser o valor da pressão mínima neste ponto.
- Desta forma, a solução é colocar uma estação de compressão intermediária. O local da estação deve ser tal que obedeça a taxa de compressão adotada. Outros critérios como acesso, facilidades, segurança, etc também devem ser consideradas

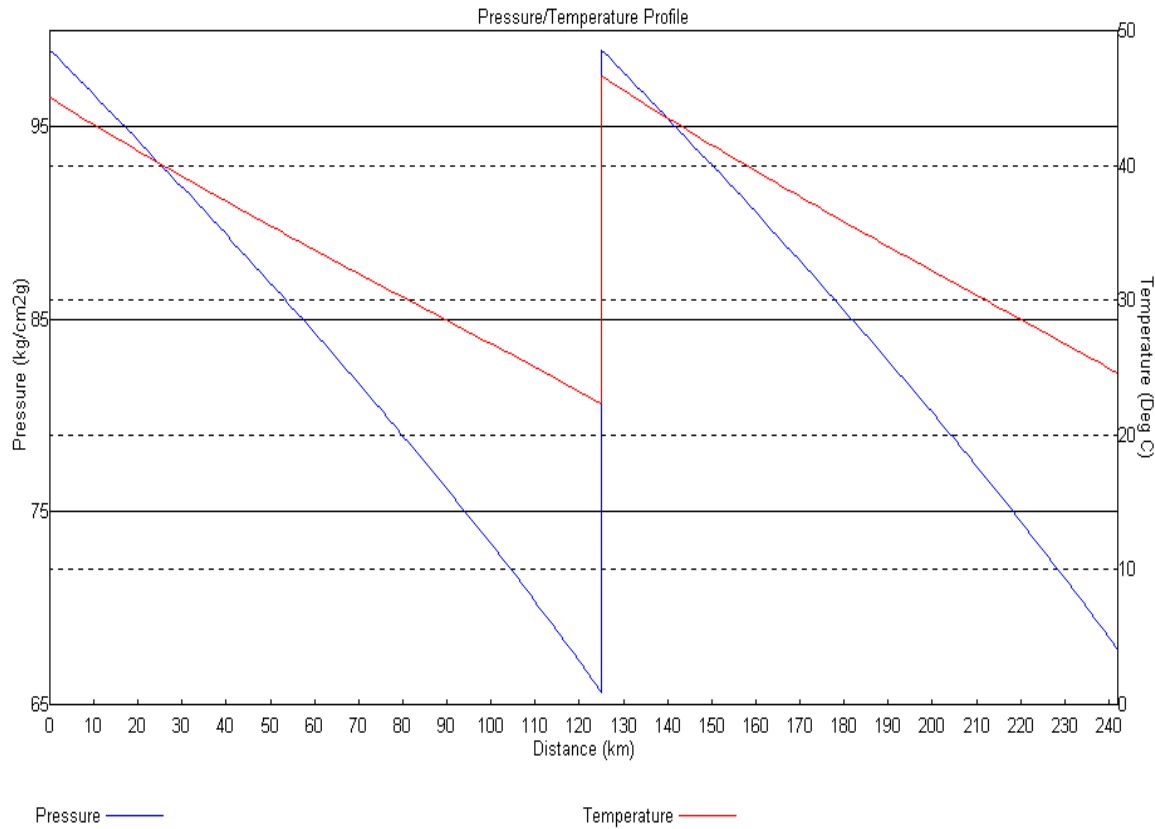
SIMULAÇÃO DE GASODUTOS

☐ Caso 5 – Com Compressor



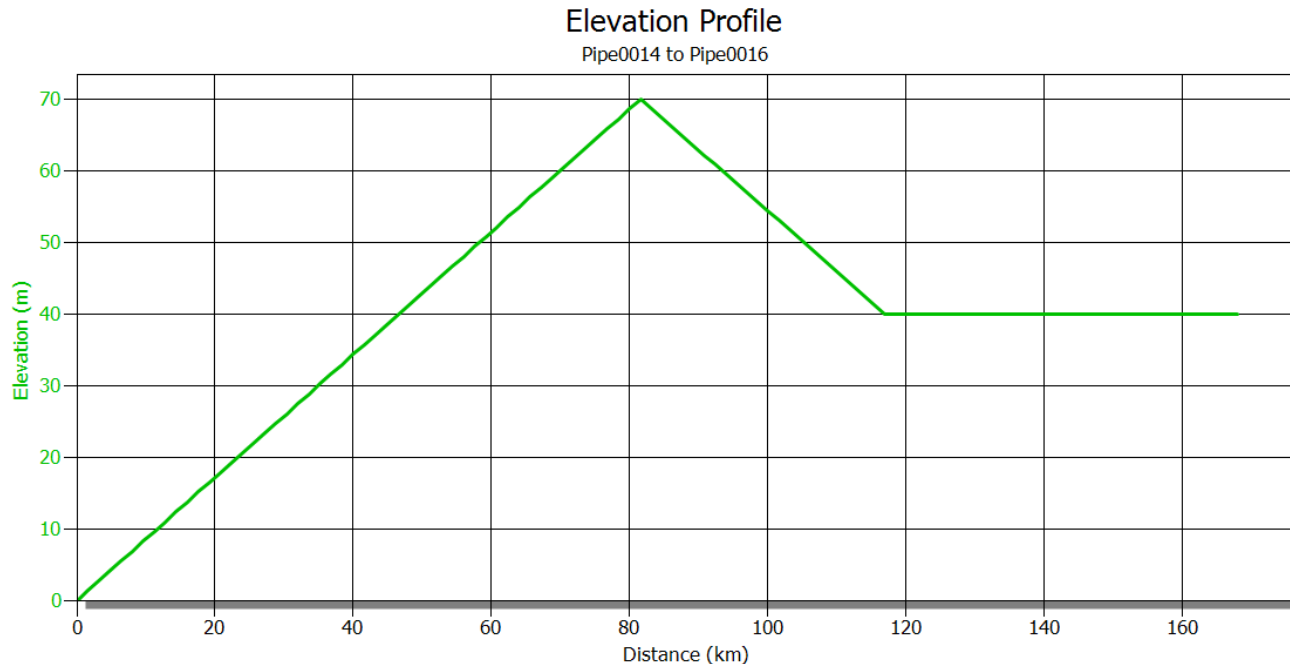
SIMULAÇÃO DE GASODUTOS

- Observa-se que a vazão é atendida e que a pressão de sucção da estação é de $65,7 \text{ kg/cm}^2$, dentro da faixa econômica. É possível também estimar a potência requerida pela estação de compressão, da ordem de 17000HP



PROJETO DE GASODUTO

- Duto com um ponto de recebimento e uma de entrega
- Considera-se um ponto de recebimento com temperatura de 45C.
- O ponto de consumo encontra-se a 168 km e requer 2,6MMm³/d numa pressão mínima de 50kg/cm².
- O perfil simplificado da faixa na figura abaixo:

