

Apêndice A

Relações Vetoriais

Neste apêndice é apresentado uma breve revisão de algumas relações vetoriais utilizadas no texto. Sugere-se ao leitor não familiarizado com análise vetorial consultar um livro na área. Admite-se, contudo, que os conceitos de soma e subtração de vetores sejam bem conhecidos.

Produto Escalar

Sejam \mathbf{a} e \mathbf{b} dois vetores. O produto escalar de \mathbf{a} e \mathbf{b} é definido como

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \theta \quad (\text{A.1})$$

onde $|\mathbf{a}|$ e $|\mathbf{b}|$ representam as magnitudes de \mathbf{a} e \mathbf{b} , respectivamente e θ é o ângulo entre \mathbf{a} e \mathbf{b} .

Se \mathbf{a} e \mathbf{b} estão referenciados num sistema de coordenadas retangular x, y, z , os dois vetores podem ser representados como

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \\ \mathbf{b} &= b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + b_z \mathbf{k} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

onde $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ são os vetores unitários nas direções x, y e z , respectivamente. Os parâmetros a_x, a_y, a_z e b_x, b_y, b_z são as componentes dos vetores nas direções dos eixos de coordenadas. Portanto

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= (a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}) \cdot (b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + b_z \mathbf{k}) \\ &= a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

onde foram utilizadas as definições

$$\begin{aligned} \mathbf{i} \cdot \mathbf{i} &= \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1 \\ \mathbf{i} \cdot \mathbf{j} &= \mathbf{i} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Note que a operação para o produto escalar pode ser aplicada para vetores representados em qualquer sistema de coordenadas e não somente retangular. Assim, se $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$ e \mathbf{i}_3 representam vetores unitários nas direções coordenadas de um sistema arbitrário, podemos simplesmente substituir \mathbf{i}, \mathbf{j} e \mathbf{k} por $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$ e \mathbf{i}_3 nas equações acima.

Cálculo Vetorial

O cálculo diferencial de vetores torna-se relativamente simples com a introdução do operador diferencial *nabla* ∇ definido para o sistema de coordenadas retangular como

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{A.5})$$

Para um sistema cilíndrico (r, θ, z) , com vetores unitários $\mathbf{i}_r, \mathbf{i}_\theta$ e \mathbf{i}_z nas direções r, θ e z

$$\nabla = \mathbf{i}_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\mathbf{i}_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \mathbf{i}_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{A.6})$$

Gradiente. Seja φ uma função escalar das coordenadas espaciais. O gradiente de φ é definido como $\nabla\varphi$. No sistema retangular temos

$$\nabla\varphi = \mathbf{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (\text{A.7})$$

Divergência. Seja $\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}$ um vetor. A divergência de \mathbf{a} é definida como o produto escalar de ∇ com \mathbf{a}

$$\text{div } \mathbf{a} = \nabla \cdot \mathbf{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} \quad (\text{A.8})$$

Observe que o gradiente de um escalar é um vetor, enquanto a divergência de um vetor é uma quantidade escalar.

Apêndice B

Comportamento de Gases Reais

Gases reais apresentam comportamento distinto da clássica formulação para os denominados gases ideais, ou gases perfeitos. Neste apêndice analisaremos a *equação de estado de compressibilidade*, muito utilizada em aplicações pela indústria.

B.1 A Equação de Estado de Compressibilidade

A teoria cinética dos gases mostra que a equação para gás ideal apresenta uma forma correta para esse gás. Por outro lado, a maioria dos gases denominados reais apresentam um desvio desta equação fundamental, sendo representados por expressões mais gerais, relativamente complexas, conhecidas como *equações de estado para gases*. Um alternativa conveniente nas aplicações práticas para representar essas equações para gases reais, consiste na introdução de um fator corretor na equação de gás ideal na forma

$$p = Z\rho RT \quad (\text{B.1})$$

onde o fator-Z é conhecido como *fator de compressibilidade*. A equação é conhecida como *equação de compressibilidade* ou *equação de gás real*. O fator-Z é também conhecido como *fator de super-compressibilidade* ou, simplesmente, *fator-Z*.

O fator-Z não é constante, variando com a composição, temperatura e pressão do gás. Podendo ser determinado experimentalmente, tendo a forma mostrada na Fig. B.1; consistente com o comportamento típico dos gases. Nas baixas pressões, as moléculas estão distantes o suficiente para que o comportamento ideal ocorra. Nessas circunstâncias o fator-Z aproxima-se de 1,0.

Em geral, três técnicas podem ser utilizadas para se obter Z: experimentalmente, por correlação (Standing e Katz¹, v.g.), ou por uma expressão analítica.

O método de Standing-Katz tem por base a utilização de gráficos, Fig. B.1, construídos para misturas binárias e hidrocarbonetos saturados. O método é normalmente

¹ Standing, M.B., Katz, D.L., Density of Natural Gases, Trans. AIME, 146, 140-149, 1942.

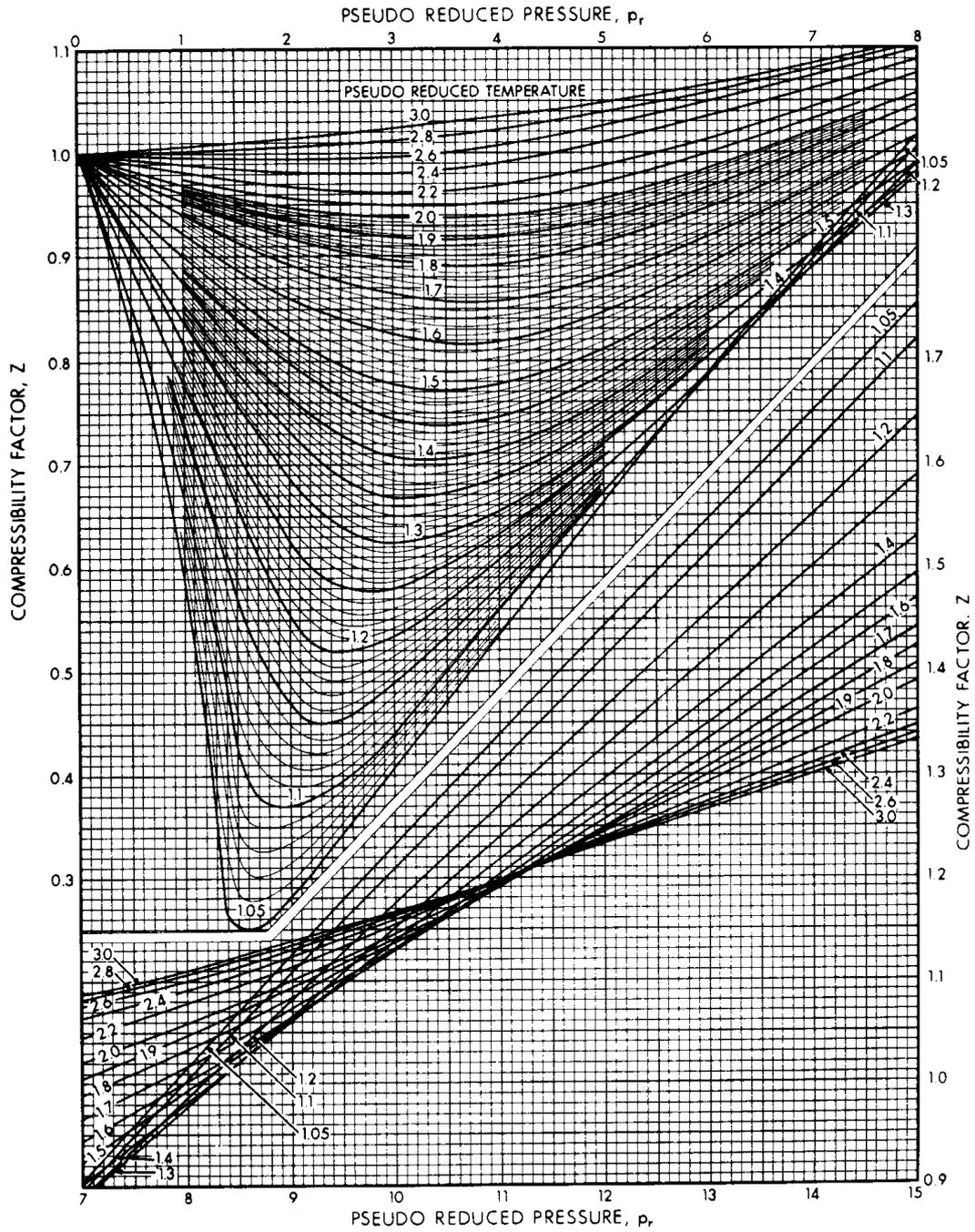


Figura B.1 Fator de compressibilidade para gás natural.

empregado para misturas de gases doces compostos de vários componentes. Se a mistura gasosa contiver uma quantidade significativa de não-hidrocarbonetos, como nitrogênio, gás sulfídrico (H₂S) e dióxido de carbono (CO₂), correções devem ser introduzidas para a presença desses elementos. Os ajustes são feitos sobre os valores das pressões e temperaturas críticas, conforme descrito em §B.6 a seguir.

Além do método gráfico de Standing-Katz, apresentamos na seqüência uma breve descrição das correlações de Yarborough-Hall e da California Natural Gas Association.

B.2 Princípio dos Estados Correspondentes

Se comparamos as curvas de *Z* para diferentes gases notaremos que estas são muito similares. Esta observação levou ao desenvolvimento do *Princípio dos Estados Correspondentes: substâncias a pressões e temperaturas reduzidas iguais ocupam o mesmo volume*. Pressão e temperatura reduzidas são definidas como

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad e \quad T_r = \frac{T}{T_c} \quad (\text{B.2})$$

onde (*p*,*T*) é a pressão e temperatura (absolutas) do gás e (*p_c*, *T_c*) as respectivas pressão e temperatura críticas.

O Princípio dos Estados Correspondentes estabelece que todos os gases puros possuem o mesmo fator-*Z* na mesma condição de pressão e temperatura reduzidas. Isto não é, contudo, exato. Por exemplo, na temperatura reduzida igual a dois (*T_r*= 2) e pressão reduzida igual a quatro (*p_r*= 4), metano e etano deveriam ter o mesmo valor de *Z*; todavia eles são 0,959 e 0,962, respectivamente². O Princípio é mais preciso para gases com características moleculares similares. Felizmente, a maioria dos gases que lidamos na área de petróleo trata de compostos da mesma classe, isto é, hidrocarbonetos parafínicos.

Exemplo B.1- Determinar a massa específica do etano na pressão de 6,33 MPa e 47 °C.

Solução: Da Tabela B.1 obtém-se para o etano, *p_c*= 4,88 MPa, *T_c*= 305 K, *M_c*= 30,07. Logo

$$p_r = \frac{6,33}{4,88} = 1,3 \quad T_r = \frac{47+273,2}{305} = 1,05 \quad R_e = \frac{8314}{30,07} = 277 \quad m^2/s^2-K$$

² Katz, D.L., e Lee, R.L., “Natural Gas Engineering”, Cap. 4, McGraw-Hill Co., 1990.

Com os valores reduzidos na Fig. B.1, $Z = 0,39$. Portanto, a massa específica do etano é

$$\rho = \frac{p}{ZRT} = \frac{6,33 \times 10^6}{0,39 \times 277 \times (47 + 273,2)} = 183 \text{ kg/m}^3$$

Observe que este valor está bem longe ($Z = 0,39$) daquele que seria calculado pela hipótese de idealidade do gás.

B.3 A Equação de Compressibilidade para Mistura de Gases

O Princípio dos Estados Correspondentes pode ser estendido para incluir misturas de gases com características moleculares próximas. Para tanto, definem-se pseudo propriedades dos gases, como a *pseudo-pressão crítica* e a *pseudo-temperatura crítica*. Essas quantidades são definidas como os valores correspondentes às médias ponderadas das propriedades críticas pelas respectivas frações molares que compõem a mistura. Se p_{pci} , T_{pci} e y_i representam a pressão crítica, temperatura crítica e a fração molar do componente- i na mistura, então

$$p_{pc} = \sum_i y_i p_{pci} \quad e \quad T_{pc} = \sum_i y_i T_{pci} \quad (\text{B.3})$$

As propriedades pseudo-críticas assim definidas foram criadas somente para correlacionar propriedades físicas. Na realidade elas não são rigorosamente iguais às propriedades de uma mistura gasosa. Métodos precisos existem para determinar essas propriedades. Todavia, por serem correlações relativamente simples, as Eqs. (B.3) são normalmente utilizadas na prática para estimar as propriedades críticas de misturas de gases.

As propriedades físicas de misturas de gases são correlacionadas com a pseudo-pressão crítica e a pseudo-temperatura crítica da mesma maneira que as propriedades de gases puros são correlacionados com a *pseudo-pressão reduzida* e a *pseudo-temperatura reduzida*, i.e.

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}} \quad e \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (\text{B.4})$$

Se a composição do gás não é conhecida, a condição pseudo-crítica pode ser estimada (valores aproximados) a partir da equação de Sutton [cf. McCain ¹]

$$p_{pc} = 5,218 - 0,90321 \gamma_g - 0,02482 \gamma_g^2 \quad (\text{B.5})$$

$$T_{pc} = 94,0 + 194,17 \gamma_g - 41,11 \gamma_g^2$$

onde γ_g é densidade relativa do gás, a pressão absoluta em MPa e a temperatura em °K.

B.4 A Equação de Yarborough & Hall

O método de Yarborough & Hall para cálculo do fator de compressibilidade é preciso e particularmente conveniente para programação em computador. Segundo Takacs², a diferença entre a correlação de Standing e Katz, geralmente aceita como das mais confiáveis no setor de petróleo e gás e o método de Yarborough & Hall³, varia entre 0,1% e 0,5%. A metodologia foi desenvolvida a partir das equações de estado de Starling-Carnahan,

$$Z = \frac{0,06125 p_{pr} t e^{-1,2(1-t)^2}}{y} \quad (\text{B.6})$$

O parâmetro y é a “densidade reduzida”, obtida da solução da seguinte equação

$$f(y) = -0,06125 p_{pr} t e^{-1,2(1-t)^2} + \frac{y+y^2+y^3-y^4}{(1-y)^3} - (14,76t-9,76t^2+4,58t^3)y^2 + (90,7t-242,2t^2+42,4t^3)y^{(2,18+2,82t)} = 0 \quad (\text{B.7})$$

onde $p_{pr} = p/p_{pc}$ é a pseudo-pressão reduzida e $t = T_{pc}/T$ o recíproco da pseudo-temperatura reduzida, ambas definidas em §B3.

¹ McCain, W.D., “The Properties of Petroleum Fluids”, PennWell Books, p.118-119, 1990.

² Takacs, G., Comparisons made for Computer Z-Factor Calculations, The Oil and Gas J., Dec.1976.

³ Yarborough, L., Hall, K.R. How to Solve Equation of State for Z-Factors, The Oil and Gas J., Feb. 1974.

Essas equações podem ser convenientemente resolvidas por um programa numérico: primeiro, encontrando a raiz y da equação (C.7), em seguida, obtendo o valor de Z na equação (C.6). Os autores destacam contudo que o método não é recomendado para faixas de pseudo-temperatura reduzida e pseudo-pressão reduzida fora das faixas: $Pr > 1$ e $Tr > 1$. Ou seja, os valores reduzidos devem ser superiores à unidade.

B.5 Outros Métodos de Cálculo para o Fator de Compressibilidade

Além da consagrada proposta de Hall-Yarborough de 1974 outras correlações bastante precisas são hoje utilizadas para o cálculo do fator de compressibilidade. Como no caso de Hall-Yarborough elas requerem a solução computacional de expressões transcendentais envolvendo os valores da pressão e temperatura e seus valores críticos. Destacamos aqui duas dessas correlações, Dranchuk-Abu-Kassem⁴ e Dranchuk-Purvis-Robinson⁵. Os interessados podem encontrar todos os detalhes das equações diretamente nas referências, ou em Tarek Ahmed⁶.

