

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
Área de Concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

***Detecção de Vazamentos em Tubulações
Transportando Gás***

Autora: Isabel Bueno Macias

Orientadora: Profa. Dra. Sandra Lúcia Cruz

Co-orientador: Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira

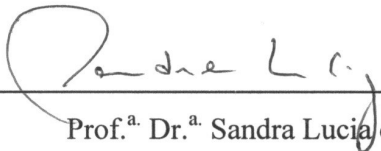
Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade
de Engenharia Química, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Título de Mestre
em Engenharia Química.

Campinas, SP, Brasil
Fevereiro, 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M187d	Macias, Isabel Bueno Detecção de vazamento em tubulações transportando gás / Isabel Bueno Macias. --Campinas, SP: [s.n.], 2004. Orientadores: Sandra Lúcia Cruz e João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. 1. Detectores de vazamento. 2. Gás Vazamento. 3. Gás Tubulações. I. Cruz, Sandra Lúcia. II. Pereira, João Alexandre Ferreira da Rocha. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. VI. Título.
-------	---

Dissertação de Mestrado defendida por Isabel Bueno Macias e aprovada em 27 de
Fevereiro de 2004 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



Prof.^a Dr.^a Sandra Lucia da Cruz

— Orientadora —



Prof. Dr. Sergio Persio Ravagnani

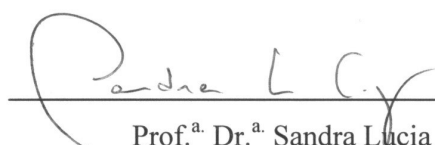
— Titular —



Prof.^a Dr.^a Celia Marina de Alvarenga Freire

— Titular —

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação de mestrado em Engenharia Química defendida por Isabel Bueno Macias e aprovada pela comissão julgadora em 27 de Fevereiro de 2004.



Prof.^a Dr.^a Sandra Lúcia da Cruz

— Orientadora —

Agradecimentos

À minha mãe, meu pai e minha irmã pelo apoio em todos os momentos.

À família e amigos que mesmo quando distantes me acompanharam.

Aos novos amigos que encontrei em Campinas.

À Prof.^a Sandra por toda a orientação e apoio.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos.

À Capes pelo apoio financeiro.

E a todos que indiretamente colaboraram para o desenvolvimento dessa tese sintam-se agradecidos.

Os pequenos atos que se executam são melhores que todos aqueles que se planejam.

Marshall.

Resumo

As tubulações são consideradas o melhor meio de transportar gás. Como freqüentemente atravessam regiões densamente povoadas e reservas naturais um pequeno vazamento pode gerar um desastre. Com o mercado de gás natural em expansão sistemas de detecção de vazamentos eficientes serão necessários para suprir a demanda.

Este trabalho descreve uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações de transporte de gás baseada na análise de transientes de pressão simulados e reais. Os transientes de pressão foram detectados e simulados para os casos de tubulações com e sem escoamento em várias condições de operação.

No estudo teórico, perfis da perda de pressão com o tempo foram obtidos através da simulação da ruptura no sistema pressurizado.

Os transientes de pressão provocados por vazamentos foram detectados em uma tubulação de ferro galvanizado de ½” de diâmetro com 6 metros na detecção estática e 60 metros na detecção com escoamento. Dois transdutores de pressão foram instalados na tubulação e enviam seus sinais de leitura a um computador PC através de uma placa conversora ADA. Os vazamentos foram simulados através de uma saída lateral onde foi posicionado um orifício com diâmetro variando de 0,7 a 5 mm. A pressão de operação variou de 1 a 6 kgf/cm². Um programa de aquisição de dados foi desenvolvido para ler e filtrar os valores de pressão enviados pelos transdutores.

Os resultados experimentais mostram que é possível detectar na tubulação com escoamento vazamentos maiores de 10% do fluxo nominal. A característica do perfil do transiente de pressão observado para o trecho de tubulação é a mesma daquele encontrado para a tubulação com escoamento contínuo, onde a ocorrência de vazamento provoca uma queda contínua no valor da pressão, um comportamento diferente do observado para tubulações operando com líquidos. A velocidade da onda de pressão foi determinada em aproximadamente 375 m/s. Os resultados simulados foram semelhantes aos experimentais, assim mostrando a possibilidade de detecção do vazamento através da análise dos transientes de pressão.

Palavras-chave: detecção de vazamentos; vazamento de gás; velocidade da onda de pressão.

Abstract

Pipeline networks are the most efficient gas delivery system. Since they frequently cross highly populated regions and natural reserves, a small leakage can give rise to a disaster. The natural gas market share is raising and efficient leakage detection systems will be necessary to supply the demand.

This work describes the development and tests of a leak detection technique in pipelines transporting gas based on the analysis of real and simulated pressure transients. Pressure transients were detected and simulated for pipelines with and without flow on several operational conditions.

In the simulation, pressure profiles with time were obtained through the simulation of the rupture in the pressurized system.

Pressure transients caused by leaks were detected in a ½" diameter galvanized iron pipeline with 6 m long in the static detection and a 60 m long in the detection with flow. Two pressure transducers were installed in the pipeline and the pressure signal is sent to a PC computer through an ADA converter. Leaks were simulated through a side outlet, having an orifice which size varied from 0.7 mm to 5 mm in diameter. The operational pressure varied from 1 to 6 kgf/cm². A computer program to be run on-line was developed to read and filter all the pressure profile plots.

The experimental results shows that in the pipeline with flow is possible to detect leaks above 10% of the nominal flowrate. The characteristic of the pressure transient profile observed for the pipeline fragment is the same as the observed for the one with continuous flow, where the leak occurrence result in a continuous fall in the pressure value, a different behaviour of the observed in pipelines operating with liquids. The pressure wave velocity was determined to be about 375 m/s. The simulated results were similar to the experimental ones, thus showing the possibility of the leakage detection through the pressure transient analysis.

Keywords: leak detection; gas leaking; pressure wave velocity.

Sumário

Resumo	xi
Abstract	xiii
Sumário	xv
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxi
Nomenclatura	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Gasodutos no Brasil.	2
1.2 Gasodutos de transporte	3
Gasoduto Bolívia-Brasil	4
Gasoduto Uruguaiana-Porto Alegre	5
Gasoduto Urucu-Porto Velho	6
1.3 Gasodutos de distribuição	6
1.4 Objetivo	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
Observação	10
Métodos baseados em sensores	11
Variações inesperadas	12
Gradiente de pressão	12
Balanço de volume	12
Ondas de pressão negativa	13
Redes neurais artificiais	13
Método estatístico	14
Detecção baseada na modelagem matemática da tubulação	14
2.1 Detecção de vazamentos por computador “on-line”	18
3. ESCOAMENTOS COMPRESSÍVEIS	27
3.1 Equações diferenciais para o cálculo do transiente	27
3.1.1 Equação de Estado	28
3.1.2 Equação da Continuidade	28
	xv

3.1.3 Equação do Momentum	29
3.1.4 Equação do Estado Estacionário	31
3.1.5 Perda de carga distribuída	32
3.2 Método das características	33
3.3 Condições de contorno	36
3.3.1 Reservatório a montante	36
3.3.2 Vazamento	36
3.3.3 Orifício a jusante	38
3.3.4 Tempo de integração	38
4. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	41
4.1 Detecção de vazamento em trecho fechado de tubulação	42
4.2 Detecção de vazamento em tubulação com escoamento contínuo	44
4.3 Sistema de Aquisição de Dados	45
4.3.1. Transdutores de Pressão	45
4.3.2. Placa Conversora Analógica-Digital-Analógica (ADA)	45
Conversão do sinal analógico em digital	46
4.3.3. Microcomputador	46
Temporização	46
Filtragem dos dados	47
4.3.4. Programas de aquisição de dados	48
4.3.5. Procedimento experimental	49
Para o trecho de tubulação fechado	49
Para a tubulação com escoamento contínuo	50
5. RESULTADOS E ANÁLISE	51
5.1 Detecção de vazamento em trecho fechado da tubulação	51
5.2 Detecção do vazamento em tubulação com escoamento contínuo	59
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	67
6.1 Conclusões	68
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
7.1 Referências da rede de Internet	75
APÊNDICE A ESCOAMENTO SÔNICO	77