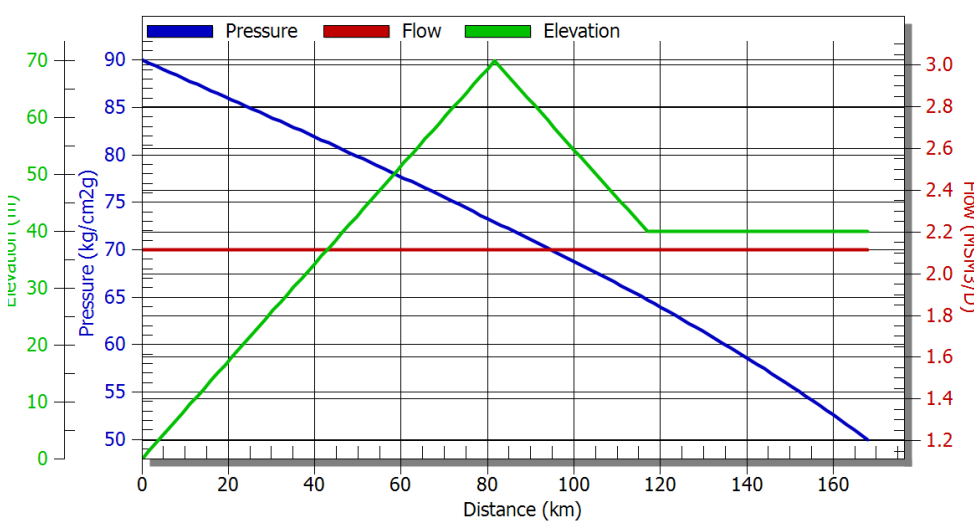
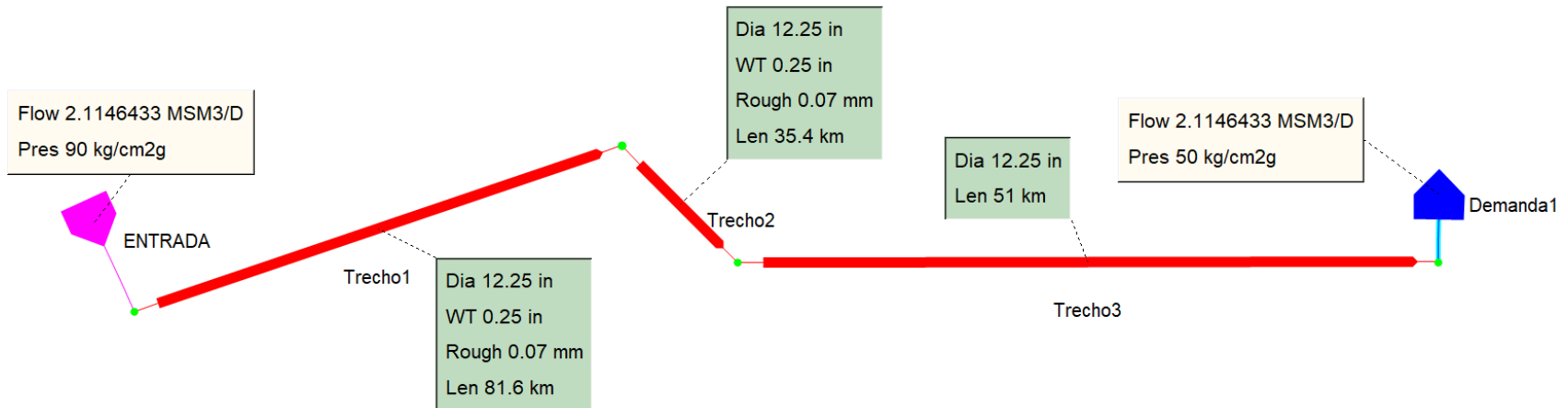


PROJETO DE GASODUTO

- Outras condicionantes:
- Pressão de projeto: 90kgf/cm²
- Escoamento não isotérmico: ambiente 28 °C
- Características do gás: densidade de 0,65
- Considere opções disponíveis de diâmetro: 12" e 14"
- Possibilidade de terreno para ECOMP no km 81
- Definir as soluções técnicas
- Definir a solução final