B.6 Efeitos de Gás Ácido e de Componentes Não-Hidrocarbonetos

Gás natural contém em geral gás sulfídrico, dióxido de carbono e nitrogênio. A presença de nitrogênio tem efeito reduzido nos cálculos de Z descritos anteriormente; o fator cresce aproximadamente 1% para cada 5% de nitrogênio no gás. Por outro lado, a presença de gás sulfídrico (H_2S) e de dióxido de carbono (CO_2) introduz erros elevados no fator de compressibilidade obtido pelos métodos aqui descritos. Uma técnica para corrigir esses efeitos consiste em ajustar as propriedades pseudo-críticas (pressão p_{pc} e temperatura, T_{pc}) na Eq. (B.3) de forma a considerar o comportamento pouco usual desses gases ácidos⁷.

⁴ Dranchuk, P. M., Abu-Kassem, J. H., Calculation of Z-factors for Natural Gases Using Equations-of-State, JCPT, July-Sept. pp. 34-36, 1975.

⁵ Dranchuk, P. M., Purvis, R. A., Robinson, D. B., Computer Calculation of Natural Gas Compressibility Factors Using the Standing-Katz Correlation, Inst. Petroleum Tech. Series, IP-74-008, 1974.

⁶ Tarek Ahmed, Reservoir Engineering Handbook, Cap. 2, 3rd. Ed. Elsevier, 2006.

⁷ A Society of Petroleum Engineers-SPE, define óleo cru ácido (*sour*) como *óleo contendo enxofre livre, ou outro composto de enxofre, cujo conteúdo total de enxofre estiver acima de 1 por cento* (SPE, 2009). Óleos cru, com baixo conteúdo de enxofre, são comumente denominados de doces (*sweet*).

Um dos métodos utilizados neste procedimento baseia-se na correlação de Wichert e Aziz ⁸

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 120(\alpha^{0,9} - \alpha^{1,6}) + 15(\beta^{0,5} - \beta^4) \\ T_{pc}^* &= T_{pc} - \varepsilon \\ p_{pc}^* &= p_{pc} \left[\frac{T_{pc}^*}{T_{pc} + \beta(1 - \beta)\varepsilon} \right]\end{aligned}\tag{B.9}$$

onde

ε	= Fator de ajuste para a temperatura	R
α	= Soma das frações molares de CO ₂ e H ₂ S	-
β	= Fração molar de H ₂ S	-

As propriedades pseudo-críticas corrigidas p_{pc}^* (psia) e T_{pc}^* (R) [em valores absolutos] são então utilizadas nas pseudo propriedades reduzidas, Eqs. (B.4) e B(6). O erro médio absoluto no cálculo do fator-Z por esta metodologia é de 1%, com valor máximo de 6,6%, para o *data set* utilizado no desenvolvimento da correlação. A correlação foi desenvolvida para gases sob a seguinte condição: $10,6 < p$ (bara) < 484 ; $4 < T$ (°C) < 149 ; $0 < CO_2$ (mol%) $< 54,5$; $0 < H_2S$ (mol%) $< 73,8$.

⁸ Wichert, E., Aziz, K., Calutate Z's for Sour Gases, Hyd. Proc. , 119-122, May 1972.

B.7 Propriedades Críticas de Constituintes de Gás Natural

Gás natural é constituído de vários componentes de hidrocarbonetos. Em geral os elementos básicos de gás natural tratado para uso comercial são metano, etano e propano, com pequenas quantidades de outros elementos.

Para calcular as propriedades pseudocríticas do gás natural é necessário conhecer sua composição química, incluindo as respectivas frações molares. A Tabela B.1 apresenta as propriedades críticas de vários constituintes de gás natural.

Tabela B.1 Propriedades de alguns gases e líquidos (T= 20 °C e P= 1 atm) ⁹

No.	Constituinte	Massa molecular g/mol	p _c MPa	T _c K	c _p J/kg-K	γ
C ₁	Metano	16,043	4,60	190.4	2220	1,299
C ₂	Etano	30,070	4,88	305.4	1750	1,186
C ₃	Propano	44,097	4,25	369.8	1670	1,126
i-C ₄	Isobutano	58,124	3,65	408.0	1660	1,091
n-C ₄	n-Butano	58,124	3,80	425.0	1695	1,091
i-C ₅	Isopentano	72,151	3,39	460.0	1648	—
n-C ₅	n-Pentano	72,151	3,37	469.7	1665	—
C ₆	n-Hexano	86,178	3,01	507.5	1460	—
C ₇	n-Heptano	100,205	2,87	540.3	1665	—
C ₈	n-Octano	114,232	2,49	568.8	1655	—
C ₉	n-Nonano	128,259	2,29	595.0	1640	—
C ₁₀	n-Decano	142,286	2,10	618.0	2215	—
He	Helio	2,016	0,226	5.20	5193	1,667
Ar	Ar	28,962	3,77	132.4	1005	1,400
H ₂	Hidrogênio	2,016	1,30	33,3	918	1,405
N ₂	Nitrogênio	28,016	3,39	126.2	1041	1,400
O ₂	Oxigênio	32,000	5,04	154.6	920	1,393
CO ₂	Dióxido de C	44,010	7,38	304.1	851	1,289
H ₂ S	Gás Sulfídrico	34,076	8,96	373.0	977	—
H ₂ O	Água (líquido)	18,015	22,06	647.3	4180	—
C ₂ H ₆ O	Etanol	46,068	6,38	516,3	2430	—

⁹ highereducation.com/sites/dl/free/0073529214/395307/appdxxs1_2.pdf

Exemplo B.2- Determinar o fator de compressibilidade para o gás natural seco definido abaixo para a condição: $p = 26,3$ MPa e $T = 90$ °C.

Componente	Composição molar
Metano	0,9512
Etano	0,0242
Propano	0,0031
i-Butano	0,0005
n-Butano	0,0002
i-Pentano	traços
n-Pentano	traços
Hexanas	0,0002
Heptano+	0,0006
Nitrogenio	0,0130
CO2	0,0070

Solução: Da tabela abaixo calculamos as propriedades críticas, $p_{pc} = 4,607$ MPa (4,53 MPa relativo) e $T_{pc} = 194,13$ K (-79,0 °C) Com esses valores as propriedades pseudoreduzidas são

$$p_{pr} = \frac{26,3}{4,607} = 5,71 \quad e \quad T_{pr} = \frac{363,2}{194,13} = 1,87$$

E assim, da Fig. B.1, obtém-se $Z = 0,95$. Observe que a densidade relativa (ao ar) deste gás é $\lambda_g = 16,8714/28,962 = 0,5825$. A constante do gás é então: $R_g = 8314,46/16,8714 = 492,81$ kJ/kg-K

Componente	Fração molar (y)	p_c MPa	$y_i p_{ci}$ MPa	T_c K	$y_i T_{ci}$ K	m_{ci} g/mol	$y_i m_{ci}$ g/mol
Metano	0,9512	4,60	4,3755	190,4	181,108	16,04	15,257
Etano	0,0242	4,88	0,1181	305,4	7,390	30,07	0,7276
Propano	0,0031	4,25	0,0132	369,8	1,146	44,10	0,1367
i-Butano	0,0005	3,65	0,0018	408,0	0,204	58,12	0,0291
n-Butano	0,0002	3,80	0,0008	425,0	0,085	58,12	0,0116
Hexanas	0,0002	3,01	0,0006	507,5	0,101	86,18	0,0172
Hpatano+	0,0006	2,87	0,0017	540,3	0,324	100,2	0,0200
Nitrogenio	0,0130	3,39	0,0441	126,2	1,640	28,02	0,3642
CO2	0,0070	7,38	0,0517	304,1	2,128	44,01	0,3080
	1		4,6075		194,126		16,8714

Apêndice C

C.1 Escoamento Adiabático em Duto

Tabela C.1 - $\gamma = 1,30$ (Gás Natural...)

Ma	fL*/D	p/p*	T/T*	V/V*	P ₀ /P ₀ *
.00	∞	∞	1.1000	.0000	∞
.05	301.7462	21.44436	1.14496	.05336	11.7214
.10	72.2024	10.7158	1.14833	.10722	5.8860
.15	30.1830	7.1372	1.1461	.16066	3.9522
.20	15.7324	5.3459	1.1431	.21388	2.9440
.25	9.2012	4.2696	1.1393	.26688	2.4262
.30	5.7594	3.5507	1.1347	.31966	1.9777
.35	3.7594	3.0362	1.1293	.37199	1.5700
.40	2.5200	2.6493	1.1233	.42333	1.1922
.45	1.7139	2.3477	1.1161	.47367	0.8644
.50	1.1724	2.1056	1.1084	.52300	0.5779
.55	.8003	1.9070	1.1001	.57133	0.3914
.60	.5409	1.7409	1.0911	.61867	0.2622
.65	.3586	1.5999	1.0815	.66500	0.1755
.70	.2305	1.4786	1.0713	.71033	0.1172
.75	.1413	1.3731	1.0605	.75467	0.0744
.80	.0804	1.2804	1.0493	.79800	0.0455
.85	.0405	1.1984	1.0377	.84033	0.0214
.90	.0162	1.1251	1.0257	.88167	0.0092
.95	.0037	1.0594	1.0133	.92200	0.0022
1.00	.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
1.05	.0031	.9461	.9868	1.04033	0.0021
1.10	.0112	.8969	.9733	1.08067	0.0083
1.15	.0232	.8518	.9596	1.12100	0.0184
1.20	.0382	.8104	.9457	1.16133	0.0321
1.25	.0552	.7722	.9316	1.20167	0.0495
1.30	.0739	.7368	.9174	1.24200	0.0703
1.35	.0936	.7039	.9033	1.28233	0.0948
1.40	.1142	.6734	.8893	1.32267	0.1227
1.45	.1352	.6448	.8754	1.36300	0.1543
1.50	.1564	.6182	.8615	1.40333	0.1895
1.55	.1777	.5932	.8477	1.44367	0.2284
1.60	.1990	.5697	.8339	1.48400	0.2712
1.65	.2200	.5477	.8202	1.52433	0.3180
1.70	.2408	.5269	.8066	1.56467	0.3690
1.75	.2613	.5073	.7931	1.60500	0.4243
1.80	.2814	.4887	.7797	1.64533	0.4841
1.85	.3010	.4712	.7664	1.68567	0.5486
1.90	.3203	.4546	.7532	1.72600	0.6182
1.95	.3390	.4388	.7401	1.76633	0.6929
2.00	.3573	.4239	.7271	1.80667	0.7732
2.05	.3751	.4097	.7142	1.84700	0.8593
2.10	.3924	.3962	.7014	1.88733	0.9514
2.15	.4092	.3833	.6887	1.92767	1.0501
2.20	.4255	.3710	.6762	1.96800	1.1556
2.25	.4413	.3593	.6638	2.00833	1.2689
2.30	.4567	.3482	.6515	2.04867	1.3898
2.35	.4716	.3375	.6394	2.08900	1.5188
2.40	.4860	.3273	.6274	2.12933	1.6563
2.45	.5000	.3175	.6155	2.16967	1.8029
2.50	.5135	.3082	.6037	2.21000	1.9591
2.55	.5267	.2992	.5920	2.25033	2.1254
2.60	.5394	.2906	.5804	2.29067	2.3024
2.65	.5517	.2824	.5689	2.33100	2.4904
2.70	.5636	.2744	.5575	2.37133	2.6898
2.75	.5752	.2666	.5462	2.41167	2.9011
2.80	.5864	.2596	.5350	2.45200	3.1246
2.85	.5972	.2526	.5239	2.49233	3.3606
2.90	.6077	.2459	.5129	2.53267	3.6093
2.95	.6179	.2394	.5020	2.57300	3.8711
3.00	.6277	.2332	.4912	2.61333	4.1464
3.05	.6373	.2272	.4805	2.65367	4.4358
3.10	.6465	.2214	.4700	2.69400	4.7397
3.15	.6555	.2158	.4596	2.73433	5.0586
3.20	.6642	.2104	.4493	2.77467	5.3929
3.25	.6726	.2053	.4391	2.81500	5.7431
3.30	.6808	.2002	.4290	2.85533	6.1096
3.35	.6887	.1954	.4190	2.89567	6.4931
3.40	.6964	.1908	.4091	2.93600	6.8941
3.45	.7038	.1862	.4093	2.97633	7.3128
3.50	.7110	.1819	.4095	3.01667	7.7506
3.55	.7180	.1777	.4097	3.05700	8.2081
3.60	.7248	.1736	.4099	3.09733	8.6858
3.65	.7314	.1697	.4100	3.13767	9.1844
3.70	.7379	.1659	.4101	3.17800	9.7046
3.75	.7441	.1622	.4102	3.21833	10.2471
3.80	.7501	.1586	.4103	3.25867	10.8126
3.85	.7560	.1551	.4104	3.29900	11.4016
3.90	.7617	.1518	.4104	3.33933	12.0147
3.95	.7672	.1485	.4105	3.37967	12.6524
4.00	.7726	.1454	.4105	3.42000	13.3153

C.2 Escoamento Adiabático em Duto

Tabela C.2 - $\gamma = 1,40$

Ma	fL*/D	p/p*	T/T*	V/V*	p ₀ /p ₀ *
.00	∞	∞	1.2000	.0000	∞
.05	280.02203	21.90033	1.19994	.0548	11.5914
.10	106.92116	10.94335	1.19777	.10994	5.5218
.15	60.93220	7.28566	1.19466	.16339	3.9823
.20	42.53333	5.45544	1.19055	.21482	3.2535
.25	31.48334	4.35466	1.18522	.27222	2.8257
.30	24.29933	3.61911	1.17888	.33577	2.5551
.35	19.45225	3.09222	1.17133	.37888	2.3780
.40	15.30855	2.69588	1.16222	.43133	2.2591
.45	11.56664	2.38655	1.15333	.48333	2.1777
.50	8.06911	2.13881	1.14444	.53333	2.1188
.55	5.72811	1.93341	1.13555	.58333	2.0699
.60	4.19088	1.76334	1.11944	.63333	2.0222
.65	3.24466	1.61833	1.11066	.68333	1.9756
.70	2.20811	1.49335	1.10922	.73333	1.9300
.75	1.62733	1.38488	1.10788	.77888	1.8855
.80	1.12723	1.28933	1.10638	.82511	1.8422
.85	0.83633	1.20477	1.10485	.87044	1.8000
.90	0.61455	1.12911	1.10327	.91488	1.7588
.95	0.43333	1.06133	1.10165	.95777	1.7188
1.00	0.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
1.05	0.00277	.94433	.98333	1.04111	1.00222
1.10	0.00999	.89336	.96622	1.08111	1.00444
1.15	0.02055	.84471	.94990	1.12200	1.00777
1.20	0.03336	.80044	.93317	1.15880	1.01111
1.25	0.04866	.76499	.91433	1.19522	1.01555
1.30	0.06488	.72855	.89969	1.22333	1.02000
1.35	0.08220	.69477	.88794	1.25222	1.02555
1.40	0.09977	.66332	.87822	1.28111	1.03111
1.45	0.11778	.63339	.87044	1.31000	1.03777
1.50	0.13611	.60655	.86444	1.33999	1.04444
1.55	0.15443	.58288	.85999	1.37000	1.05111
1.60	0.17244	.56166	.85777	1.40111	1.05888
1.65	0.19022	.54344	.85666	1.43333	1.06666
1.70	0.20788	.51330	.85666	1.46666	1.07555
1.75	0.22550	.49229	.85777	1.50000	1.08555
1.80	0.24119	.47441	.85888	1.53333	1.09666
1.85	0.25833	.45662	.86000	1.56666	1.10888
1.90	0.27433	.43994	.86111	1.60000	1.12111
1.95	0.28999	.42334	.86222	1.63333	1.13444
2.00	0.30550	.40882	.86333	1.66666	1.14888
2.05	0.31997	.39399	.86444	1.70000	1.16333
2.10	0.33339	.38002	.86555	1.73333	1.17888
2.15	0.34476	.36673	.86666	1.76666	1.19444
2.20	0.36099	.35499	.86777	1.80000	1.21111
2.25	0.37338	.34332	.86888	1.83333	1.22888
2.30	0.38662	.33220	.87000	1.86666	1.24666
2.35	0.39989	.32211	.87111	1.90000	1.26555
2.40	0.40999	.31111	.87222	1.93333	1.28555
2.45	0.42111	.30014	.87333	1.96666	1.30666
2.50	0.43220	.29221	.87444	2.00000	1.32888
2.55	0.44225	.28332	.87555	2.03333	1.35111
2.60	0.45226	.27447	.87666	2.06666	1.37444
2.65	0.46224	.26666	.87777	2.10000	1.39888
2.70	0.47178	.25888	.87888	2.13333	1.42333
2.75	0.48009	.25113	.87999	2.16666	1.44888
2.80	0.48998	.24441	.88111	2.20000	1.47444
2.85	0.49882	.23773	.88222	2.23333	1.50111
2.90	0.50655	.23307	.88333	2.26666	1.52888
2.95	0.51445	.22443	.88444	2.30000	1.55666
3.00	0.52222	.21882	.88555	2.33333	1.58555
3.05	0.52966	.21224	.88666	2.36666	1.61555
3.10	0.53668	.20667	.88777	2.40000	1.64666
3.15	0.54337	.20113	.88888	2.43333	1.67888
3.20	0.55004	.19611	.89000	2.46666	1.71111
3.25	0.55669	.19111	.89111	2.50000	1.74444
3.30	0.56332	.18662	.89222	2.53333	1.77888
3.35	0.56993	.18155	.89333	2.56666	1.81333
3.40	0.57752	.17700	.89444	2.60000	1.84888
3.45	0.58509	.17277	.89555	2.63333	1.88555
3.50	0.58664	.16855	.89666	2.66666	1.92333
3.55	0.59118	.16455	.89777	2.70000	1.96111
3.60	0.59770	.16066	.89888	2.73333	2.00000
3.65	0.60220	.15688	.89999	2.76666	2.03888
3.70	0.60668	.15311	.90111	2.80000	2.07888
3.75	0.61115	.14933	.90222	2.83333	2.11999
3.80	0.61611	.14622	.90333	2.86666	2.16111
3.85	0.62066	.14329	.90444	2.90000	2.20333
3.90	0.62448	.13997	.90555	2.93333	2.24666
3.95	0.62900	.13666	.90666	2.96666	2.29111
4.00	0.63331	.13336	.90777	3.00000	2.33666