APÊNDICE B VAZAMENTO DE GÁS EM TRECHO FECHADO DE TUBULAÇÃO	79
B.1 Cálculo do vazamento em trecho fechado de tubulação	79
B.2 Cálculo da porcentagem de vazamento	80
B.3 Simulação de vazamento em um trecho fechado de tubulação	84
APÊNDICE C TUBULAÇÃO COM ESCOAMENTO CONTÍNUO	87
C.1 Perda de carga na tubulação (perdas singulares)	87
C.2 Cálculo da vazão nominal	89
C.3 Cálculo da porcentagem de vazamento	91
APÊNDICE D SIMULAÇÃO DO TRANSIENTE CAUSADO POR UM VAZAMENTO	93
D.1 Parâmetros e etapas do programa de simulação.	93
D.2 Resultados da simulação	95
APÊNDICE E TRANSIENTES DE PRESSÃO CAUSADOS POR VAZAMENTO EM UM TRECHO FECHADO DE TUBULAÇÃO.	99
APÊNDICE F TRANSIENTES DE PRESSÃO CAUSADOS POR VAZAMENTO NA TUBULAÇÃO COM ESCOAMENTO CONTÍNUO	110
APÊNDICE G PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DO VAZAMENTO EM UMA TUBULAÇÃO COM ESCOAMENTO	121
APÊNDICE H PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	127

Lista de Figuras

1.1	Principais gasodutos brasileiros	3
1.2	Gasoduto Brasil-Bolívia	4
1.3	Mapa do gasoduto Bolívia-Brasil	4
1.4	Mapa do gasoduto Uruguaiana Porto-Alegre	5
1.5	Relação das distribuidoras de gás natural	7
2.1	Sistema de detecção de vazamento do gasoduto Niigata-Sendai.	16
2.2	Perfis dos gradientes de pressão obtidos Naves	19
2.3	Vazamento entre T1 e T2. Re 9000 (Buiatti)	20
2.4	Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores 2 e 3	20
2.5	Influencia do número de Reynolds e magnitude do vazamento na onda	22
2.6	Perfis de pressão obtidos por Cariatti.	23
2.7	Perfis de transiente de pressão obtidos por BRAGA	24
3.1	Fluxo através do volume de controle	28
3.2	Grade retangular para solução das equações das características	34
3.3	Condições de contorno: vazamento	36
4.1	Esquema do trecho fechado de tubulação	42
4.2	Sinal emitido pela válvula e pelo transdutor de pressão	43
4.3	Esquema da tubulação com escoamento contínuo.	44
5.1	Transientes de pressão (orifício 1 mm). Tubulação fechada.	51
5.2	Transientes de pressão (orifício 3 mm). Tubulação fechada.	52

5.3	Transientes de pressão (orifício 5 mm). Tubulação fechada.	53
5.4	Comparação entre transientes de pressão, a diferentes pressões iniciais para o mesmo orifício	54
5.5	Comparação entre transientes de pressão para orifícios diferentes e mesma pressão inicial.	55
5.6	Comparação entre transiente de pressão, tubulação 6m e 60m, orifício 0,5 cm	56
5.7	Comparação entre transiente de pressão simulados e experimentais. Tubulação fechada de 6 metros	57
5.8	5.8 – Comparação entre transiente de pressão simulados e experimentais, tubulação fechada de 60 m	58
5.9	Transientes de pressão (orifício 0,1cm). Tubulação com escoamento.	59
5.10	Transientes de pressão (orifício 0,2cm). Tubulação com escoamento.	60
5.11	Transientes de pressão (orifício 0,5cm). Tubulação com escoamento.	61
5.12	Comparação dos transientes de pressão para o mesmo orifício (vazamento provocado no instante 0).	62
5.13	Comparação dos transientes de pressão para o mesmo valor de pressão	62
5.14	Transientes de pressão (orifício 0,5cm). Vazamentos de 1 segundo.	63
5.15	Defasagem entre os transdutores.	64
5.16	Comparação dos resultados experimentais e simulados. Tubulação com escoamento	65
5.17	Comparação entre o perfil do transiente de pressão experimental e o simulado para x/L 0,1.	65

Lista de Tabelas

2.1	Comparação dos métodos de detecção de vazamento.	17
2.2	Precisão na localização de vazamentos. (SILVA, 1996)	21
4.1	Condições experimentais – Tubulação com trecho fechado.	43
4.2	Condições experimentais – Tubulação com escoamento contínuo.	44
4.3	Faixa de pressão dos transdutores	45

Nomenclatura

Letras Latinas

a	Velocidade de propagação da onda de pressão na tubulação, [m/s]
a	Aceleração, [m/s ²]
a	Constante do filtro exponencial
a	Constante, $(k+1)/(2k-2)$
A	Área da seção transversal da tubulação, [m ²]
A	Constante, $A = (-2.457 \ln C)^{16}$
b	Constante, $(k-1)/k$
B	Constante, $B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$
c	Constante, $-(k-1)/(2k)$
C	Constante, $C = \left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D}$
C^+	Linha característica positiva
C^-	Linha característica negativa
C_a	Constante, $C_a = \frac{A}{a}$
C_R	Constante da equação característica positiva, [equação 3.40]
C_n	Constante da equação característica negativa, [equação 3.41]
C'	Coeficiente de fluxo para orifícios
C_D	Coeficiente de descarga do orifício
d	Constante, $(1-k)/2$
D	Diâmetro interno da tubulação, [m]

e	Constante, $(k+1)/(k-1)$
f	Fator de atrito de Darcy
F	Força, [N]
F	Fração de massa do gás inicial remanescente no vaso de pressão no tempo t
g	Aceleração devido à gravidade, $[m/s^2]$
G°	Densidade mássica máxima de fluxo $[kg/s.m^2]$
G	Densidade mássica de fluxo $[kg/s.m^2]$
k	Constante adiabática do gás, $[c_p/c_v]$
L	Comprimento total da tubulação, [m]
L	Combinação linear das equações do movimento e da continuidade, $L = L_1 + \lambda L_2$
L_1	Equação da continuidade, [equação 3.25]
L_1	Distância entre os transdutores 1 e 2 (m)
L_2	Equação do momento, [equação 3.26]
L_2	Distância entre os transdutores 2 e 3 (m)
L_3	Distância entre os transdutores 3 e 4 (m)
Leq	Comprimento da tubulação considerando a perda de carga ocasionada pelos encaixes, [m]
m	Massa, [kg]
M	Massa molecular [kg/mol]
n	Número de trechos que formam a seção.
N	Número de seções que formam a tubulação.
N	Coeficiente de resistência ao atrito em carga cinética
P	Pressão no interior da tubulação, [Pa]
q	Vazão mássica, [kg/s]

R	Constante universal dos gases, [J/(kmol.K)], para o ar $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol.K})$
Re	Número de Reynolds
t	Tempo (s)
t_1	Tempo de detecção do transdutor T1
t_2	Tempo de detecção do transdutor T2
t_3	Tempo de detecção do transdutor T3
t_4	Tempo de detecção do transdutor T4
T	Temperatura, [K]
v	Velocidade do fluido (m/s)
V	Volume [m ³]
Y	Distância do vazamento ao transdutor a jusante (m)
Y	Valor filtrado pelo filtro exponencial
Y	Fator de expansão de rede através de orifícios e tubulações
x	Distância ao longo da tubulação, [m]
X	Medida de pressão do transdutor
x/l	Relação entre a posição do vazamento e o comprimento total da tubulação
z	Fator de compressibilidade do gás