PROJETO DE GASODUTO

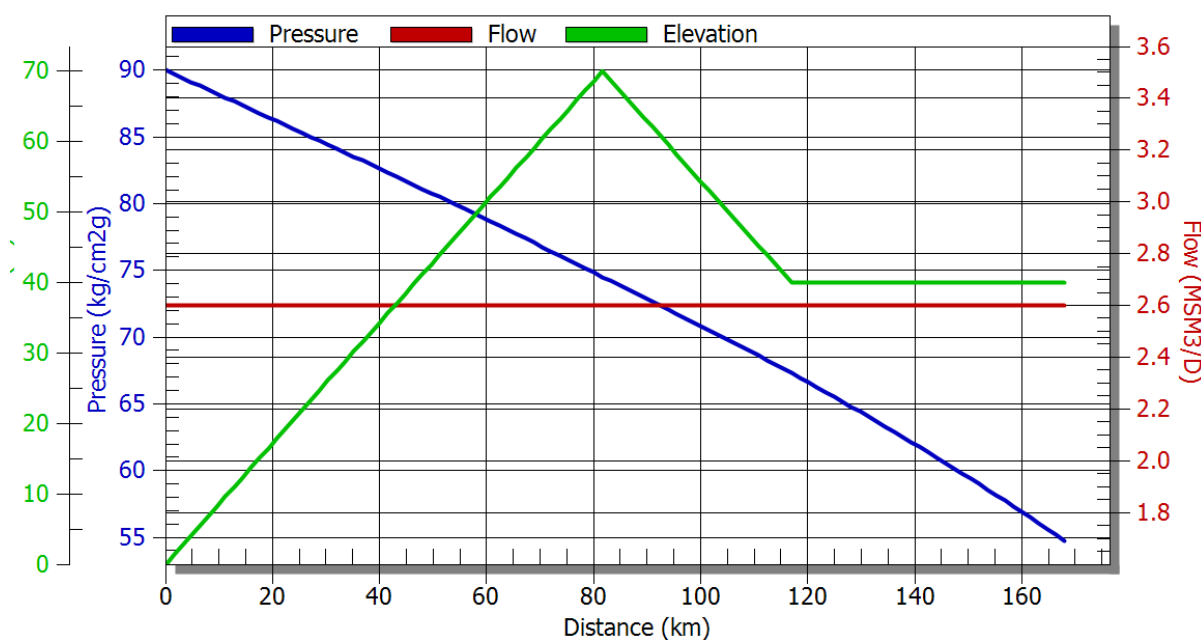
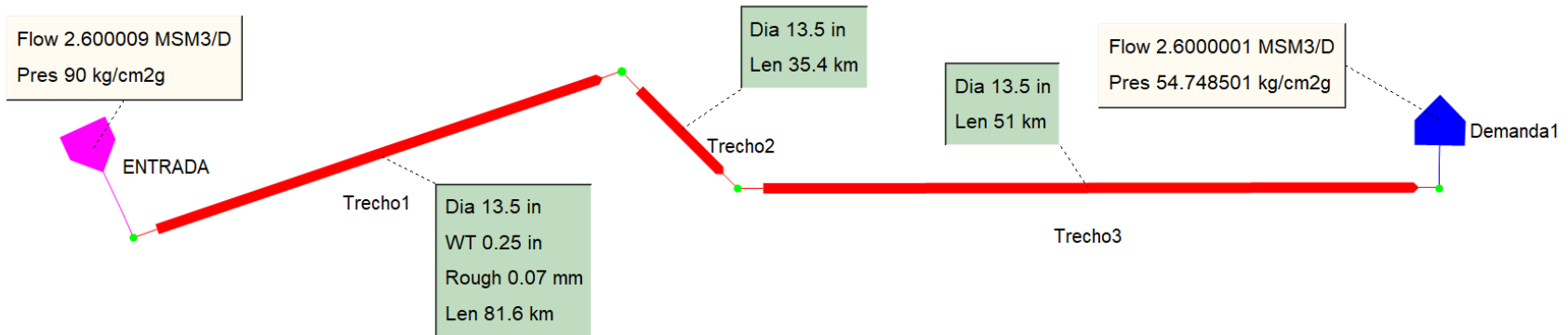
- Diâmetro 12": atende ao projeto??