C.3 Escoamento Adiabático em Duto

Tabela C.3 - $\gamma = 1,67$

Ma	fL*/D	p/p*	T/T*	V/V*	p ₀ /p ₀ *
.00	.8	.8	1.3350	.0000	.8
.05	23	1.0000	.3339	.0577	11.2649
.10	11	1.0000	.3339	.1153	.66607
.15	5	1.0000	.3339	.1727	.88871
.20	3	1.0000	.3339	.2296	.88871
.25	2	1.0000	.3339	.2859	.34440
.30	1.5	1.0000	.3339	.3415	.98886
.35	1.2	1.0000	.3339	.3963	.17406
.40	1	1.0000	.3339	.4503	.75599
.45	.9	1.0000	.3339	.5032	.42242
.50	.8	1.0000	.3339	.5549	.32201
.55	.75	1.0000	.3339	.6055	.23292
.60	.7	1.0000	.3339	.6549	.17559
.65	.65	1.0000	.3339	.7029	.12622
.70	.6	1.0000	.3339	.7496	.08774
.75	.55	1.0000	.3339	.7949	.05776
.80	.5	1.0000	.3339	.8388	.03511
.85	.45	1.0000	.3339	.8812	.01899
.90	.4	1.0000	.3339	.9223	.00811
.95	.35	1.0000	.3339	.9618	.00199
1.00	.3	1.0000	.3339	1.0000	.00000
1.05	.25	1.0000	.3339	.0368	.00018
1.10	.2	1.0000	.3339	.0721	.00070
1.15	.15	1.0000	.3339	.1061	.01154
1.20	.1	1.0000	.3339	.1388	.02267
1.25	.08	1.0000	.3339	.1701	.04408
1.30	.06	1.0000	.3339	.2002	.05774
1.35	.05	1.0000	.3339	.2291	.07666
1.40	.04	1.0000	.3339	.2568	.09811
1.45	.035	1.0000	.3339	.2833	.12220
1.50	.03	1.0000	.3339	.3087	.14881
1.55	.025	1.0000	.3339	.3331	.17655
1.60	.02	1.0000	.3339	.3564	.20771
1.65	.018	1.0000	.3339	.3787	.23999
1.70	.015	1.0000	.3339	.4001	.27488
1.75	.012	1.0000	.3339	.4206	.31119
1.80	.01	1.0000	.3339	.4402	.35111
1.85	.008	1.0000	.3339	.4590	.39225
1.90	.007	1.0000	.3339	.4769	.43361
1.95	.006	1.0000	.3339	.4942	.47818
2.00	.005	1.0000	.3339	.5106	.52997
2.05	.0045	1.0000	.3339	.5264	.57999
2.10	.004	1.0000	.3339	.5416	.63233
2.15	.0035	1.0000	.3339	.5561	.68669
2.20	.003	1.0000	.3339	.5700	.74338
2.25	.0028	1.0000	.3339	.5833	.80330
2.30	.0025	1.0000	.3339	.5961	.86646
2.35	.0022	1.0000	.3339	.6084	.92285
2.40	.002	1.0000	.3339	.6201	.99488
2.45	.0018	1.0000	.3339	.6314	1.06399
2.50	.0015	1.0000	.3339	.6422	1.13447
2.55	.0012	1.0000	.3339	.6526	1.20884
2.60	.001	1.0000	.3339	.6626	1.28477
2.65	.0008	1.0000	.3339	.6722	1.36335
2.70	.0007	1.0000	.3339	.6815	1.44449
2.75	.0006	1.0000	.3339	.6903	1.52990
2.80	.0005	1.0000	.3339	.6989	1.61577
2.85	.00045	1.0000	.3339	.7071	1.70522
2.90	.0004	1.0000	.3339	.7150	1.79744
2.95	.00035	1.0000	.3339	.7226	1.89255
3.00	.0003	1.0000	.3339	.7299	1.99033
3.05	.00028	1.0000	.3339	.7369	2.09111
3.10	.00025	1.0000	.3339	.7437	2.19488
3.15	.00022	1.0000	.3339	.7503	2.30114
3.20	.0002	1.0000	.3339	.7566	2.41110
3.25	.00018	1.0000	.3339	.7627	2.52337
3.30	.00015	1.0000	.3339	.7685	2.63995
3.35	.00012	1.0000	.3339	.7742	2.75884
3.40	.0001	1.0000	.3339	.7797	2.88055
3.45	.00008	1.0000	.3339	.7849	3.00588
3.50	.00007	1.0000	.3339	.7900	3.13443
3.55	.00006	1.0000	.3339	.7950	3.26611
3.60	.00005	1.0000	.3339	.7999	3.40133
3.65	.000045	1.0000	.3339	.8043	3.53999
3.70	.00004	1.0000	.3339	.8088	3.68119
3.75	.000035	1.0000	.3339	.8131	3.82774
3.80	.00003	1.0000	.3339	.8172	3.97644
3.85	.000028	1.0000	.3339	.8213	4.12899
3.90	.000025	1.0000	.3339	.8252	4.28550
3.95	.000022	1.0000	.3339	.8290	4.44488
4.00	.00002	1.0000	.3339	.8326	4.60833

Apêndice D

Coefficiente Joule-Thomson

Pode-se mostrar que a variação de entalpia com a temperatura e pressão para um fluido real é calculada por ¹⁰

$$\delta \hat{h} = c_p \delta T + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] \delta p \quad (\text{D.1})$$

Ora, a Eq. (9.47) define o coeficiente Joule-Thomson μ

$$\delta \hat{h} = c_p (\delta T - \mu \delta p) \quad (\text{D.2})$$

Da definição do coeficiente de expansão volumétrica térmica, Eq. (1.4.36),

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (\text{D.3})$$

o coeficiente de J-T é obtido comparando essas três equações

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = - \frac{1}{c_p} \left(\frac{\partial \hat{h}}{\partial p} \right)_T = (T\beta - 1) \frac{1}{\rho c_p} \quad (\text{D.4})$$

Líquidos

Neste caso, o coeficiente de J-T é obtido diretamente da equação acima

$$\mu_l = (T\beta - 1) \frac{1}{\rho_l c_p} \quad (\text{D.5})$$

¹⁰ R.E.Sonntag, C.Bornakke, G..J.Van Wylen, "Fundamentals of Thermodynamics", John Wiley & Sons, Cap. 13, 1998.

A Tabela 1.4.3 no Capítulo 1 mostra valores para o coeficiente de expansão volumétrica para algumas substâncias para temperatura em torno de 20 °C. Observe que para um óleo parafínico $\beta \approx 0,00076$, e assim, para $T = 293\text{K}$ $\mu_0 \approx -0,77/\rho_1 c_p$ um valor negativo. Portanto, é esperado um *aquecimento* do óleo num processo de expansão com queda de pressão. Situação também esperada para a maioria dos líquidos para T não muito elevado.

Gases

Gases reais operando sob condição de expansão ou compressão apresentam freqüentemente resposta para a temperatura dependente da pressão; isto é, são sensíveis ao efeito Joule-Thomson. Portanto, em situações onde o cálculo da temperatura é crítico, ou requer precisão, deve-se incluir o coeficiente J-T na equação de energia. Neste caso, de D.3, D.4 e $\rho = p/ZRT$

$$\mu = \frac{T}{\rho c_p Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \quad (\text{D.6})$$

onde Z é o fator de compressibilidade do gás. A equação mostra que para cálculo de μ é necessário conhecer Z e sua derivada com respeito à temperatura. Em geral isto é feito pela solução numérica de uma equação para Z(p,T). A literatura apresenta um grande número de expressões para Z. Ressalte-se que o coeficiente pode também ser também obtido diretamente de uma equação de estado como, por exemplo, Redlich & Kwong, Soave ou Peng & Robinson¹¹.

Gases reais possuem um coeficiente J-T não-nulo. Dependendo das propriedades do gás, da pressão e da temperatura, o sinal do coeficiente pode ser positivo ou negativo. Um sinal positivo significa que dT é negativo quando dp é negativo; i.e., o gás resfria numa expansão adiabática [$d\hat{h} = 0$, Eq. (D.2)]. Gases que mostram um efeito de aquecimento ($\mu < 0$) numa temperatura apresentam um efeito de resfriamento ($\mu > 0$) quando a temperatura está abaixo da sua *temperatura de inversão* T_i , Fig. D.1. Para dada pressão a temperatura deve estar abaixo de um certo valor para que ocorra resfriamento mas, se esta se tornar muito baixa, o contorno é cruzado de novo, passando a ocorrer aquecimento.

¹¹ Walas, S.M., *Phase Equilibria in Chemical Engineering*, Butterworth Publisher, Cap. 1, 1st. Ed., 1985.

O exame da Fig. B.1 mostra que para pressões moderadas, digamos, para pseudo-pressões críticas inferiores a 6, o fator-Z cresce com a temperatura à pressão constante. Portanto para esta situação a derivada de Z com respeito à temperatura é positiva, o que indica que o coeficiente de J-T, Eq.(D.6), é positivo; i.e., a temperatura cai com a queda de pressão.

Para pressões elevadas (pseudo-pressões críticas superiores a 11 na Fig. B.1) o fator-Z decresce com a o aumento da temperatura. Neste caso a derivada $\partial Z/\partial T$ é negativa, indicando que a temperatura cresce com a expansão ($\mu < 0$).

Existe uma faixa de pressões para a qual as isotérmicas se cruzam na Fig. B.1. Esta zona de transição ocorre entre 350 e 500 bar (5000 e 7000 psi) para gás natural. Nas pressões altas a temperatura cresce à medida que a pressão decresce, sendo o efeito mais acentuado nas pressões mais elevadas. Tal situação ocorre, por exemplo, quando gás a alta pressão se expande através das perfurações no revestimento em poços produtores de gás profundos. Medições locais indicam *pontos quentes* no fundo do poço onde gás entra com maior vazão.

Para pressões inferiores a 350 bar (~5000 psi), a temperatura decresce à medida que a pressão decresce. O maior decréscimo ocorre quando a queda de pressão começa entre 100 e 150 bar. Isto é observado, por exemplo, no escoamento em *chokes* de superfície sob condições normais de operação.

Finalmente observemos que, para um gás perfeito $\mu=0$, indicando que a temperatura mantém-se inalterada durante uma expansão Joule-Thomson.

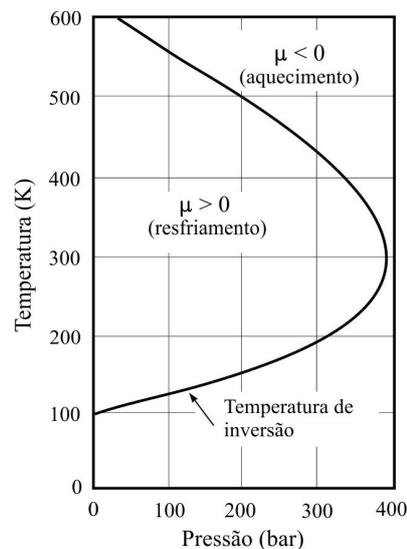


Figura D.1 Temperatura de inversão para um gás real (Nitrogênio).

Apêndice E

E.1 - Fatores de Conversão de Unidades

Comprimento

1 ft	= 0,3048 m	1 yd	= 0,9144 m
	= 12 in	1 mi	= 1.609,344 m
1 in	= 0,0254 m	1 km	= 1.000 m

Área

1 ft ²	= 0,092903 m ²	1 acre	= 4047 m ²
	= 144 in ²	1 a	= 100 m ²
1 m ²	= 10,7639 ft ²	1 ha	= 10.000 m ²

Volume

1 ft ³	= 0,0283168 m ³	1 m ³	= 35,3147 ft ³
1 gal (US)	= 0,00378541 m ³	1 bbl	= 0,158987 m ³
1 gal (UK)	= 0,00454609 m ³	1 m ³	= 6,289822 bbl

Velocidade

1 m/s	= 3,6 km/h	1 ft/s	= 0,3048 m/s
	= 2,23694 mi/h	1 km/h	= 0,27778 m/s
	= 3,28084 ft/s		= 0,91134 ft/s

Massa

1 kg	= 2,204623 lb	1 lb	= 0,453592 kg
1 g	= 0,001 kg	1 ton	= 2.000 lb
1 t	= 1.000 kg	1 slug	= 14,5939 kg

Massa Específica

1 kg/m ³	= 0,06242797 lb/ft ³	1 lb/ft ³	= 16,01846 kg/m ³
1 g/cm ³	= 1.000 kg/m ³	1 lb/gal	= 119,8267 kg/m ³
	= 1 kg/l	1 l/mol *	= 24,05510

Volume Específico

1 cm ³ /g	= 0,001 m ³ /kg	1 m ³ /kg	= 16,01846 ft ³ /lb
	= 1 l/kg	1 ft ³ /lb	= 0,062428 m ³ /kg

Força

1 N	= 1 kg·m/s ²	1 lbf	= 32,17405 lb-ft/s
1 kgf	= 9,80665 N		= 4,448222 N
	= 1 kp (kilopond)	1 dina	= 10 ⁻⁵ N

Pressão

1 Pa	= 1 N/m ²	1 atm	= 101.325 Pa
	= 1 kg/m·s ²		= 1,01325 bar
1 bar	= 100.000 Pa		= 760 mm Hg [0 °C]
	= 1,019716 kgf/cm ²		= 29,921 in Hg [0 °C]
	= 14,50376 lbf/in ²		= 10,33256 m H ₂ O
1 kgf/cm ²	= 0,980665 bar		= 33,8995 ft H ₂ O
1 lbf/in ²	= 6.894,757 Pa		= 1,033227 kgf/cm ²
1 torr	= 1 mm Hg [0 °C]		= 14,69594 lbf/in ²
1 kgf/cm ²	= 14,22334 lbf/in ²		

Energia

1 J	= 1 N·m	1 lbf-ft	= 1,355818 J
	= 1 kg·m ² /s ²		= 0,00128507 Btu
	= 0,737562 lbf-ft	1 Btu (Int)	= 1055,056 J
1 cal (Int)	= 4,186768 J		= 778,1693 lbf-ft

Potência

1 W	= 1 J/s	1 lbf-ft/s	= 1,355818 W
	= 1 N·m/s		= 4,62624 Btu/h
1 kW	= 737,562 lbf-ft/s	1 cv (metr)	= 735,499 W
	= 3.412,14 Btu/h	1 hp (UK)	= 745,7 W
1 Btu/s	= 1,055056 kW		= 550 lbf-ft/s
		1 MMBtu	= 0,293222 MMWh
			= 293,222 kWh
		1 MMWh	= 3,41038 MMBtu

Energia Específica

1 kJ/kg	= 0,42992 Btu/lb	1 Btu/lb	= 2,326 kJ/kg
	= 334,55 lbf-ft/lb	1 lbf-ft/lb	= 0,00298907 kJ/kg
			= 0,00128507 Btu/lb

Obs. * 1 l/mol na condição padrão de 1atm e 20 °C.