Letras gregas

α	Ângulo entre a horizontal e a direção x
β	Razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno da tubulação.
Δ	Variação da condição
ϵ	Rugosidade absoluta, [m]

ε/D	Rugosidade relativa
λ	Multiplicador linear
μ	Viscosidade, [kg/(m.s)]
ρ	Massa específica do gás, [kg/m ³]

Subscritos

₀	Condições em regime estacionário
₁	Condição em um tempo $\geq t_0$
₂	Condição em um tempo qualquer tempo $\geq t_1$
_i	Número da seção da tubulação
_j	Número do trecho da tubulação
_{j+1}	Variável na posição j +1 em relação á linha das características
_{j-1}	Variável na posição j -1 em relação á linha das características
_{n+1}	Trecho n+1
or	Variável nas condições do vazamento
_R	Variável nas condições do regime transiente
_{res}	Variável nas condições do reservatório
_t	Valor filtrado no instante atual
_{t-1}	Valor filtrado no instante anterior
_{t-2}	Valor filtrado no segundo instante anterior
_{tub}	Variável nas condições da tubulação
_{TF}	Variável nas condições do vaso de pressão
_x	Variável na direção x

Abreviaturas e Siglas

ADA	Analógico-Digital-Analógico.
CAD	Conversor Analógico-Digital
Comgás	Companhia de Gás de São Paulo
exp	Resultados experimentais
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
PVC	Policloreto de Vinila
Re	Número de Reynolds
SA	Sinal Analógico
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SD	Sinal Digital
sim	Resultados simulados
T1	Transdutor 1, localizado no início da linha.
T2	Transdutor 2, localizado no fim da linha.
transd	Transdutores
Vaz	Porcentagem de Vazamento

1. Introdução

A cada ano são transportados por tubulações, em terra e sob o mar, diversos produtos com valor estimado em milhões de dólares. Tubulações são consideradas o melhor meio de transportar fluídos a longas distâncias, uma vez que apresentam menor custo de transporte quando comparado com o rodoviário, ferroviário e marítimo; são mais seguras que qualquer outro meio de transporte, apresentando a menor taxa de acidentes e de danos causados ao meio ambiente, e são eficientes em termo de energia. KENNEDY (1993).

Recentes mudanças na legislação pelo mundo, imprimiram considerável ímpeto pela adoção da crescente tecnologia de monitoramento. Cada sistema de tubulações possui características únicas, que ditam o tipo de sistema de controle mais adequado.

A principal meta de um sistema de controle é obter a maior vazão ao menor custo sem exceder os limites de pressão do sistema. Porém, proteger a tubulação e equipamentos através do monitoramento e ajustes de variáveis da operação, acionar alarmes quando os limites de operação forem ultrapassados, agendar entregas e detectar vazamentos fazem do sistema de controle um elemento indispensável para a segurança e operação de tubulações. KENNEDY (1993).

Os vazamentos em tubulações podem ocorrer devido a variações brusca na pressão, ação corrosiva ou manutenção inadequada. Um pequeno percentual de perda gera eventos com significantes impactos econômicos, danos ambientais e prejuízos para a segurança pessoal.

Tubulações normalmente são conhecidas por sua segurança e apresentam pequena taxa de acidentes. Destes, alguns podem ser citados: em 1984, um vazamento de gás em Cubatão provocou duas explosões e um incêndio, que causaram a morte de 150 pessoas; em 1988 na Rússia, um vazamento em uma tubulação de GNL resultou também em grande número de mortos, cerca de 700 pessoas, e pequenos acidentes em tubulações de gás natural no período de 1970-1984, provocaram 86 mortes nos Estados Unidos. BELSITO (1998).

Este trabalho descreve o desenvolvimento e aplicação de uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações de transporte de gás, os gasodutos.

Dentre os gases transportados por tubulações podemos citar o gás natural, GLP, gás de rua, gás de refinaria, amônia. Sistemas de transmissão de gás podem cobrir grandes áreas geográficas com centenas e até milhares de quilômetros de extensão ou mais. O gás natural possui a maior malha de tubulações. Na Europa existem mais de 1.300.000 km, onde podemos destacar uma longa tubulação de 4.500 km, que transporta gás da Rússia para a Europa ocidental e os gasodutos na Sibéria ocidental com milhares de quilômetros de extensão. Nos Estados Unidos são 2.100.000 km de tubulações. Atualmente, no Brasil, existem mais de 10.000 km de tubulações de transporte. (<http://www.gasenergia.com.br> ; <http://www.netl.doe.gov/scng/trans-dist/distribute.html>)

1.1 Gasodutos no Brasil. KENNEDY (1993)

A maioria dos gasodutos se enquadra em três grupos: transferência, transporte e distribuição.

As tubulações de transferência levam o gás das áreas de produção até as plantas de processamento. Normalmente o gás sai da fonte com pressão suficiente para ser transportado até a planta de processamento. O gás é tratado e adequado às condições de consumo; hidrocarbonetos líquidos são separados para venda. O processo de desidratação remove água até um limite aceitável, que normalmente é de 7 lb/MMcf (milhões de pés cúbicos). Se o gás contém gases ácidos, sulfeto de hidrogênio ou dióxido de carbono, estes componentes devem ser removidos nesta etapa do processo.

Tubulações de transporte levam o gás da estação de tratamento até as redes de distribuição. Compressores no começo da linha proporcionam energia para movimentar o gás pela tubulação. Estações compressoras ao longo do trajeto são necessárias para manter a alta pressão requerida. As tubulações de transporte são feitas de tubos de aço e são enterradas abaixo da superfície. As seções individuais são unidas por solda, e o tubo é revestido externamente para proteger contra corrosão. As tubulações normalmente

transportam gás por centenas de quilômetros e o diâmetro normalmente é de 60 polegadas ou mais.

1.2 Gasodutos de transporte (<http://www.gasenergia.com.br/>, <http://www.gaspetro.com.br/gas.htm>)

A Figura 1.1 mostra os principais gasodutos brasileiros e a seguir é feita uma explanação sobre os mais importantes.