Resposta: Não

PROJETO DE GASODUTO

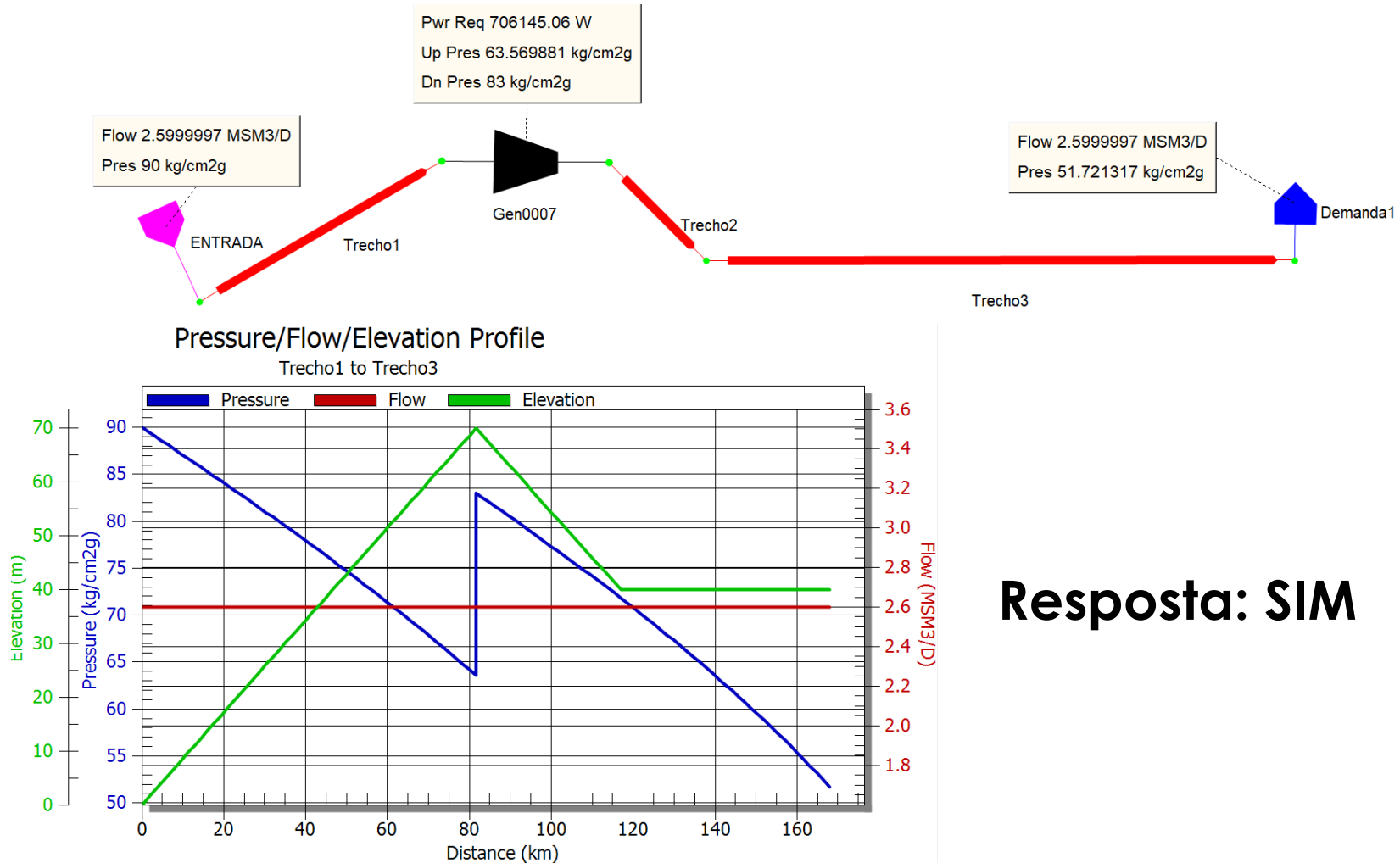
- Diâmetro de 14": atende ao projeto??



Resposta: SIM

PROJETO DE GASODUTO

- Diâmetro de 12" com estação de compressão. Atende??



Resposta: SIM

PROJETO DE GASODUTO

Estudo de viabilidade: indica duto de 14''

Tabela 5.2: Custos de dutos e compressores

Variável	Definição	Valor	Duto de 12''	Duto de 14''
Custo de construção do duto	US\$/km-pol	19.000	38.304.000	44.688.000
Custo do compressor	US\$/kW	900	627.000	0

Tabela 5.3: Custos Anuais

Variável	Definição	Valor	Duto de 12''	Duto de 14''
Depreciação do duto	Anos	25	1.532.160	1.787.520
Depr. do compressor	Anos	20	31.350	0
Energia	US\$/MW-h	40	315.360	-
Total			1878870	1.787.520
Custo de transporte (2.6MMm ³ /d)			0,72 US\$/m ³	0,69 US\$/m ³