Condutividade Térmica

$$1 \text{ W/m-K} = 1 \text{ J/s-m-K} \\ = 0,577789 \text{ Btu/h-ft-R}$$

$$1 \text{ Btu/h-ft-R} = 1,730735 \text{ W/m-K}$$

Viscosidade

$$1 \text{ cp} = 0,001 \text{ kg/m-s} \\ = 0,001 \text{ Pa-s} \\ = 6,71969 \times 10^{-4} \text{ lb/ft-s} \\ 1 \text{ Pa-s} = 2,0885416 \text{ lb}_r\text{-s/ft}^2$$

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ = 1,76391 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$$

Capacidade Térmica

$$1 \text{ kJ/kg-K} = 0,238846 \text{ Btu/lb-R}$$

$$1 \text{ Btu/lb-R} = 4,1868 \text{ kJ/kg-K}$$

Fluxo de Calor

$$1 \text{ W/m}^2 = 0,316998 \text{ Btu/h-ft}^2$$

$$1 \text{ Btu/h-ft}^2 = 3,15459 \text{ W/m}^2$$

Coefficiente de Transferência de Calor

$$1 \text{ W/m}^2\text{-K} = 0,17611 \text{ Btu/h-ft}^2\text{-R}$$

$$1 \text{ Btu/h-ft}^2\text{R} = 5,67826 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

Tensão Superficial

$$1 \text{ dina/cm} = 0,001 \text{ N/m}$$

Gravidade Padrão

$$g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$$

$$g_0 = 32,17405 \text{ ft/s}^2$$

Contante Gravitacional Universal

$$G = 6,67259 \times 10^{-11} \text{ N-m}^2/\text{kg}^2$$

Contante Universal dos Gases *

$$R = 8,314462 \text{ kJ/kmol-K} \\ = 1,98589 \text{ kcal/kmol-K} \\ = 0,0820573 \text{ atm-l/mol-K}$$

$$R = 1,98589 \text{ Btu/lbmol-R} \\ = 1545,36 \text{ lbf-ft/lbmol-R}$$

Temperatura

$$1 \text{ K} = 1 \text{ C} = 1/1,8 \text{ R} \\ = 1/1,8 \text{ F} \\ \text{K} = \text{C} + 273,15 \\ = \text{R}/1,8$$

$$1 \text{ R} = 1,8 \text{ K} \\ \text{F} = 1,8 \text{ C} + 32 \\ \text{R} = \text{F} + 459,67$$

E.2 - Derivados de Petróleo – Massa específica e poder calorífico (2021)

Substância	Massa específica	Poder calorífico superior PCS		Poder calorífico inferior PCI	
		MJ/kg	MJ/m ³	MJ/kg	MJ/m ³
Gases - (0 °C, 1 atm)					
Acetileno	1,097	49,9	54,7	—	—
Hidrogênio	0,090	141,7	12,7	120,0	10,8
Metano	0,716	55,5	39,8	50,0	35,8
Gás Natural *	0,777	52,2	40,6	47,1	36,6
Líquidos - (15,7 °C, 1 atm)					
Acetona	787	31,8	25.000	29,6	23.300
Butano	601	49,1	29.500	45,3	27.200
Diesel combustível *	846	45,6	38.600	42,6	36.000
Etano	572	51,9	29.700	47,8	27.300
Etanol (100%)	789	29,7	23.400	26,7	21.100
Gasolina combustível *	737	46,4	34.200	43,4	32.000
Gás óleo (aquecimento) *	840	43,0	36.100	42,8	36.000
Glicerina	1263	19,0	24.000	—	—
Óleo combustível pesado *	980	41,8	41.000	39,0	38.200
Querosene *	821	46,2	37.900	43,0	35.300
Óleo combustível leve *	960	44,0	42.200	40,6	39.000
LGN *	428	55,2	23.600	48,6	20.800
GLP *	537	49,3	26.500	45,5	24.400
Gás óleo marinho *	855	45,9	39.200	42,8	36.600
Metanol	791	23,0	18.200	19,9	15.800
Biodiesel	888	40,2	35.700	37,5	33.300
MTBE - C ₅ H ₁₂ O	743	38,0	28.200	35,1	26.100
Óleos vegetais (biodiesel) *	920	40,5	37.300	37,8	34.800
Cera parafínica *	900	46,0	41.400	41,5	37.400
Pentano	630	48,6	30.600	45,4	28.600
Nafta de petróleo *	725	48,1	34.900	44,9	32.600
Propano	498	50,4	25.100	46,4	23.100
Terebentina	865	44,0	38.100	—	—
Combustíveis sólidos *					
Carvão betuminoso	—	42,6	—	—	—
Carbono	—	32,8	—	—	—
Carvão	—	29,6	—	—	—
Enxofre	—	9,2	—	—	—
Madeira seca	701	16,2	—	—	—

* Combustíveis contendo misturas de compostos distintos podem variar de qualidade dependendo do mercado e estação. Valores indicados referem-se a combustíveis na massa específica mencionada. Variações na qualidade podem induzir variações no poder calorífico entre 5-10%, acima ou abaixo do valor especificado. Combustíveis sólidos têm variações similares na qualidade para classes distintas de combustíveis.

Ref: www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html, maio 2021

E.3 - Equivalências Energéticas

Equivalência de Unidades		
Unidade	Equivalente	F. de Conversão
m ³ GN ¹	kWh	≈ 10,6
m ³ GN	tep	0,00083
m ³ GN	Btu	37600
MM m ³ /d GN ²	MW	160
t GNL	m ³ de GN	1373
t GNL	MMBtu	51,6
bp	MMBtu	7,3
bep	m ³ GN	194
m ³ petróleo (m ³ p)	t petróleo (tp)	0,877
m ³ p	MMBtu	46
m ³ p	m ³ GN	1223
tep ³	m ³ GN	1395
tep ⁴	Mcal	10,160

¹ m³ de GN refere-se a 20 °C e 1 atm

² MM = milhão

³ tep = tonelada equivalente de petróleo

⁴ Equivalente energético sugerido pela Petrobras para o óleo

Ex.: 1 m³ GN = 37600 Btu

Relações entre Unidades		
Unidade	Equivalente	Unidade
m ³	6,28981	barril
barril	0,158987	m ³
Joule	0,238848	cal
cal	4,186768	Joule
BTU	1055,056	Joule
BTU	251,996	cal
bep	1.390	Mcal
tep	10.000	Mcal

E.4 - Prefixos SI

Prefixos SI		
Prefixo	Símbolo	Fator
pico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
micro	μ	10^{-6}
mili	m	10^{-3}
quilo	k	10^3
mega	M	10^6
giga	G	10^9
tera	T	10^{12}
peta	P	10^{15}
exa	E	10^{18}
zeta	Z	10^{21}
yota	Y	10^{24}

Apêndice F

TRANSLIQ - Código para Transientes em Líquidos

Problemas envolvendo escoamentos transientes são de importância em engenharia por causarem pressões elevadas, ruído, cavitação e vibração, muito além dos valores previstos por análises de regime permanente. Muitos problemas gerados por transientes hidráulicos são tão severos que provocam falhas mecânicas catastróficas no sistema.

Golpe de ariete — *waterhammer* em inglês —, é a denominação usual provocada por pressões transientes em líquidos. A origem do nome está associada à idéia de que uma onda de pressão acentuada passando por um duto geraria um som semelhante àquele que ocorre quando o tubo é batido por um martelo. Na realidade transientes não geram som algum. Por motivos históricos, a expressão *golpe de ariete* está associada a transientes em líquidos uma vez que foram observados e modelados originalmente para líquidos. Embora a expressão golpe de ariete ainda seja muito utilizada, é mais adequado descrever o fenômeno como *escoamento transiente*. O processo inclui ondas de pressão acentuadas ocorrendo em fluido em geral, sendo este monofásico, líquido ou gasoso, ou constituído por uma mistura multifásica de gás, líquido e até partículas sólidas.

F.1 Introdução

Incorporamos neste capítulo resultados numéricos de um pequeno software para simulação de transientes provocados pelo escoamento de líquido por um duto simples (solitário) entre dois pontos onde as pressões são especificadas. Entre os extremos podem ser instaladas duas válvulas e uma bomba centrífuga, permitindo um eventual bombeamento entre os dois reservatórios. A Fig. F.1 mostra um esquema do sistema modelado.

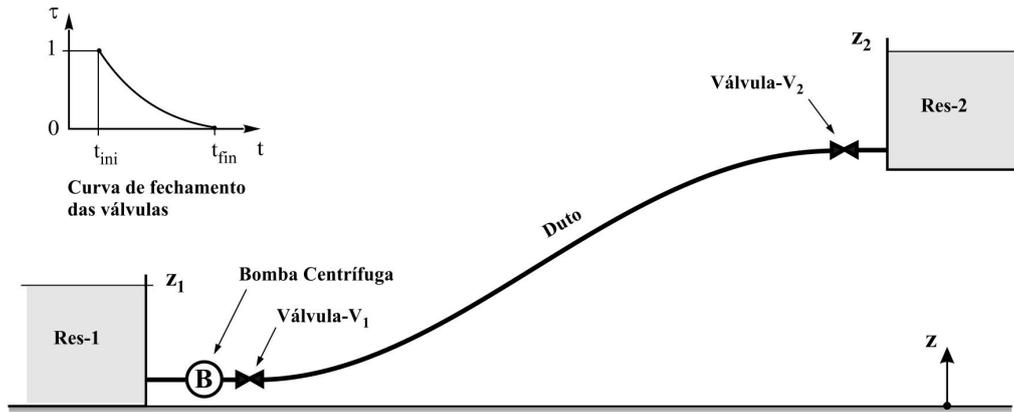


Figura F.1- Sistema de bombeamento entre dois reservatórios: duto, válvulas e bomba centrífuga.

O programa, embora projetado para uma configuração relativamente simples, considera a maior parte das características reais do sistema. Neste sentido os resultados numéricos devem ser considerados bastante precisos e realísticos sobretudo para os primeiros ciclos do processo

F.2 Características do Código

- Dados podem ser especificados nos sistemas de unidades SI ou inglês;
- Flexibilidade na definição dos parâmetros do problema;
- Atrito viscoso definido pelo coeficiente de Darcy-Weisbach;
- Perdas localizadas são consideradas, inclusive aquelas relativas à entrada e saída do duto (pontos de conexão com os reservatórios, com $K_{ent} = 0.2$ e $K_{exit} = 1.0$). Valores de perdas localizadas nas válvulas são definidos pelo usuário (valores-K) em função da abertura, assim como as curvas características de cada uma das válvulas. Valores são fornecidos em forma tabular em função do tempo, o que inclui os instantes de início e término de operação da válvula (valores- τ);
- Dados da bomba centrífuga cobrem todo o campo possível de operação, incluindo escoamento reverso para as três velocidades específicas disponíveis na literatura

(tabelas de Knapp-Donsky¹²). O programa aceita os valores se esses estiverem dentro de 15% dos dados de Knapp-Donsky; caso contrário são rejeitados. Além disso rotores são aceitos com sucção simples ou dupla (altera o valor da velocidade específica).

São aceitas as seguintes quatro operações de bomba: i) *Normal*, ou seja, rotação constante durante a simulação; ii) *Desligamento (trip)*; iii) *Partida (start-up)*; iv) *Desligamento seguido de repartida*. Atritos nos mancais e entre o fluido e rotor são considerados como 3% do torque nominal (*rated*). Isto permite parada progressiva da bomba quando, por exemplo, um desligamento ocorre seguido de fechamento de válvula (interrupção de fluxo);

- O software verifica soluções possíveis para diversas situações antes de iniciar o procedimento numérico; o usuário é alertado para eventuais inconsistências de dados. Por exemplo, bombeamento de um reservatório superior para inferior ou, altura de recalque da bomba insuficiente para o desnível especificado.

F.3 Conceitos Básicos

Para melhor compreender o funcionamento do sistema consideremos alguns conceitos fundamentais utilizados na modelagem de transientes hidráulicos.

F.3.1 Operação de Válvula

O escoamento por válvulas é normalmente modelado utilizando como referência o escoamento por um orifício. Para regime permanente, a vazão volumétrica pelo orifício para uma abertura prefixada A_{v0} é obtida da equação, Eq. (6.3.5),

$$Q_o = (C_d A_v)_o \sqrt{\frac{2 \Delta p_o}{\rho}} \quad (\text{F.1})$$

onde Q_o é a vazão, C_d o coeficiente de descarga (incorporando o coeficiente $\beta = D_v/D$), A_v a área efetiva do orifício, Δp_o a diferença de pressão entre os dois lados do orifício e ρ a massa específica do fluido.

¹² Knapp, R.T., “Complete Characteristics of Centrifugal Pump and Their Use in Prediction of Transient Behavior”, Trans. ASME, vol. 59, pp. 683-689, 1937.

Para uma abertura genérica da válvula A_v

$$Q = C_d A_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (\text{F.2})$$

Definindo o coeficiente de descarga adimensional τ

$$\tau = \frac{C_d A_v}{(C_d A_v)_o} \quad (\text{F.3})$$

a combinação das três últimas equações fornece a vazão para uma abertura qualquer em função da queda de pressão, da abertura e da condição de referência

$$\frac{Q}{Q_o} = \tau \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p_o}} \quad (\text{F.4})$$

Nesta forma a função τ define a curva de operação da válvula referente ao procedimento de fechamento ou abertura, podendo ser expressa por uma equação do tipo

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^\varepsilon \quad (\text{F.5})$$

onde t_c é o tempo total de fechamento e ε um expoente, normalmente com valor entre 1,0 e 2,0. No detalhe da Fig. F.1 está mostrado uma curva típica para τ .

Para um procedimento de abertura ou fechamento, TRANSLIQ utiliza a função tau para o cálculo da vazão conforme definido em (F.5). Para tornar a curva mais geral o usuário especifica os dados em pontos discretos da função; i.e., $\tau_i = \tau(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, I$. Uma interpolação linear é realizada pelo programa para pontos intermediários.

F.3.2 Operação de Bombas Centrífugas

Partidas ou paradas de bombas provocam transientes no circuito hidráulico. Uma vez que a altura de bombeio e a vazão dependem da rotação da máquina variações na rotação têm que ser consideradas na análise transiente. Como observado no Capítulo 5, a altura de pressão e a vazão de uma bomba centrífuga dependem da rotação, Eqs. (5.5) e (5.6). Por

outro lado, variações na rotação dependem do torque e do momento de inércia combinado da bomba, motor e líquido presente no rotor. Portanto, quatro variáveis, H, Q, N e T — altura dinâmica, vazão, rotação e torque, respectivamente —, têm que ser especificadas para se representar matematicamente uma bomba centrífuga. Duas dessas podem ser consideradas independentes, enquanto as outras duas são determinadas pelo modelo da bomba (características ou curvas de desempenho). Assim, por exemplo, conhecidos Q e N (incluindo o sinal), H e T são determinados a partir das curvas características. Para tanto duas hipóteses são admitidas na modelagem:

- As curvas características de regime permanente são válidas no regime transiente. Embora Q e N variem com o tempo seus valores determinam H e T para qualquer instante;
- Relações homólogas prevalecem durante todo o transiente.