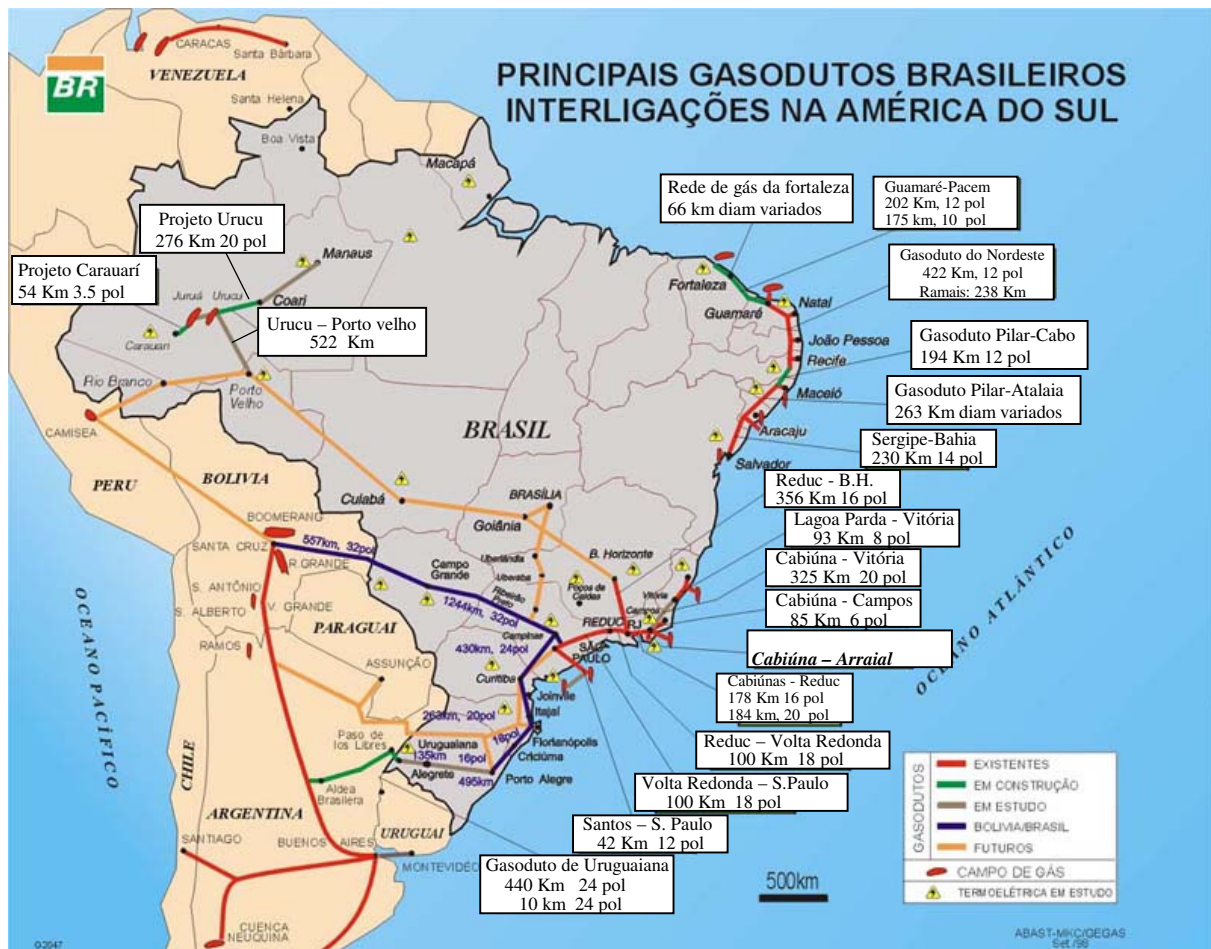


Figura 1.1 – Principais gasodutos brasileiros

Gasoduto Bolívia-Brasil

O gasoduto Bolívia-Brasil (Figuras 1.2 e 1.3) tem 2593 km de extensão em território nacional e 557 km na Bolívia, e custo total aproximado de US\$ 2 bilhões. A rede de dutos atravessa os estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e beneficia indiretamente Rio de Janeiro e Minas Gerais.

A meta é que esteja operando com capacidade máxima em 2007, gerando 30 milhões de m³ por dia, metade da necessidade nacional. O resultado possibilitará a implantação de novas usinas termelétricas em diversas localidades. Somente o Estado de São Paulo deverá absorver metade da capacidade total do gasoduto.

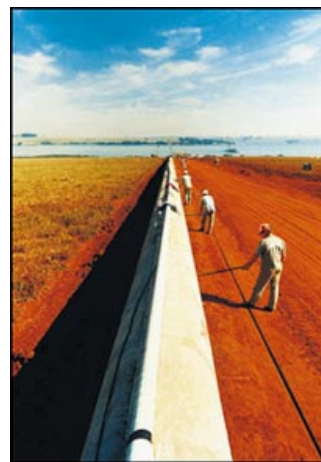


Figura 1.2 – Gasoduto Brasil-Bolívia



Figura 1.3 – Mapa do gasoduto Bolívia-Brasil

Gasoduto Uruguaiana-Porto Alegre

O Gasoduto Uruguaiana-Porto Alegre (Figura 1.4) foi criado para fornecer gás natural ao Estado do Rio Grande do Sul, que importa 70% do seu consumo de eletricidade, e interligar as principais bacias gasíferas do Brasil, da Argentina e da Bolívia.

O Gasoduto tem 615 km de extensão e capacidade máxima de 15 milhões de m³/dia o empreendimento beneficia 23 municípios dentro da sua área de influência e irá garantir o fornecimento de gás natural nas regiões Sul e Sudeste do país.

A primeira etapa já foi concluída em junho de 2000, com a construção de dois trechos. O primeiro liga a fronteira Argentina/Brasil até o "citygate" de Uruguaiana, abastecendo uma usina termelétrica com capacidade de produção aproximada de 600 MW. O segundo interliga o município de Canoas até o Pólo Petroquímico de Triunfo. A última etapa será a interligação desses dois trechos com 565 km de extensão que irá abastecer Porto Alegre com o gás natural Argentino.



Figura 1.4 – Mapa do gasoduto Uruguaiana Porto-Alegre

Gasoduto Urucu-Porto Velho

As obras para a construção do gasoduto que ligará a região produtora de petróleo e gás de Urucu, no meio da floresta amazônica, a Porto Velho, capital de Rondônia, começam em 2004 e levarão um ano para serem concluídas.

O gasoduto terá 522 quilômetros e capacidade de transportar 2,5 milhões de metros cúbicos por dia de gás natural. O destino final será a termelétrica da companhia norte-americana El Paso em Porto Velho.

A região de Urucu produz diariamente 7 milhões de metros cúbicos de gás e 52 mil barris de petróleo. A opção do gasoduto, além de rentável, foi necessária para evitar a queima do gás que sai durante o processo de produção de petróleo.

1.3 Gasodutos de distribuição (<http://www.gasenergia.com.br/>)

É a etapa final do sistema de fornecimento, quando o gás chega ao consumidor para uso industrial, automotivo, comercial ou residencial. O gás, nesta fase, atende a padrões rígidos de especificação, e está isento de contaminantes. Quando necessário, deverá também estar odorizado, para ser detectado facilmente em caso de vazamentos.

O mapa da Figura 1.5 mostra a relação das distribuidoras de gás natural. A Comgás é a maior distribuidora de gás natural canalizado do País, com consumo diário de oito milhões de m³. Sua rede tem três mil quilômetros, espalhados por 38 municípios, atingindo mais de 355 mil consumidores nos segmentos residencial, comercial e industrial. Em 2001 a empresa faturou R\$ 869 milhões. Sua área de concessão engloba a área metropolitana de São Paulo, o Vale do Paraíba, a Baixada Santista e Campinas.



Figura 1.5 – Relação das distribuidoras de gás natural

O mercado do gás natural está em expansão e a construção de novos gasodutos será necessária para suprir a crescente demanda. O aumento da malha de tubulações e interconexões aumenta a flexibilidade em termos de diversificação de rotas de suprimentos aumentando a segurança da transmissão e promovendo um maior desenvolvimento do mercado.

Estimativas indicam uma triplicação dos volumes de gás natural escoados nos gasodutos brasileiros, dos atuais 22 milhões de m³/dia para 65 milhões nos próximos anos. (<http://www.gasnet.com.br>).

Sistemas de detecção de vazamentos eficientes serão fundamentais para a viabilização de novos gasodutos.

1.4 Objetivo:

Considerando a importância dos sistemas de detecção e localização de vazamentos em tubulações o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações transportando gás, baseada na detecção e análise de transientes de pressão em tempo real.

Através de uma tubulação de ferro galvanizado de ½” de diâmetro, transportando ar comprimido, a aquisição dos dados reais é realizada por meio de dois transdutores de pressão, que conectam a tubulação a um computador PC.