Para uma série de máquinas geometricamente similares, §5.2, as curvas de desempenho [F_H vs. F_Q e F_P vs. F_Q na Eq. (5.6)] permanecem iguais se os coeficientes indicados em (5.5) permanecerem constantes. Ou seja, as relações homólogas são representadas por

$$\frac{H_1}{N_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2 D_2^2} \quad \frac{Q_1}{N_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{N_2 D_2^3} \quad \frac{P_1}{N_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{N_2^3 D_2^5} \quad (\text{F.6})$$

Se restringirmos essas condições para uma determinada máquina ($D = \text{constante}$), então

$$\frac{H_1}{N_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2} \quad \frac{Q_1}{N_1} = \frac{Q_2}{N_2} \quad \frac{P_1}{N_1^3} = \frac{P_2}{N_2^3} \quad \frac{T_1}{N_1^2} = \frac{T_2}{N_2^2} \quad (\text{F.7})$$

Admitindo que a eficiência hidráulica permanece constante com o tamanho, da relação para a potência ($P = T \times N$), obtém-se das equações (F.7)

$$\frac{T_1 N_1}{Q_1 H_1} = \frac{T_2 N_2}{Q_2 H_2} \quad (\text{F.8})$$

Combinando as duas últimas equações

$$\frac{T_1}{N_1^2} = \frac{T_2}{N_2^2} \quad \frac{H_1}{Q_1^2} = \frac{H_2}{Q_2^2} \quad \frac{T_1}{Q_1^2} = \frac{T_2}{Q_2^2} \quad (\text{F.9})$$

Se a partir de dados experimentais o gráfico de H/N^2 vs Q/N [Eq.(F.7)] for construído para uma determinada máquina. De acordo com a teoria homóloga, esta será a relação entre a altura e a vazão, para qualquer rotação da máquina. De forma similar obtém-se a curva para o torque, T/N^2 vs Q/N [Eqs.(F.9) e (F.7)].

Portanto, para caracterizar o comportamento dinâmico da bomba centrífuga, é essencial que essas curvas estejam disponíveis; i.e., que sejam fornecidas pelo fabricante (o que, freqüentemente, não ocorre). Para contornar a dificuldade podemos fazer uso de dados disponíveis na literatura. Um desses está relacionado à observação de que essas curvas tendem a ter formas similares para a mesma velocidade específica, definida em (5.9) como $N_s = N_R Q_R^{1/2} / H_R^{3/4}$.

Esses conceitos estão utilizados no programa TRANSLIQ na modelagem de transientes da bomba centrífuga do sistema esquematizado na Fig. F.1. Curvas características para bombas com velocidades específicas para três faixas, conforme dados de Knapp-Donsky¹³, são partes integrantes do software. Portanto, não requerem fornecimento desses por parte do usuário caso N_s esteja dentro de uma dessas faixas. As curvas originais de Knapp-Donsky são especificadas para bombas com velocidades específicas de 24,5, 147,2 e 261,5 no sistema de unidades SI (1276, 7600 e 13500 no sistema inglês). O simulador aceita automaticamente bombas especificadas dentro de intervalos tendo por média os valores acima, com 15% de tolerância, para mais e para menos; ou seja, para as faixas: i) $22 < N_s < 29$; ii) $130 < N_s < 170$ e iii) $225 < N_s < 300$.

¹³ Fluid Transients in Systems, E.B. Wylie, V.L. Streeter, L.Suo, Prentice Hall, 1993.

F.4 Exemplos Numéricos

São apresentados a seguir seis exemplos envolvendo a operação de bomba centrífuga e válvulas, conforme o esquema da Fig. F.1. Para cada exemplo uma breve descrição é feita do problema, seguida dos respectivos dados de entrada. Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos, incluindo variação temporais das pressões (alturas) e vazões nas descargas das válvulas, assim como das alturas de recalque e rotações da bomba. Em dois exemplos as envoltórias definindo os valores máximos e mínimos atingidas pelas pressões ao longo do duto são igualmente mostradas; uma dado útil para o dimensionamento estrutural do duto.

Detalhes dos arquivos de entrada do programa para cada uma das seis rodadas são mostrados no final do Apêndice. Dentre esses, informações sobre as características da bomba como: valores para as curvas *tau* de operação das válvulas, tempos de simulação etc. Com pouco treino o leitor não terá maiores dificuldades em compreender o significado dos parâmetros de entrada, sendo capaz de executar o programa para outras situações que desejar.

Ressalte-se que os resultados do programa são gerados em arquivos no formato ASCII. Os gráficos são obtidos após serem lidos por um programa apropriado, como Excel.

Exemplo-1 — Duto Longo – Sem Bomba

O exemplo considera o escoamento sem bomba por um duto de 600mm de diâmetro interno entre dois reservatórios distantes 100 km, sendo os níveis das superfícies líquidas de 380m e 170m. Uma válvula está instalada logo na entrada do reservatório da direita. A válvula encontra-se inicialmente totalmente aberta, iniciando uma operação de fechamento total em $t= 10s$ e concluindo em $t= 70s$. O coeficiente de atrito de Darcy é admitido ser 0,022 e a velocidade de propagação da onda acústica no sistema igual a 1000 m/s.

A Fig. F.2 mostra os resultados para a altura e vazão na válvula em função do tempo. Mostra ainda as duas envoltórias correspondendo aos valores mínimos e máximos para as alturas (pressões) ao longo do duto. Apesar da válvula ser fechada num tempo relativamente longo (1 minuto), a pressão máxima chega a 445 m na entrada do reservatório, cerca de 20% acima da pressão estática normal.

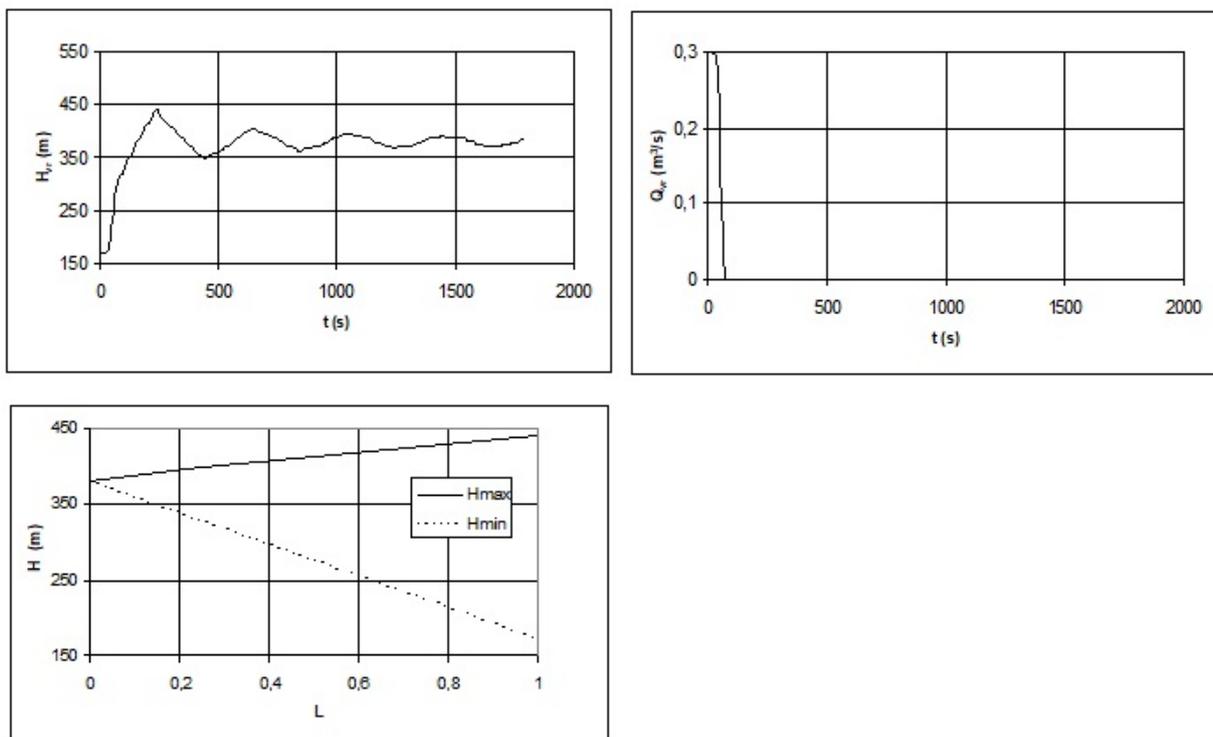


Figura F.2- Pressão e vazão na válvula na entrada do reservatório da direita e envoltórias para as pressões ao longo de duto com 100 km de extensão.

Exemplo-2 — Duto Curto – Sem Bomba

Exemplo similar ao anterior, considera o escoamento sem bomba por um duto de 500mm de diâmetro interno entre dois reservatórios distantes 3 km, sendo os níveis das superfícies líquidas de 380m e 170m. Uma válvula está instalada logo na entrada do reservatório da direita. A válvula encontra-se inicialmente totalmente aberta, iniciando uma operação de fechamento total em $t=2$ s e concluindo em $t=5$ s. O coeficiente de atrito de Darcy é admitido ser 0,022 e a velocidade de propagação da onda acústica no sistema igual a 1000 m/s.

A Fig. F.3 mostra os resultados para a altura e vazão na válvula em função do tempo. Mostra ainda as duas envoltórias correspondendo aos valores mínimos e máximos para as alturas (pressões) ao longo do duto. Aqui a operação de fechamento da válvula é relativamente rápida (3s); como conseqüência, a pressão máxima chega a 900 m na entrada do reservatório; ou seja, 145% acima da pressão estática normal. Observemos também que as oscilações persistem por um período relativamente longo.

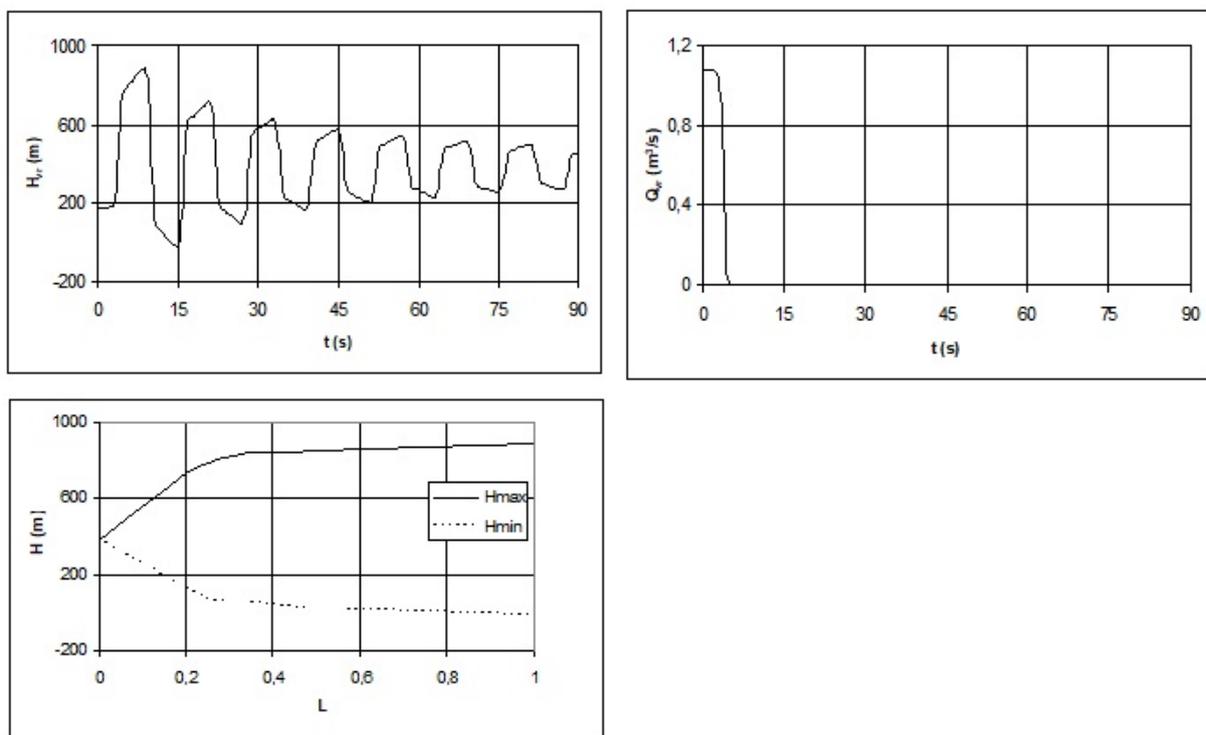


Figura F.3- Pressão e vazão na válvula na entrada do reservatório da direita e envoltórias para as pressões ao longo de duto com 3 km de extensão.

Exemplo-3 — Duto Curto – Bomba Operando com Rotação Constante

Neste caso temos um sistema de bombeio entre dois reservatórios por um duto de 400 mm de diâmetro interno e comprimento de 1 km, sendo os níveis das superfícies líquidas de 170 m e 260 m. Válvulas estão instaladas junto aos dois reservatórios, ambas inicialmente abertas. A válvula na entrada do reservatório superior inicia a operação de fechamento em $t = 2$ s, concluindo em $t = 10$ s, enquanto a válvula a jusante da bomba inicia o fechamento em $t = 101$ s, concluindo em $t = 113$ s. O coeficiente de atrito de Darcy é admitido ser 0,022 e a velocidade de propagação da onda acústica no sistema igual a 1000 m/s. A bomba é de rotor duplo, $NS = 25$, com valores nominais para altura de recalque de 105 m, vazão de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ e rotação de 710 rpm.

A Fig. F.4 mostra os resultados para a altura e vazão nas duas válvulas em função do tempo. A operação de fechamento das válvulas é relativamente lenta (8s e 12s), a pressão máxima chega a 390 m na entrada do reservatório, cerca de 28% acima da pressão final de 305 (bomba operando com 135 m de recalque para vazão nula). A curva da resposta do recalque da bomba também é mostrada.

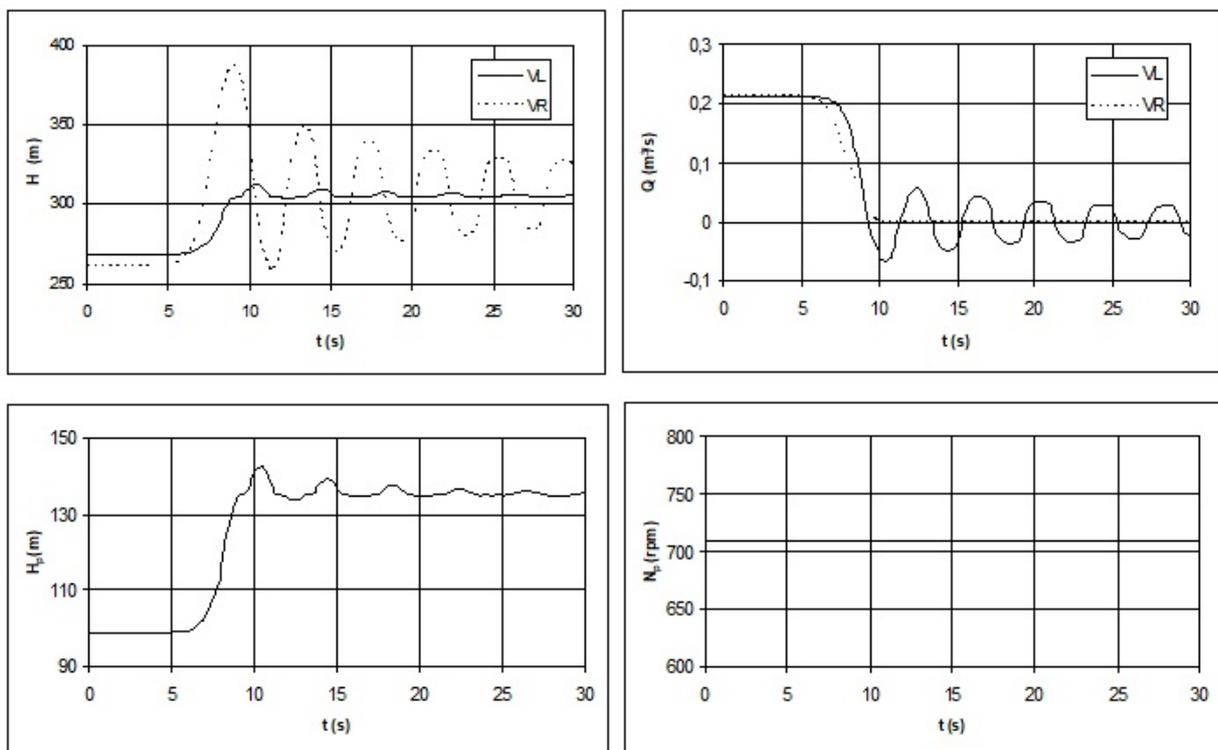


Figura F.4- Pressão e vazão nas válvulas junto aos reservatórios e resposta da altura de recalque e rotação da bomba ao longo de duto com 1 km de extensão.