O estudo foi dividido em duas partes: a detecção com e sem escoamento. Na detecção estática para obter os perfis dos transientes de pressão provocados pela ruptura utilizou-se uma tubulação de 6 metros de comprimento que teve as extremidades fechadas. Na detecção com escoamento utilizou-se uma tubulação de 60 metros de comprimento. A pressão de operação variou de 1 a 6 kgf/cm².

A detecção de vazamentos também foi estudada teoricamente. Usando as equações que regem o fenômeno do transiente foram desenvolvidos programas em linguagem C, onde perfis da perda de pressão com o tempo foram obtidos através da simulação da ruptura no sistema pressurizado para ambos os casos.

A detecção de vazamentos é feita pela análise dos transientes de pressão simulados e reais, para várias condições de operação.

2. Revisão Bibliográfica

Diferentes tipos de vazamentos podem ocorrer em tubulações. O vazamento por “ruptura” é o menos comum, mas muito perigoso, podendo causar danos significativos ao ambiente, especialmente em áreas remotas e em tubulações submersas. Entretanto, são os mais fáceis de serem detectados por causarem quedas significativas de pressão e discrepância no volume. Corrosão, erosão, fadiga, defeitos na solda ou em junções podem desenvolver pequenos vazamentos, que por serem de difícil detecção podem levar a grandes perdas de produto.

Em gasodutos pressurizados os vazamentos são relativamente pequenos. Os métodos atuais permitem a detecção de pequenos vazamentos, sendo que o vazamento mínimo que pode ser detectado depende de diversos fatores como: o tipo de fluido que escoar na tubulação, a precisão do sistema de medida e dos transmissores, tamanho e espessura da tubulação, a condição do estado transiente ou estacionário do fluxo, equipamento de análise e da experiência das pessoas envolvidas. KENNEDY (1993).

Nos últimos anos um grande número de sistemas de detecção de vazamento foi implantado em várias tubulações em operação. Infelizmente, o “feedback” de operadores mostra que muitos desses sistemas não apresentam desempenho satisfatório pelos seguintes motivos: geram freqüentes alarmes falsos, são de difícil entendimento para o usuário e a manutenção é muito cara. Conseqüentemente, alarmes de vazamento são negligenciados e em alguns casos desligados. ZHANG (2001)

Podemos dizer que um sistema de detecção deve ser sensível o suficiente para fornecer notificação precisa e rápida e ao mesmo tempo ter baixa freqüência de alarmes falsos. BLACK (1992).

Sistemas de detecção de vazamento podem ser classificados em duas principais categorias: estáticos e dinâmicos. SANDBERG et al. (1989).

Sistemas dinâmicos são os preferidos já que podem ser usados enquanto a tubulação está operando.

Métodos estáticos são úteis depois que o vazamento foi detectado, para obter a localização. Esses métodos são capazes de detectar pequenos vazamentos e baseiam-se no fato de que em uma linha sem fluxo uma queda de pressão indica vazamento. A localização é feita por meio de transdutores diferenciais de pressão. WIKE (1986).

WIKE (1986) enumera várias técnicas de detecção e localização de vazamentos baseadas no sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): teste estático, variações inesperadas, gradiente de pressão, balanço de massa, ondas de pressão negativa, simulação paralela.

DEMPSEY e AL-HABIB (1996) descrevem a aplicação de um novo sistema SCADA, em duas tubulações transportando petróleo por 1100 km na Arábia Saudita. O sistema SCADA computadorizado monitora e controla as tubulações. A substituição do sistema SCADA anterior por este, ocorreu por dois motivos: proporcionar um sistema de controle distribuído e providenciar ao sistema maior número de funções de monitoramento e controle supervisão. O sistema SCADA inclui um software de aplicação (LEAKSTOP) para detecção de vazamento em tempo real.

BLACK (1992) classificou os sistemas de detecção de vazamentos nas seguintes categorias: observação, métodos baseados em sensores, “pigs” inteligentes, análise a partir de medidas de pressão, balanço de volume não compensado e modelagem matemática da tubulação.

A seguir são descritos os principais métodos de detecção de vazamento em tubulações.

Observação

A observação é o meio mais simples de detectar vazamentos, é a patrulha regular da tubulação, fazendo a inspeção visual da integridade da linha. Um método similar é a injeção de aditivos químicos em gases atóxicos provendo odor. A ocorrência de vazamentos deve ser verificada em inspeções regulares, já que a eficácia deste método pode deteriorar dependendo das condições ambientais e da direção do vento. BLACK (1992).

Métodos baseados em sensores

Métodos acústicos: Em princípio são métodos que podem detectar vazamentos muito pequenos em um curto espaço de tempo, mas que nem sempre funcionam bem, devido ao “ruído de fundo” de compressores e válvulas.

SANDBERG et al. (1989) cita “pigs” de monitoramento acústico que detectam o vazamento através da energia acústica gerada pelo escape do fluido.

Sensores de ruídos ultra-sônicos: instrumentos baseados na detecção do ruído criado pelo vazamento, produzido na faixa de frequências ultra-sônicas. O software associado deve ser desenvolvido cuidadosamente de modo a filtrar os ruídos externos. BLACK (1992).

Sensores térmicos e eletroópticos: uma patrulha aérea dotada de sensor remoto pode detectar vazamentos de gás natural monitorando o metano e etano na atmosfera sob a tubulação por meio de suas assinaturas (picos) no espectro infravermelho. Um sistema similar usa imagens infravermelhas térmicas. SANDBERG et al. (1989).

Sensores de ação seletiva: a evidência do vazamento de produtos pode ser deduzida pelas mudanças nas propriedades eletromagnéticas de cabos enterrados ou por sensores seletivos para uma substância específica. BLACK (1992)

CHUNG e LEE (2001) desenvolveram um sistema de monitoramento (multicanal) de vazamento de gás natural, baseado em sensores de SnO₂ que apresentam detecção seletiva do metano ou gás natural.

SANDBERG et al. (1989) desenvolveu um sistema sensor de hidrocarbonetos que consiste em um módulo de alarme e um cabo sensor. O cabo sensor é instalado ao longo da tubulação e tem comprimento de 2 km. O cabo é revestido de um polímero condutivo que incha ao entrar em contato com o hidrocarboneto que está vazando da tubulação. Ao inchar, o circuito existente dentro do cabo é fechado, acionando o alarme para avisar a presença de vazamento. O elemento chave do circuito de localização é a fonte de corrente constante e a

alta impedância do voltímetro, que através da lei de Ohm permite a localização do vazamento.

Variações inesperadas

O vazamento é detectado na tubulação em operação por meio da variação da pressão e do fluxo. O vazamento pode provocar uma diminuição de pressão a montante e um aumento de fluxo também a montante, este método pode ser aplicado apenas a fluidos incompressíveis próximo ao estado estacionário, caso contrário pode levar a falsos alarmes. Somente vazamentos maiores são detectados. WIKE (1986).

Gradiente de pressão

Baseia-se no princípio de que um vazamento deve distorcer o perfil de pressão ao longo de uma seção da tubulação. O gradiente médio de pressão ao longo da linha pode ser calculado por meio de medidores de pressão nas extremidades das seções. Um vazamento causa uma diminuição no gradiente médio e através de técnicas de ajuste de curvas de interpolação entre medidas de pressão, o vazamento é localizado com razoável precisão. WIKE (1996).