Exemplo-4 — Partida de Bomba

O exemplo considera o transiente induzido pela partida de uma bomba centrífuga e a abertura e fechamento de duas válvulas, num sistema similar ao caso anterior. Assim temos uma bomba entre dois reservatórios interligados por um duto de 400 mm de diâmetro interno e comprimento de 3,5 km, sendo os níveis das superfícies líquidas de 170 m e 280 m. Válvulas estão instaladas junto aos dois reservatórios. A válvula a jusante da bomba (instalada próxima ao reservatório inferior) está inicialmente fechada, iniciando a operação de abertura em $t=4s$ e concluindo em $t=10s$. Enquanto isso, a bomba inicia a partida em $t=2s$, atingindo a rotação nominal em $t=6s$. A válvula superior inicia a operação de fechamento em $t=70s$, encerrando em $t=80s$. O coeficiente de atrito de Darcy é admitido ser 0,022 e a velocidade de propagação da onda acústica no sistema igual a 1000 m/s. A bomba é de rotor duplo, $NS=25$, com valores nominais para altura de recalque de 105 m, vazão de $0,20\text{ m}^3/\text{s}$ e rotação de 710 rpm.

A Fig. F.5 mostra os resultados para a altura e vazão nas duas válvulas em função do tempo. A operação das válvulas é relativamente lenta (6s e 10s), a pressão máxima chega a 310 m na válvula da esquerda, cerca de 6% acima da pressão final de 292 m.

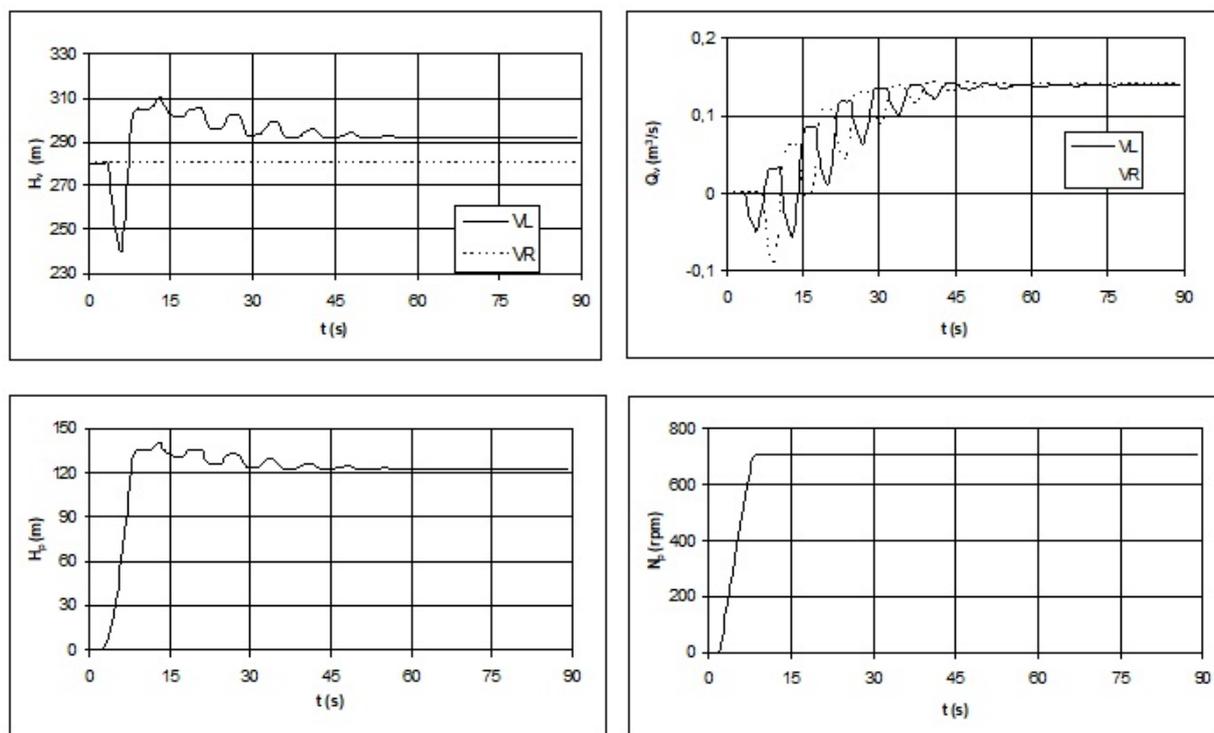


Figura F.5 Pressão e vazão nas válvulas junto aos reservatórios e resposta da altura de recalque e rotação da bomba ao longo de duto com 3,5 km de extensão.

Exemplo-5 — Desligamento de Bomba

O exemplo considera o transiente induzido pelo desligamento de uma bomba centrífuga, seguido de fechamento de duas válvulas, num sistema idêntico ao anterior. Ou seja, uma bomba entre dois reservatórios interligados por um duto de 400 mm de diâmetro interno e comprimento de 3,5 km, sendo os níveis das superfícies líquidas de 170 m e 280 m. Válvulas estão instaladas junto aos dois reservatórios. A válvula a jusante da bomba está inicialmente aberta, iniciando a operação de fechamento em $t=12s$, concluindo em $t=18s$; enquanto a válvula superior inicia a operação de fechamento em $t=30s$, encerrando em $t=45s$, permanecendo ligeiramente aberta a partir de então ($\tau=0,04$). A bomba é desligada em $t=2s$. O coeficiente de atrito de Darcy é admitido ser 0,022 e a velocidade de propagação da onda acústica no sistema igual a 1000 m/s. A bomba é de rotor duplo, $NS=25$, com valores nominais para altura de recalque de 105 m, vazão de $0,20\text{ m}^3/s$ e rotação de 710 rpm.

A Fig. F.6 mostra os resultados para a altura e vazão nas duas válvulas em função do tempo. A operação das válvulas é relativamente lenta (6s e 15s), a pressão máxima chega a 440 m na válvula da esquerda, cerca de 57% acima da pressão final de 280 m.

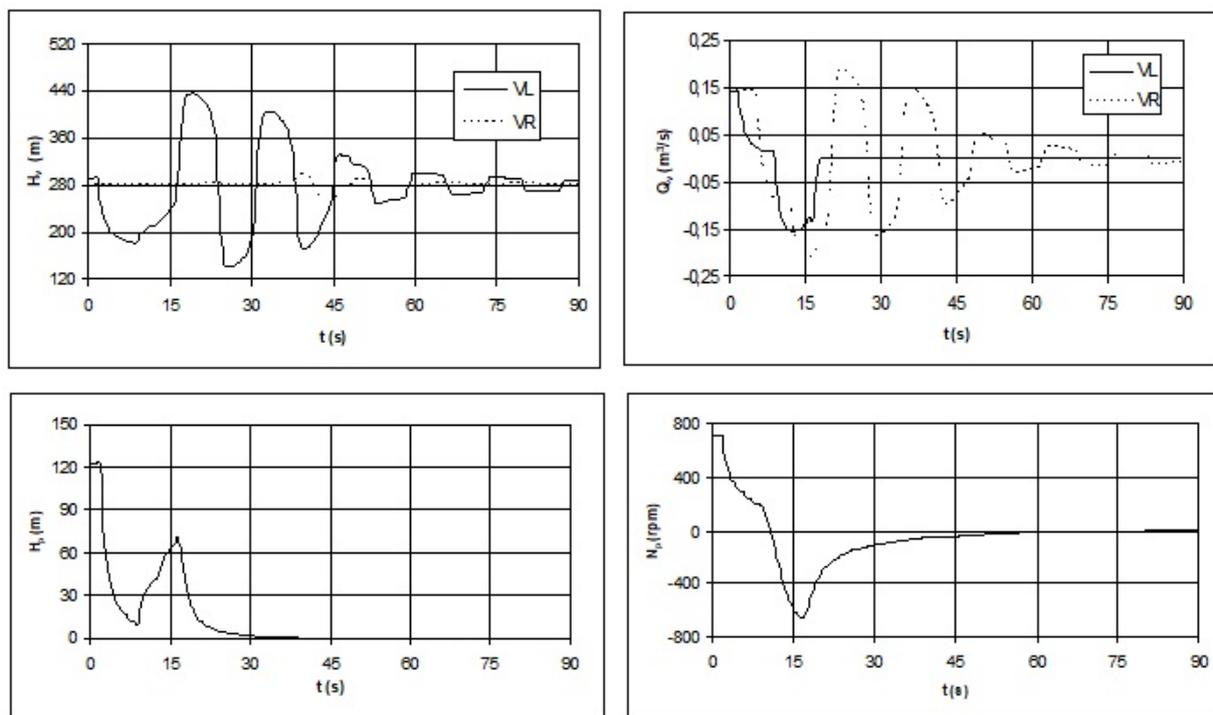


Figura F.6 Pressão e vazão nas válvulas junto aos reservatórios e resposta da altura de recalque e rotação da bomba ao longo de duto com 3,5 km de extensão.

Exemplo-6 — Desligamento seguido de Religamento de Bomba

É analisado o transiente induzido por desligamento, seguido de religamento da bomba centrífuga e de fechamento das duas válvulas, num sistema idêntico aos Exemplos 4 e 5. Ou seja, uma bomba entre dois reservatórios interligados por um duto de 400 mm de diâmetro interno e comprimento de 3,5 km, sendo os níveis das superfícies líquidas de 170 m e 280 m. A válvula a jusante da bomba está inicialmente aberta, iniciando a operação de fechamento em $t=12\text{s}$, concluindo em $t=18\text{s}$; enquanto a válvula superior inicia a operação de fechamento em $t=30\text{s}$, encerrando em $t=45\text{s}$, permanecendo ligeiramente aberta a partir de então. A bomba é desligada em $t=2\text{s}$, religada em $t=8\text{s}$, atingindo a rotação nominal aos 14s. O coeficiente de atrito de Darcy é admitido ser 0,022 e a velocidade de propagação da onda acústica no sistema igual a 1000 m/s. A bomba é de rotor duplo, $NS=25$, com valores nominais para altura de recalque de 105 m, vazão de $0,20\text{ m}^3/\text{s}$ e rotação de 710 rpm.

A Fig. F.7 mostra os resultados para a altura e vazão nas duas válvulas em função do tempo. A operação das válvulas é relativamente lenta (6s e 15s), a pressão máxima chega a 355 m na válvula da esquerda, cerca de 27% acima da pressão final de 280 m.

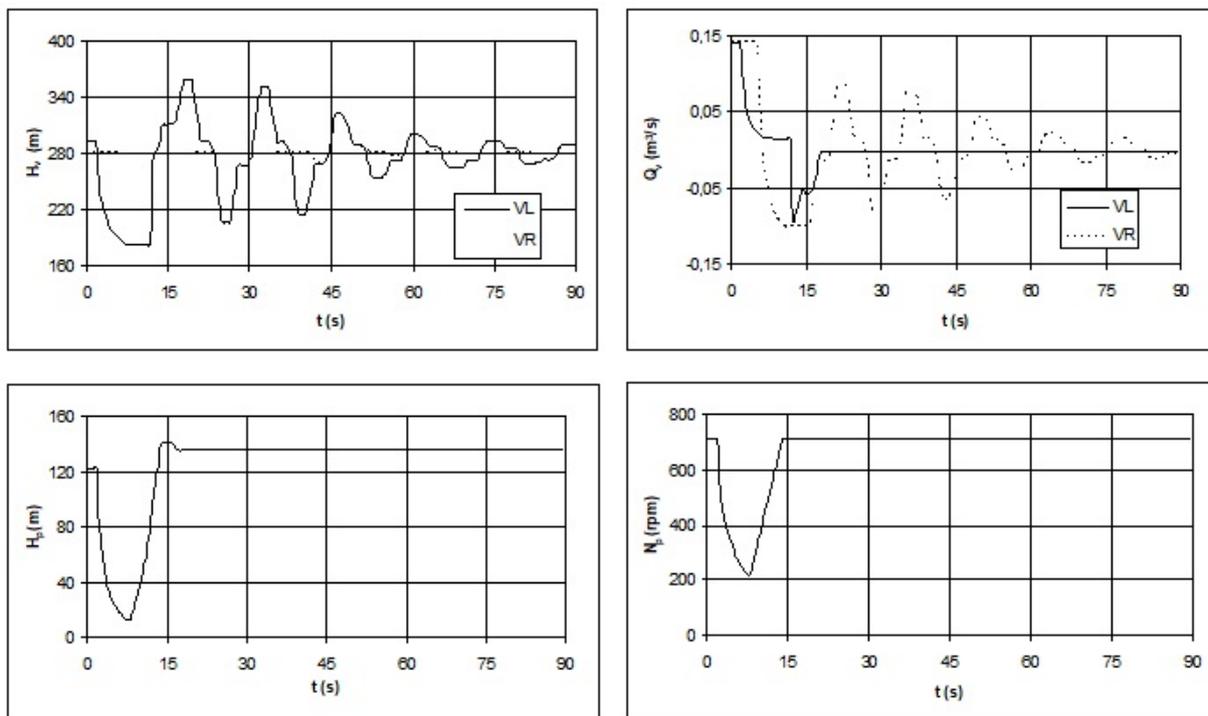


Figura F.7 Pressão e vazão nas válvulas junto aos reservatórios e resposta da altura de recalque e rotação da bomba ao longo de duto com 3,5 km de extensão.

F.5 Arquivos de Entrada dos Exemplos

Exemplo-1 — Duto Longo – Sem Bomba

```
DATA_PROJETO
Título..... long-pipeline analysis
Descricao (opcional, ate 9 linhas).
DATA_UNIDADES
Sistema de unidades.....(SI/EN):      si
DATA_LOGICA
Valvula esquerda instalada?..(S/N):    fals
Valvula direita instalada?..(S/N):    true
Bomba instalada?.....(S/N):          fals
Tipo de rotor da bomba.....(S/D):      dblr
Condicao de operacao da bomba..(-):    trip
DATA_GERAL
Comprimento do duto.....(L):          100000.
Diametro do duto.....(L):             0.60
Elev. reservatorio esquerda... (L):    380.
Elev. reservatorio direita.... (L):    170.
Velocidade da onda acustica..(L/s):    1000.
Fator de atrito de Darcy.....(-):     0.022
No. de segmentos no duto.....(-):     32
No. de TS para impressao.....(-):     4
Tempo maximo de simulacao.....(s):    1800.
DATA_BOMBA
Velocidade especifica (NS)....(-):    25.
Rotacao normal.....(RPM):            710.
Altura normal (recalque).....(L):     105.
Vazao normal.....(L**3/s):           0.2
Torque normal.....(F*L):             50.
GR2.....(F*L**2):                   12.
Instante que liga.....(s):            0.0
Instante que desliga.....(s):         2.0
Tempo para atingir rot.normal..(s):    1.0
DATA_VALVULA_ESQUERDA
Inicio de operacao.....(s):           12.
Final de operacao.....(s):            18.
Perda localizada na valvula...(-):     1.0
Tau.....(-):                         1.0
Tau.....(-):                         0.8
Tau.....(-):                         0.6
Tau.....(-):                         0.4
Tau.....(-):                         0.2
Tau.....(-):                         0.1
Tau.....(-):                         0.05
Tau.....(-):                         0.02
Tau.....(-):                         0.005
Tau.....(-):                         0.
DATA_VALVULA_DIREITA
Inicio de operacao.....(s):           10.0
Final de operacao.....(s):            70.0
Perda localizada na valvula...(-):     2.0
Tau.....(-):                         1.0
Tau.....(-):                         0.8
Tau.....(-):                         0.6
Tau.....(-):                         0.4
Tau.....(-):                         0.2
Tau.....(-):                         0.1
Tau.....(-):                         0.05
Tau.....(-):                         0.01
Tau.....(-):                         0.005
Tau.....(-):                         0.0
DATA_FIM
```