Balanço de volume

É um dos métodos mais usados, ele é limitado pela exatidão da medida do volume e das variações associadas a ela. O método essencialmente mede o “volume que entra” e subtrai o “volume que sai”, a diferença significa vazamento. Falsos alarmes podem ocorrer porque a taxa de fluxo depende de parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade). As variações nos parâmetros podem ser corrigidas por medições regulares das variáveis ao longo da tubulação ou preditas por um modelo de cálculo. Assim para evitar alarmes falsos, só será constatado o vazamento quando a diferença de fluxo exceder um valor limite, vazamentos de 2% de líquido e 10% de gases são necessários para a detecção. Vazamentos menores podem ser detectados com métodos não lineares adaptativos baseados

na medida do fluxo e pressão na entrada e saída da tubulação. A localização não é possível por este método. WIKE (1986). BLACK (1992) SANDBERG et al. (1989).

Ondas de pressão negativa

No instante em que o vazamento ocorre há uma queda de pressão no local originando uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som no sentido montante e jusante até que seja alcançado um novo estado estacionário. Esta pressão negativa viaja a grandes distancias apenas com atenuação moderada, providenciando uma detecção rápida para grandes tubulações. Para calcular a posição do vazamento com razoável precisão, transdutores de pressão são instalados nas extremidades das seções. É preciso fazer uma filtragem cuidadosa dos dados porque as ondas de pressão negativas podem ser causadas por bombas, fechamento de válvulas e outros procedimentos normais da operação. As experiências mostram que o número de alarmes falsos é afetado pela instalação e que o desempenho depende do número de Reynolds. WIKE (1996). BLACK (1992)

JÖNSSON e LARSON (1992) aplicaram a análise espectral a transientes de pressão baseados na teoria de que se a pressão é medida em um ponto do sistema hidráulico e analisada a respeito da propagação de ondas, as ondas adicionais não associadas à configuração do sistema podem revelar possíveis vazamentos. Quando uma série de medidas de pressões no tempo são representadas por um número de funções periódicas com variações de amplitude, frequência e fase, é possível distinguir ondas de frequência dominantes no sinal e identificar as ondas refletidas. A detecção e localização são possíveis porque um vazamento no sistema origina ondas refletidas com magnitudes que dependem do fluxo de vazamento e da razão entre a pressão incidente e a pressão no local do vazamento.

Redes neurais artificiais

BELSITO *et al.* (1998) desenvolveu um sistema de detecção e localização de vazamentos em tubulações transportando gás liquefeito baseada em redes neurais artificiais. A rede foi treinada com dados simulados e testada levando em consideração os sinais de

ruídos existentes na tubulação. No sistema em estudo foram detectados vazamentos de 1% do fluxo de entrada e a localização de vazamentos maiores (5%, 10%) foi feita com alta confiabilidade mesmo na presença de ruídos.

Método estatístico

ZHANG (2001) examina a aplicação do ATMOS Pipe desenvolvido pela Shell. Este método estatístico de detecção de vazamentos em tubulações não usa modelos matemáticos para calcular o fluxo e a pressão na tubulação, mas ele detecta as mudanças na relação entre o fluxo e a pressão usando dados de medidas disponíveis. Opera em tubulações de gás e líquido. Baseado em medidas de fluxo e pressão ele continuamente calcula a probabilidade de ocorrência de vazamento, avisando o tamanho do vazamento e sua localização aproximada. Tem uma taxa muito baixa de alarmes falsos, as variações geradas por mudanças operacionais são registradas assegurando que o alarme de vazamento ocorra quando houver um padrão único de mudanças no fluxo e pressão, suas características proporcionam ao sistema uma capacidade de aprendizado on-line adaptando-se às mudanças na tubulação e instrumentos de medida.

O sistema foi testado em uma tubulação transportando etileno a alta pressão por 413 quilômetros. O sistema recolhe dados provenientes do SCADA existente, após o processamento a posição da linha (normal ou vazamento) é devolvida ao SCADA juntamente com a taxa de vazamento e a estimativa do local. Durante as operações normais da tubulação o sistema não gerou alarmes falsos. Testes também foram feitos em tubulações transportando petróleo e propileno líquido.

Detecção baseada na modelagem matemática da tubulação

Embora existam diferentes formulações, a essência da maioria dos sistemas de modelagem é a mesma: solução de equações da conservação de massa, momento e energia. Estas equações não representam um sistema fechado e devem ser suplementadas por uma equação de estado e formulação do fator de fricção. Métodos numéricos são usados para resolver este grupo de equações não lineares, o resultado é uma ferramenta preditiva conhecida como modelo de tempo real, ou on-line. BLACK (1992)

O modelo estima variáveis intermediárias ao longo da tubulação através de um conjunto limitado de medições reais da tubulação como pressão a montante e fluxo a jusante, que são usados como condições de contorno. As discrepâncias entre as variáveis intermediárias calculadas pelo modelo e medições reais são usadas para indicar vazamentos. WIKE (1986).

Uma predição exata do empacotamento da linha e o efeito do transiente no balanço de volume só são obtidos quando usamos o sistema baseado no modelo. BLACK (1992)

PUDAR e LIGGETT (1992) e DEMPSEY e AL-HABIB (1996) fizeram a modelagem na rede inteira para obter o transiente hidráulico.

BILLMANN e ISERMANN (1987) propuseram um método de modelo matemático dinâmico para detectar e localizar pequenos vazamentos, baseado nas equações de escoamento transiente, observadores de estado adaptativo não linear e uma técnica de correlação. Os sinais medidos são a taxa de fluxo e a pressão nas extremidades da seção. São detectáveis vazamentos maiores de 2% para líquidos e maiores que 10% para gases.

VERDE (2001) descreve a detecção de vazamentos múltiplos baseada no modelo da tubulação distribuída. O problema é resolvido usando apenas sensores de fluxo e pressão nos extremos do duto e a redundância analítica dada por essas medidas. O modelo da tubulação com múltiplos vazamentos é feito considerando uma condição de contorno adicional na equação diferencial parcial onde há vazamento.

FUKUSHIMA et al. (2000) relata o sistema de detecção de vazamento de gás, em funcionamento desde 1997, instalado na tubulação Niigata-Sendai de 250 km de extensão.

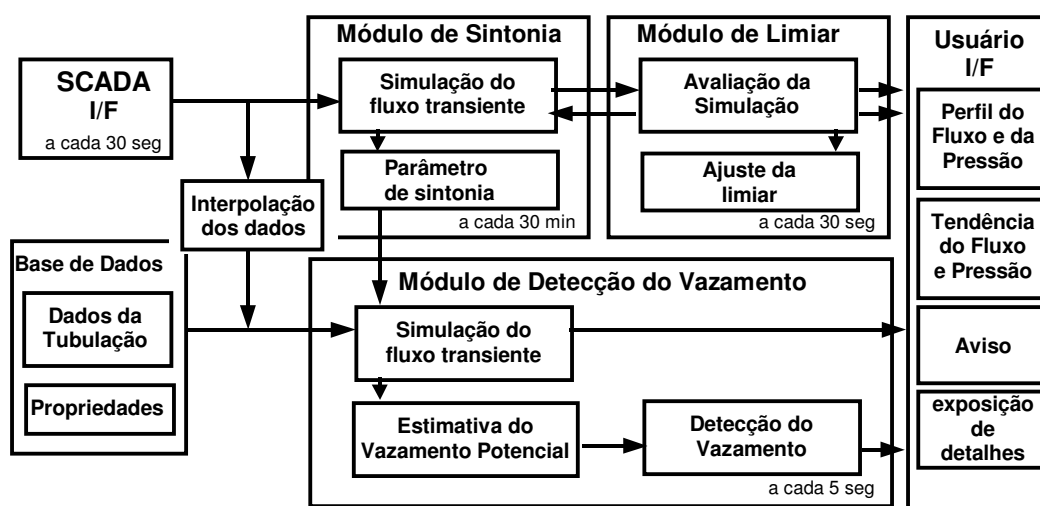
A detecção do vazamento é feita medindo a pressão e temperatura nas estações de válvulas, distantes 12 km entre si, e medindo o fluxo de gás na entrada e na saída da tubulação. Como a demanda principal é para a estação de energia de Sendai, que opera continuamente, não há estado estacionário na operação da tubulação. O sistema de detecção de vazamento automaticamente determina o local do vazamento e a taxa de vazamento em tempo real.