Exemplo-2 — Duto Curto – Sem Bomba

```

DATA_PROJETO
Título..... **** short pipeline analysis ****
Descricao (opcional, ate 9 linhas).
DATA_UNIDADES
Sistema de unidades.....(SI/EN):      si
DATA_LOGICA
Valvula esquerda instalada?..(S/N):    fals
Valvula direita instalada?... (S/N):    true
Bomba instalada?.....(S/N):           fals
Tipo de rotor da bomba.....(S/D):      dblr
Condicao de operacao da bomba..(-):     trip
DATA_GERAL
Comprimento do duto.....(L):           3000.
Diametro do duto.....(L):              0.50
Elev. reservatorio esquerda... (L):     380.
Elev. reservatorio direita.... (L):     170.
Velocidade da onda acustica..(L/s):     1000.
Fator de atrito de Darcy.....(-):       0.022
No. de segmentos no duto.....(-):       12
No. de TS para impressao.....(-):       2
Tempo maximo de simulacao.....(s):      90.
DATA_BOMBA
Velocidade especifica (NS)....(-):      25.
Rotacao normal.....(RPM):              710.
Altura normal (recalque).....(L):       105.
Vazao normal.....(L**3/s):             0.2
Torque normal.....(F*L):               50.
GR2.....(F*L**2):                     12.
Instante que liga.....(s):              0.0
Instante que desliga.....(s):           2.0
Tempo para atingir rot.normal..(s):     1.0
DATA_VALVULA_ESQUERDA
Inicio de operacao.....(s):             12.
Final de operacao.....(s):             18.
Perda localizada na valvula...(-):      1.0
Tau.....(-):                          1.0
Tau.....(-):                          0.8
Tau.....(-):                          0.6
Tau.....(-):                          0.4
Tau.....(-):                          0.2
Tau.....(-):                          0.1
Tau.....(-):                          0.05
Tau.....(-):                          0.02
Tau.....(-):                          0.005
Tau.....(-):                          0.
DATA_VALVULA_DIREITA
Inicio de operacao.....(s):             2.0
Final de operacao.....(s):             5.0
Perda localizada na valvula...(-):      2.0
Tau.....(-):                          1.0
Tau.....(-):                          0.8
Tau.....(-):                          0.6
Tau.....(-):                          0.4
Tau.....(-):                          0.2
Tau.....(-):                          0.1
Tau.....(-):                          0.05
Tau.....(-):                          0.01
Tau.....(-):                          0.005
Tau.....(-):                          0.0
DATA_FIM

```

Exemplo-3 — Duto Curto – Bomba Operando com Rotação Constante

```

DATA_PROJETO
Título..... **** pump running at constant speed ****
Descricao (opcional, ate 9 linhas).
DATA_UNIDADES
Sistema de unidades.....(SI/EN):      si
DATA_LOGICA
Valvula esquerda instalada?..(S/N):    true
Valvula direita instalada?... (S/N):    true
Bomba instalada?.....(S/N):           true
Tipo de rotor da bomba.....(S/D):      dblr
Condicao de operacao da bomba..(-):     norm
DATA_GERAL
Comprimento do duto.....(L):           1000.
Diametro do duto.....(L):              0.40
Elev. reservatorio esquerda....(L):     170.
Elev. reservatorio direita....(L):     260.
Velocidade da onda acustica..(L/s):    1000.
Fator de atrito de Darcy.....(-):      0.022
No. de segmentos no duto.....(-):      8
No. de TS para impressao.....(-):      2
Tempo maximo de simulacao.....(s):     30.
DATA_BOMBA
Velocidade especifica (NS)....(-):     25.
Rotacao normal.....(RPM):              710.
Altura normal (recalque).....(L):      105.
Vazao normal.....(L**3/s):             0.2
Torque normal.....(F*L):               50.
GR2.....(F*L**2):                      12.
Instante que liga.....(s):              0.0
Instante que desliga.....(s):           2.0
Tempo para atingir rot.normal..(s):     8.0
DATA_VALVULA_ESQUERDA
Inicio de operacao.....(s):            101.
Final de operacao.....(s):             113.
Perda localizada na valvula....(-):     1.0
Tau.....(-):                           1.0
Tau.....(-):                           0.8
Tau.....(-):                           0.6
Tau.....(-):                           0.4
Tau.....(-):                           0.2
Tau.....(-):                           0.1
Tau.....(-):                           0.04
Tau.....(-):                           0.015
Tau.....(-):                           0.005
Tau.....(-):                           0.
DATA_VALVULA_DIREITA
Inicio de operacao.....(s):            2.0
Final de operacao.....(s):            10.0
Perda localizada na valvula....(-):     1.0
Tau.....(-):                           1.0
Tau.....(-):                           0.8
Tau.....(-):                           0.6
Tau.....(-):                           0.4
Tau.....(-):                           0.2
Tau.....(-):                           0.1
Tau.....(-):                           0.04
Tau.....(-):                           0.015
Tau.....(-):                           0.005
Tau.....(-):                           0.0
DATA_FIM

```

Exemplo-4 — Partida de Bomba

```

DATA_PROJETO
Título..... **** pump start up analysis ****
Descricao (opcional, ate 9 linhas).
DATA_UNIDADES
Sistema de unidades.....(SI/EN):      si
DATA_LOGICA
Valvula esquerda instalada?..(S/N):    true
Valvula direita instalada?... (S/N):    true
Bomba instalada?.....(S/N):           true
Tipo de rotor da bomba.....(S/D):      dblr
Condicao de operacao da bomba..(-):    strt
DATA_GERAL
Comprimento do duto.....(L):           3500.
Diametro do duto.....(L):              0.40
Elev. reservatorio esquerda....(L):     170.
Elev. reservatorio direita....(L):     280.
Velocidade da onda acustica..(L/s):    1000.
Fator de atrito de Darcy.....(-):      0.022
No. de segmentos no duto.....(-):      8
No. de TS para impressao.....(-):      2
Tempo maximo de simulacao.....(s):     90.
DATA_BOMBA
Velocidade especifica (NS)....(-):     25.
Rotacao normal.....(RPM):              710.
Altura normal (recalque).....(L):      105.
Vazao normal.....(L**3/s):             0.2
Torque normal.....(F*L):               50.
GR2.....(F*L**2):                      12.
Instante que liga.....(s):              2.0
Instante que desliga.....(s):           10.0
Tempo para atingir rot.normal..(s):     6.0
DATA_VALVULA_ESQUERDA
Inicio de operacao.....(s):             4.
Final de operacao.....(s):              10.
Perda localizada na valvula....(-):     1.0
Tau.....(-):                           0.
Tau.....(-):                           0.01
Tau.....(-):                           0.015
Tau.....(-):                           0.04
Tau.....(-):                           0.1
Tau.....(-):                           0.2
Tau.....(-):                           0.4
Tau.....(-):                           0.6
Tau.....(-):                           0.9
Tau.....(-):                           1.0
DATA_VALVULA_DIREITA
Inicio de operacao.....(s):             200.
Final de operacao.....(s):              300.0
Perda localizada na valvula....(-):     1.0
Tau.....(-):                           1.0
Tau.....(-):                           0.8
Tau.....(-):                           0.6
Tau.....(-):                           0.4
Tau.....(-):                           0.2
Tau.....(-):                           0.1
Tau.....(-):                           0.04
Tau.....(-):                           0.015
Tau.....(-):                           0.005
Tau.....(-):                           0.0
DATA_FIM

```

Exemplo-5 — Desligamento de Bomba

```

DATA_PROJETO
Titulo..... pump trip analysis
Descricao (opcional, ate 9 linhas).
DATA_UNIDADES
Sistema de unidades.....(SI/EN): si
DATA_LOGICA
Valvula esquerda instalada?..(S/N): true
Valvula direita instalada?... (S/N): true
Bomba instalada?.....(S/N): true
Tipo de rotor da bomba.....(S/D): dblr
Condicao de operacao da bomba..(-): trip
DATA_GERAL
Comprimento do duto.....(L): 3500.
Diametro do duto.....(L): 0.40
Elev. reservatorio esquerda....(L): 170.
Elev. reservatorio direita....(L): 280.
Velocidade da onda acustica..(L/s): 1000.
Fator de atrito de Darcy.....(-): 0.022
No. de segmentos no duto.....(-): 12
No. de TS para impressao.....(-): 2
Tempo maximo de simulacao.....(s): 90.
DATA_BOMBA
Velocidade especifica (NS).....(-): 25.
Rotacao normal.....(RPM): 710.
Altura normal (recalque).....(L): 105.
Vazao normal.....(L**3/s): 0.2
Torque normal.....(F*L): 50.
GR2.....(F*L**2): 12.
Instante que liga.....(s): 0.0
Instante que desliga.....(s): 2.0
Tempo para atingir rot.normal..(s): 1.0
DATA_VALVULA_ESQUERDA
Inicio de operacao.....(s): 12.
Final de operacao.....(s): 18.
Perda localizada na valvula....(-): 1.0
Tau.....(-): 1.0
Tau.....(-): 0.8
Tau.....(-): 0.6
Tau.....(-): 0.4
Tau.....(-): 0.2
Tau.....(-): 0.1
Tau.....(-): 0.05
Tau.....(-): 0.02
Tau.....(-): 0.005
Tau.....(-): 0.
DATA_VALVULA_DIREITA
Inicio de operacao.....(s): 30.0
Final de operacao.....(s): 45.0
Perda localizada na valvula....(-): 2.0
Tau.....(-): 1.0
Tau.....(-): 0.8
Tau.....(-): 0.6
Tau.....(-): 0.4
Tau.....(-): 0.2
Tau.....(-): 0.1
Tau.....(-): 0.05
Tau.....(-): 0.05
Tau.....(-): 0.05
Tau.....(-): 0.04
DATA_FIM

```

Exemplo-6 — Desligamento seguido de Religamento de Bomba

```

DATA_PROJETO
Titulo..... **** pump trip/startup analysis ****
Descricao (opcional, ate 9 linhas).
DATA_UNIDADES
Sistema de unidades.....(SI/EN):      si
DATA_LOGICA
Valvula esquerda instalada?..(S/N):    true
Valvula direita instalada?..(S/N):    true
Bomba instalada?.....(S/N):          true
Tipo de rotor da bomba.....(S/D):     dblr
Condicao de operacao da bomba..(-):    trst
DATA_GERAL
Comprimento do duto.....(L):          3500.
Diametro do duto.....(L):             0.40
Elev. reservatorio esquerda....(L):    170.
Elev. reservatorio direita....(L):    280.
Velocidade da onda acustica..(L/s):    1000.
Fator de atrito de Darcy.....(-):     0.022
No. de segmentos no duto.....(-):     12
No. de TS para impressao.....(-):     2
Tempo maximo de simulacao.....(s):    90.
DATA_BOMBA
Velocidade especifica (NS)....(-):     25.
Rotacao normal.....(RPM):             710.
Altura normal (recalque).....(L):     105.
Vazao normal.....(L**3/s):           0.2
Torque normal.....(F*L):              50.
GR2.....(F*L**2):                    12.
Instante que liga.....(s):            8.0
Instante que desliga.....(s):         2.0
Tempo para atingir rot.normal..(s):    6.0
DATA_VALVULA_ESQUERDA
Inicio de operacao.....(s):           12.
Final de operacao.....(s):            18.
Perda localizada na valvula....(-):    1.0
Tau.....(-):                          1.0
Tau.....(-):                          0.8
Tau.....(-):                          0.6
Tau.....(-):                          0.4
Tau.....(-):                          0.2
Tau.....(-):                          0.1
Tau.....(-):                          0.05
Tau.....(-):                          0.02
Tau.....(-):                          0.005
Tau.....(-):                          0.
DATA_VALVULA_DIREITA
Inicio de operacao.....(s):           30.0
Final de operacao.....(s):            45.0
Perda localizada na valvula....(-):    2.0
Tau.....(-):                          1.0
Tau.....(-):                          0.8
Tau.....(-):                          0.6
Tau.....(-):                          0.4
Tau.....(-):                          0.2
Tau.....(-):                          0.1
Tau.....(-):                          0.05
Tau.....(-):                          0.05
Tau.....(-):                          0.05
Tau.....(-):                          0.04
DATA_FIM

```

Apêndice G

Transientes em Gasodutos

Neste capítulo consideramos algumas situações de escoamento transiente em linhas transportando gás natural em longas distâncias. A análise transiente para escoamento de líquido ou de gás é bastante complexa, requerendo para compreensão certo conhecimento da teoria de equações diferenciais e soluções numéricas. Resultados com algum grau de confiabilidade só podem ser obtidos por simulações numéricas de softwares especializados. Contudo, são aqui analisados alguns cenários típicos de escoamento transiente em gasodutos, tendo por objetivo determinar o comportamento da variação da pressão ao longo do duto devido a perturbações causadas por condições transientes como o fechamento de válvula ou o desligamento (*shut down*) de uma estação de compressão. Se tais condições provocarem um aumento de pressão em algum ponto do sistema que exceda a pressão máxima de operação, PMO, medidas terão que ser tomadas para contornar a situação.

G.1 Equações de Conservação

O escoamento dependente do tempo para modelo unidimensional em dutos pode ser representado por três equações representando a conservação de massa, quantidade de movimento e de energia, conforme detalhado no parágrafo §3.4 do Capítulo 3. As três equações são aqui reproduzidas

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s}(\rho v A) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s}(\rho v^2 A) + \frac{\partial p}{\partial s} + \rho g \sin \theta + \frac{1}{2} \frac{f}{D} \rho |v| v &= 0 \quad (G.1) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \hat{u}) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s}[\rho v A (h + \frac{v^2}{2} + gz)] &= \frac{Q_w}{A}\end{aligned}$$

A é a área da seção transversal do duto, D o diâmetro interno, f o fator de atrito, g a aceleração local da gravidade, θ o ângulo do duto com a horizontal, \hat{u} e h a energia

interna e entalpia específica do gás, ρ a massa específica do gás, p a pressão, v a velocidade média na seção transversal, Q_w a transferência de calor entre o fluido e o exterior, t o tempo e s a distância ao longo da linha de centro do duto.

Condições de contorno e de valor inicial (especificado ao longo do duto em $t=0$) permitem a solução numérica simultânea das três equações para calcular os campos de velocidade $v(s,t)$, pressão $p(s,t)$ e temperatura $T(s,t)$. Note que, a cada instante t , esses três parâmetros são calculados em qualquer posição s .

G.2 Escoamento Transiente¹⁴

No Capítulo 8, analisamos dutos que operam sob regime permanente. Ou seja, para qualquer ponto ao longo da linha a vazão de massa é constante, mantendo os perfis de pressão e temperatura invariáveis com o tempo. Se esses parâmetros forem medidos num ponto particular em dado instante, esses valores permanecem constantes para qualquer outro tempo. Todavia, a vazão e a pressão tendem a variar com o tempo como, por exemplo, devido a mudanças nas condições de entrega ou de demanda. Além disso, condições externas podem provocar mudanças na temperatura, induzindo variações no desempenho de compressores, resultando em variações na pressão e vazão de descarga do equipamento. Outra causa comum para escoamento não-permanente tem a ver com a operação de válvulas, e o desligamento e religamento de uma estação de compressão. Portanto, resultados baseados em simulações para regime permanente devem merecer cuidado e atenção especial, sobretudo para gasodutos muito longos, onde a frequência dessas ocorrências é maior.

G.3 Transiente Devido a Fechamento de Válvula

Consideremos um sistema simples constituído de uma estação de compressão, um duto e uma válvula no final da linha, esquematizado na Fig. G.1.

Admitamos que o duto venha operando em regime permanente por um longo período quando a válvula é subitamente fechada devido a um problema técnico. Imediatamente a pressão na válvula, e pontos a montante, começa a aumentar, conforme destacado pelas linhas tracejadas na figura. Devido à compressibilidade do gás, inicialmente o compressor não percebe o aumento de pressão. Isto provoca o

¹⁴ Este parágrafo e o seguinte foram baseados em “Gas Pipeline Hydraulics” de Menon, E.S., Cap. 8, Taylor & Francis Group, 2005.