O método proposto é uma extensão do método de balanço de massa e volume. O modelo de simulação para a tubulação é baseado no modelo do fluxo transiente, e o método das características é usado para resolver as equações diferenciais ordinárias.

A detecção em tempo real é feita em duas etapas, conforme mostra a Figura 2.1:

É feita uma simulação baseada no balanço da pressão. O vazamento em potencial é definido pela diferença de balanço de massa a cada estação de válvula. No momento em que há certeza de que não existe vazamento, um parâmetro de sintonia reconcilia o balanço de pressão para minimizar a possibilidade de vazamento a cada estação de válvula.

A discrepância entre o valor do balanço da pressão simulada e o real é avaliado para determinar o possível vazamento. A detecção de vazamento é feita comparando o valor do vazamento em potencial com um valor preestabelecido. Se o vazamento em potencial for maior que o valor preestabelecido ele pode ser determinado como um possível vazamento. A localização do vazamento é feita entre os dois pontos em que os valores preestabelecidos foram violados.



Módulo SCADA I/F: faz a comunicação com SCADA através da ethernet, os dados de operação de cada válvula são transferidos pelo SCADA a cada 30 segundos.

Módulo de Sintonia: Faz a reconciliação dos dados a cada 30 minutos. Os parâmetros sintonizados são alimentados no módulo de detecção de vazamento. O erro em reconciliação é alimentado ao módulo de limiar.

Módulo de detecção de vazamento: Usando os parâmetros sintonizados e dados reais, a simulação do fluxo transiente é feita a cada 5 segundos. Comparando os resultados simulados com os valores preestabelecidos a localização do vazamento e a taxa de vazamento podem ser preditas.

Módulo Usuário I/F: providencia ao usuário uma interface gráfica, mostrando a possibilidade do vazamento com as informações relacionadas.

Figura 2.1 – Sistema de detecção de vazamento do gasoduto Niigata-Sendai.

Neste sistema o vazamento mínimo detectado é de 1,1%, e para localizar o vazamento é preciso que seja de no mínimo 1,8%.

Com a carga máxima o vazamento é detectado em 8 minutos com erro de localização médio de 4%. Já com a carga mínima o vazamento é detectado em 4 minutos com erro de localização médio de 20%.

A Tabela 2.1 faz uma comparação entre diferentes métodos de detecção de vazamento. CIST e SCHUTZ (2001).

Tabela 2.1 – Comparação dos métodos de detecção de vazamento.

Método	Observação	Sensor de temperatura	Acústico	Pressão negativa	Balanço de volume	Balanço de massa	Modelagem
Sensível a vazamento	sim	sim	sim	sim	não	não	sim
Estimativa da localização	sim	sim	sim	sim	não	não	sim
Trabalha sob mudanças operacionais	sim	sim	não	não	não	não	sim
Disponível 24 horas	não	não	sim	sim	sim	sim	sim
Taxa de alarmes falsos	baixa	média	alta	alta	alta	alta	alta
Requerimento de manutenção (especializada)	médio	médio	médio	médio	baixo	baixo	alto
Custo (Implantação + operacional)	alto	alto	médio	médio	baixo	baixo	alto

Nenhum método pode ser considerado ideal e seu desempenho varia muito com o projeto de aplicação. Em tubulações importantes mais de um método de detecção de vazamento é implementado. BELSITO et al. (1998).

2.1 Detecção de vazamentos por computador “on-line”

O Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos (DESQ)/ FEQ/ UNICAMP desenvolve desde 1989 o estudo sobre técnicas de detecção e localização de vazamentos em tubulações por métodos computacionais “on-line”.

NAVES (1991) desenvolveu um método para detecção de vazamentos baseado na detecção e análise de transientes de perda de carga na tubulação.

O perfil teórico do transiente hidráulico gerado por um vazamento foi obtido através de simulação feita a partir das equações da continuidade e do momento e do método das características.

O perfil experimental foi obtido através de experimentos realizados em uma tubulação de PVC de 20 metros de comprimento e $\frac{3}{4}$ ” de diâmetro nominal. O sistema de aquisição de dados em tempo real por computador era composto por transdutor de pressão (do tipo célula capacitiva) interfaceado a um computador através de um circuito condicionador e amplificador do sinal e placa Analógica-Digital/Digital-Analógica.

Em ambos os casos variou-se os principais parâmetros que afetam diretamente o vazamento: razão de vazamento (10, 20, 30, 40 e 50% da vazão nominal do fluxo), número de Reynolds (6000, 8000, 10000 e 12000) e a posição do vazamento (5, 10 e 15 metros da entrada da tubulação).

Na Figura 2.2 são mostrados os perfis da perda de carga na tubulação obtidos através da simulação e da aquisição de dados. A simulação foi baseada em uma tubulação reta de 20 m de comprimento e condições de contorno foram necessárias nas extremidades, onde não há equações para relacionar as variáveis do processo, adotando reservatório a montante e válvula a jusante; enquanto os dados experimentais foram obtidos de uma tubulação que apresentava curvas e as medidas foram feitas por transdutores localizados nas extremidades, o que levou à diferenças nos perfis de pressão.

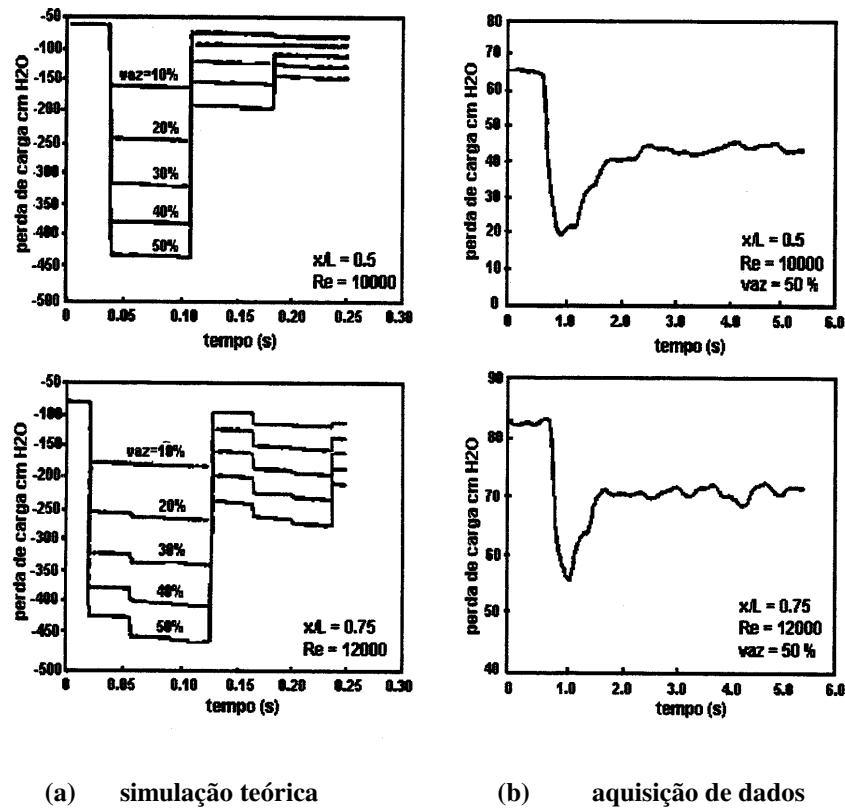


Figura 2.2 – Perfis dos gradientes de pressão obtidos Naves

Os resultados mostraram o aumento da variação da perda de carga com o aumento da vazão do líquido e do vazamento, esta variação depende da posição do vazamento na tubulação.