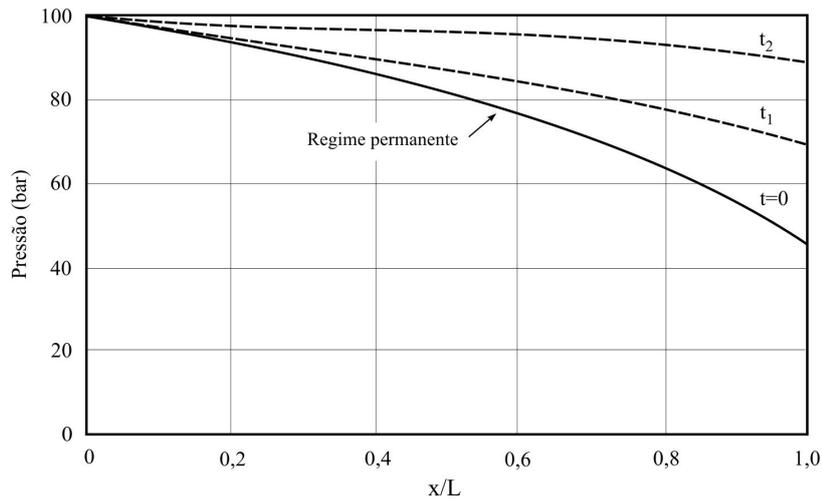


Figura G.1 Transiente de pressão devido a fechamento de válvula.

empacotamento na descarga. Ondas de pressão prosseguirão na direção a montante até chegar à estação de compressão, provocando um aumento de pressão no compressor. Se a pressão chegar ao *shut down setting* o compressor será desligado até sua parada. O gás interrompido continuará com ondas de pressão trafegando de montante a jusante e de volta para montante à velocidade de propagação acústica. Eventualmente a pressão estabilizará devido ao atrito e à perda de inércia pela gradual redução na velocidade do gás. Esta situação pode ser melhor visualizada analisando o comportamento das curvas de desempenho do compressor e do sistema na figura G.2.

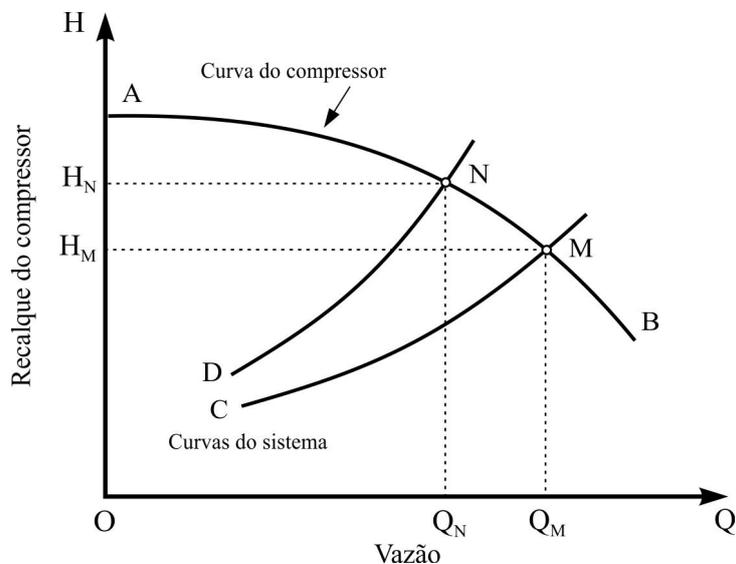


Figura G.2 Curvas de desempenho do sistema e do compressor (variando com o tempo).

A curva para regime permanente para o compressor é representada por AB,

enquanto a curva do sistema por CM. O ponto de operação é M onde a altura de recalque do compressor se iguala à do duto na vazão Q_M . Após o fechamento da válvula a curva do duto DN se desloca para a esquerda indicando uma redução de vazão devido ao aumento na resistência do sistema provocado pelo fechamento da válvula.

G.4 Transiente Devido ao Desligamento de Compressor

Consideremos agora o desligamento de uma estação de compressão após um longo período de operação em regime permanente. Mesmo não ocorrendo alimentação de energia na entrada do sistema, gás continuará a escoar pelo ponto extremo a jusante devido à massa acumulada no duto. A pressão continuará a cair ao longo da linha até estabilizar após algum tempo, quando a válvula no extremo de saída já estiver completamente fechada em resposta à interrupção na estação de compressão.

Outro cenário de desligamento interessante que provoca transientes de pressão está ilustrado na Fig. G.3. Neste caso a linha tem duas estações de compressão, em A e B. O gradiente de pressão para o regime permanente está indicado pela linha cheia. Se a estação intermediária (B) desligar, a primeira (A) continuará bombeando. Neste caso admite-se que o gás contornará a segunda estação através de um *bypass* e o gradiente hidráulico atingirá a configuração mostrada pela linha tracejada. Todavia, antes do regime permanente ser atingido com uma única estação em operação (A) transientes acontecerão

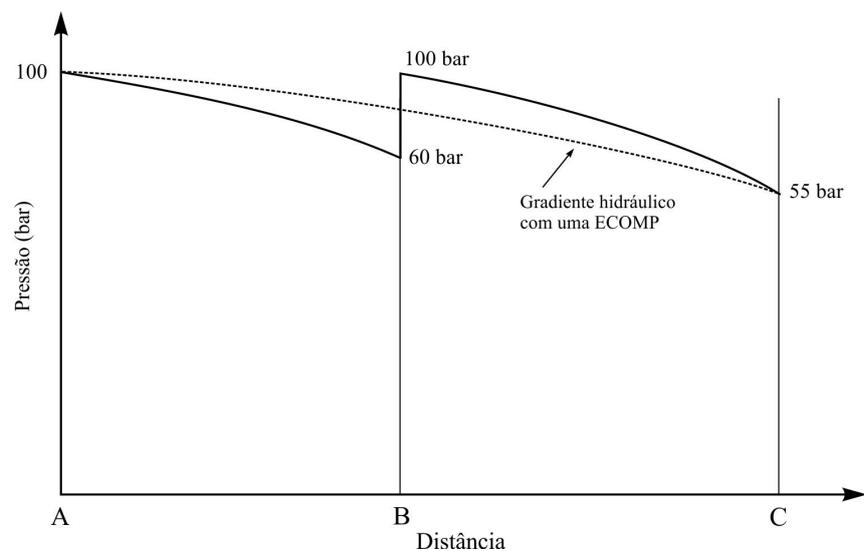


Figura G.3 Transiente devido ao desligamento de uma estação de compressão.

a partir do ponto de desligamento da estação intermediária. Suponhamos então que a vazão inicial com ambas estações em funcionamento seja Q_M . A Fig. 4 mostra que a curva inicial do sistema é CM, com o ponto de operação representado por M. A altura de recalque H_M da primeira estação permanece igual à altura do sistema para a vazão Q_M . Ao desligar a segunda estação deixa de fornecer energia ao sistema não havendo mais aumento de pressão local para manter a vazão inicial. A primeira estação terá que alimentar o sistema todo – com perda de carga maior –, pela curva representada por DN na Fig. G.4 Neste caso, o novo ponto de operação N reduzirá a vazão para Q_N . Se a pressão de descarga em N estiver muito elevada o mecanismo de controle da estação enviará um sinal para o compressor para reduzir a rotação; de 15.000 rpm para 12.000 rpm, por exemplo. O resultado conduzirá a um novo ponto de operação P correspondendo à vazão Q_P . Em resumo, o desligamento da segunda estação causará o deslocamento do ponto de operação M na curva de 15.000 rpm para o ponto P na curva de 12.000 rpm, enquanto a vazão cairá de Q_M para Q_P . Observe que o recalque e a vazão no compressor estão relacionadas com a rotação de acordo com as relações sugeridas pelas equações (5.5) no Capítulo 5.

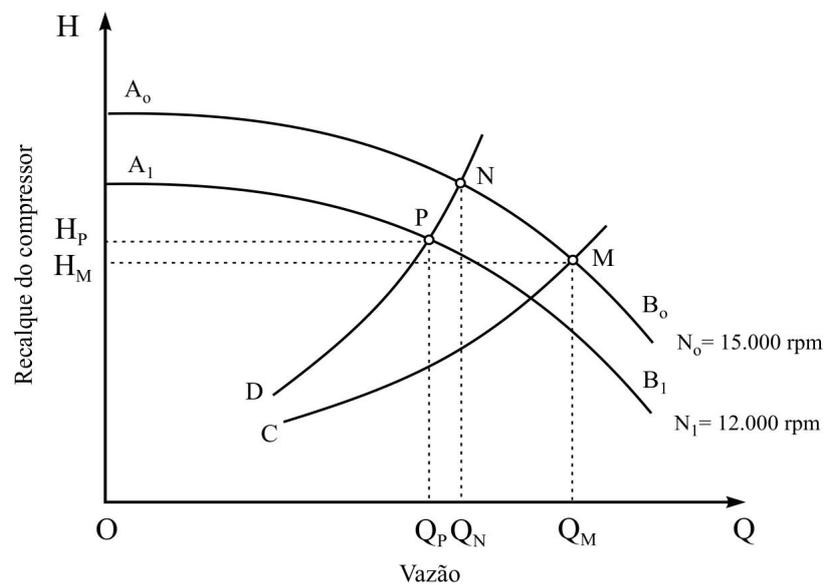


Figura G.4 Transiente devido ao desligamento de compressor intermediário.

G.5 Transiente num Gasoduto - Fechamento de Válvula

Consideremos o transiente de um gasoduto com 580 km de extensão e uma válvula no final da linha que é fechada em 5 segundos. O duto tem diâmetro interno de 863,7 mm, espessura de parede de 9,5 mm e rugosidade de 0,05 mm, com previsão de pressões de operação máxima e mínima de 55,7 e 15,2 bar, respectivamente, e temperaturas de operação máxima e mínima de 60 °C e 5 °C. A vazão inicial no ponto de entrada é de 10,4 MMm³/d. Os resultados da solução transiente para alguns parâmetros estão mostrados nas Figs. G5 a G8 a seguir. A composição molar é similar àquela mostrada no exercício B2, Apêndice B, com peso molecular 17,77 kmol/kg. O exemplo foi retirado de Mohitpour¹⁵.

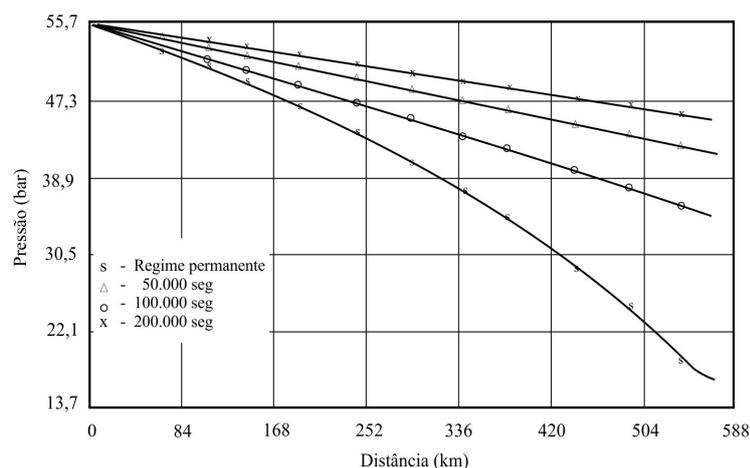


Figura G.5 Transiente para a pressão ao longo do duto para diversos instantes.

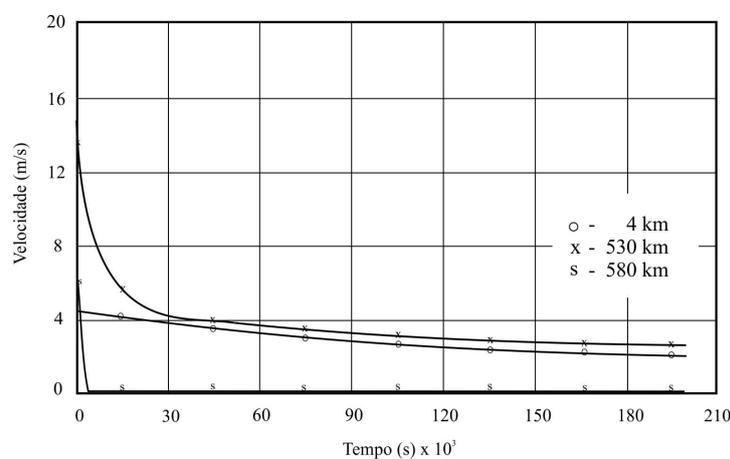


Figura G.6 Transiente para a velocidade em determinados pontos para diversos instantes.

¹⁵ Mohitpour, M., Goldhan, H., Murray, A., Pipeline Design & Construction: A Practical Approach, Cap. 6, ASME Press, 2000.

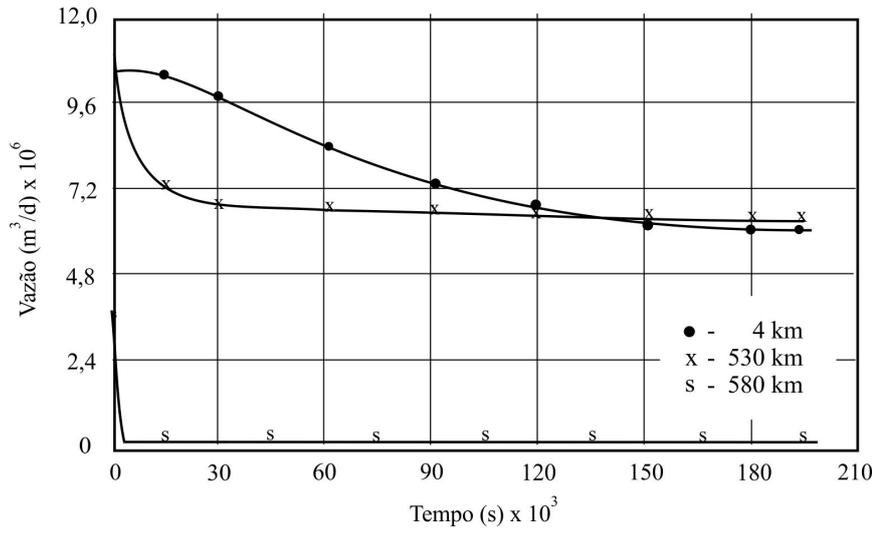


Figura G.7 Transiente para a vazão em determinados pontos para diversos instantes.

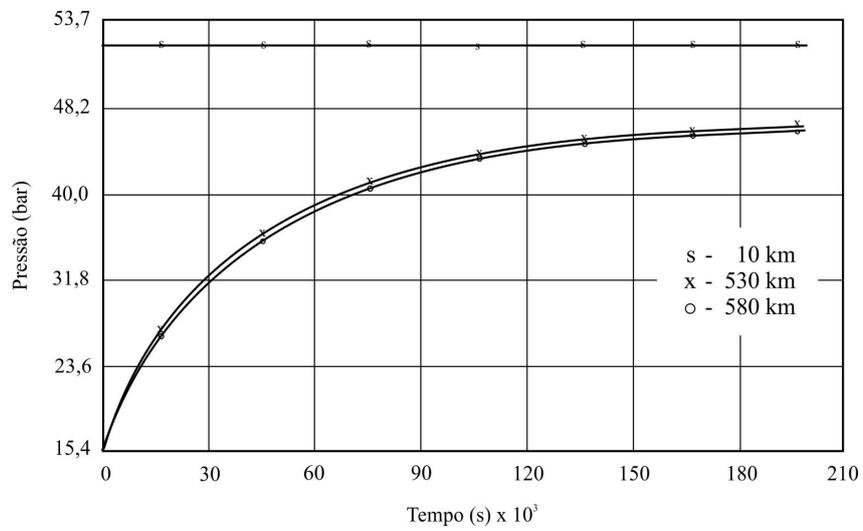


Figura G.8 Transiente para a pressão em determinados pontos para diversos instantes.

Apêndice H

Artigos sobre Escoamento em Dutos (Anexo no *site* do curso)

<http://engdutos.usuarios.rdc.puc-rio.br/>

- 01- ED- Advanced Power Cycle with CO2 Capture
- 02- ED- Capelassi-Equation of State-RPC-2011
- 03- ED- Capelassi-Surface Rugosity-ROGC-2014
- 04- ED- Gasoduto-Etapas de Projeto
- 05- ED- Friction Factor in HP Gas Pipeline
- 06- ED- Kollar-Optimun-Particle Size Solid Liquid Flow-2013
- 07- ED- LPS-Pipe-Flow - Livro Exercicios em Esc. Dutos
- 08- ED- Mathias-Valvulas de Seguranca e Alivio
- 09- ED- Newly Friction Factor for Pipe Flow-2010
- 10- ED- Santos-Pipeline Design Costs - RPC-2011
- 112- ED- Sirvole-Transient Analysis in Pipe Networks-2007
- 12- ED- Subramanian-Pipe Flow Calculations
- 13- ED- Tepedino-Interfaces em Oleodutos-RPC-2007
- 14- ED- Tubb-Global Pipeline Construction Report-2016