Vazamentos da ordem de 0,5% da vazão nominal do escoamento foram detectados. A localização não foi possível. O tempo de detecção constituiu basicamente do tempo de resposta do transdutor, não havendo diferenciação nítida entre os diversos tempos de detecção do transiente de perda de carga para as diferentes posições de vazamento.

Com o objetivo de detectar e localizar vazamentos BUIATTI (1995) usou o método de análise de transientes hidráulicos em uma tubulação de PVC de 427 m de comprimento, 3/4" de diâmetro. Foram fixados na tubulação 4 transdutores de pressão (do tipo piezoelétrico) a 6,5 m, 165,1 m, 262,3 m e 420,9 m da entrada da tubulação e válvulas solenóide-gaveta, responsáveis por gerar e controlar a magnitude do vazamento, a 85,7 m,

170,9 m e 256,2 m. Os transdutores e as válvulas foram conectados a um computador equipado com placa conversora ADA.

Experimentos foram feitos para o regime turbulento, com o número de Reynolds variando de 5000 a 13000. São identificados vazamentos da ordem de 0,5% a 150% da vazão inicial de escoamento, conforme mostra a Figura 2.3.

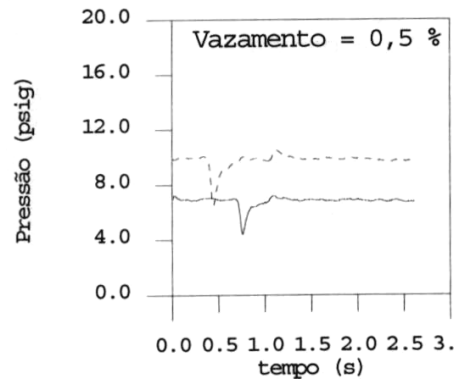


Figura 2.3 – Vazamento entre T1 e T2. Re 9000 (BUIATTI)

Foi determinado o valor experimental da velocidade de propagação da onda. Os resultados mostram que a velocidade diminui com o aumento da vazão de líquido e da distancia entre o vazamento e os transdutores, sendo maior nas regiões de maior pressão no interior da tubulação.



Figura 2.4 – Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores 2 e 3

A localização do vazamento pode ser expressa em termos da distância Y entre o vazamento e o transdutor mais próximo, para o caso da Figura 2.4 teremos:

$$Y = \frac{[L_2 + v(t_2 - t_3)]}{2} \quad (2.1)$$

$$v = \frac{L_1}{(t_1 - t_2)} \text{ ou } v = \frac{L_3}{(t_4 - t_3)} \quad (2.2)$$

onde L_2 é a distância entre os transdutores 2 e 3 ; t_2 e t_3 os tempos de detecção dos transdutores T2 e T3 e v a velocidade de propagação da onda de pressão.

O método provou ser capaz de localizar vazamentos com precisão, sendo que quanto menor a distância entre os transdutores e o local do vazamento, menor o erro de localização.

SILVA (1996) estendeu o trabalho para o regime laminar, com o Número de Reynolds variando de 1000 a 12000, em uma tubulação de PVC de 1248 m de extensão e 3/4" de diâmetro. Vazamentos foram provocados através de válvulas solenóide-gaveta a 250 e 750 metros da entrada da tubulação. A aquisição de dados foi feita por um microcomputador com placa ADA ligado a 4 transdutores de pressão fixados a 494, 744, 994 e 1244 metros da entrada da tubulação.

Vazamentos da ordem de 9 a 100% foram facilmente detectados. A Tabela 2.2 mostra a precisão de localização do vazamento.

Tabela 2.2 – Precisão na localização de vazamentos. (SILVA, 1996)

Re	y ± erro (m)	y ± erro (m)
1000	243 ± 2,21	243 ± 4,46
2000	243 ± 4,75	243 ± 4,97
5000	243 ± 7,97	243 ± 7,94
7000	243 ± 2,63	243 ± 3,79
8000	243 ± 5,50	243 ± 3,01
12000	243 ± 4,80	243 ± 0,92

CARIATTI (1999) usou a tubulação nas mesmas configurações que o trabalho anterior, a análise do perfil do transiente de pressão foi feita para casos em que o fluído era líquido (água) e misturas gás-líquido (ar-água).

Para tubulações transportando líquido a técnica detecta vazamentos da ordem de 10% em escoamento laminar e 2% em escoamento turbulento. Os valores calculados da velocidade da onda de pressão ficaram na faixa entre 490 e 540 m/s, mostrando-se praticamente independente do número de Reynolds e da magnitude e posição do vazamento, conforme a Figura 2.5.

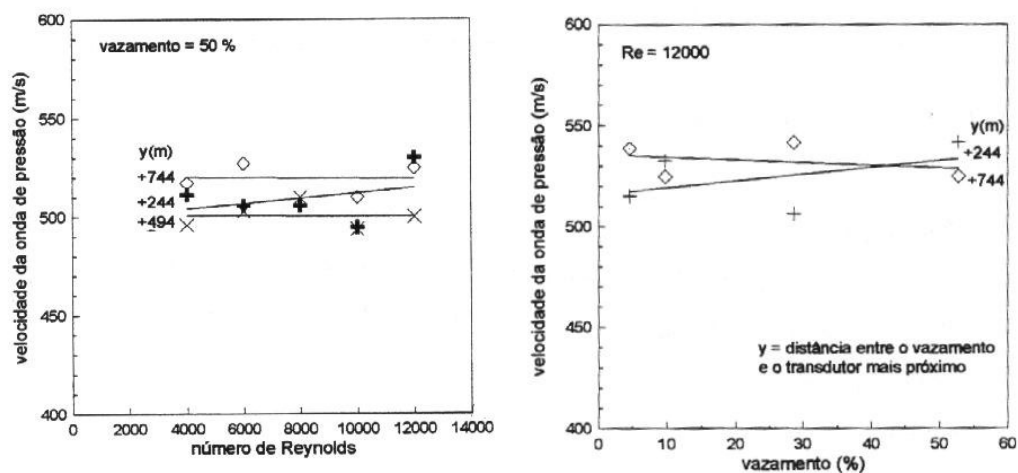


Figura 2.5 – Influencia do número de Reynolds e magnitude do vazamento na onda

Para mistura gás-líquido diferentes tipos de experimentos foram realizados:

- (a) Injeção de uma bolha de ar, sem ocorrência de vazamento: a presença da bolha não alterou o valor da pressão ao longo da tubulação.
- (b) Injeção de múltiplas bolhas, sem ocorrência de vazamento: os pulsos indicam a passagem das ondas de pressão pelos transdutores, o novo estado de equilíbrio alcançado é caracterizado por uma pressão maior do que aquela no estado inicial.
- (c) Injeção de uma bolha de ar, com ocorrência de vazamento: os resultados mostram que a pressão sofre uma brusca redução, mas seu valor não se recupera totalmente.
- (d) Escoamento contínuo de uma mistura ar-água, com ocorrência de vazamento: a ocorrência de vazamento foi detectada somente pelos transdutores mais próximos do vazamento e para vazamentos maiores de 30%. A velocidade da onda variou entre 43 e 76 m/s sendo que estes valores são 9 vezes menores do que aqueles medidos em uma tubulação transportando líquido.

A Figura 2.6 mostra um exemplo de cada caso. As condições de operação estudadas foram: número de Reynolds entre 2000 a 12000, porcentagem de vazamento entre 2 a 50% e vazão de ar entre 1,7 a 9,6 litros/min.

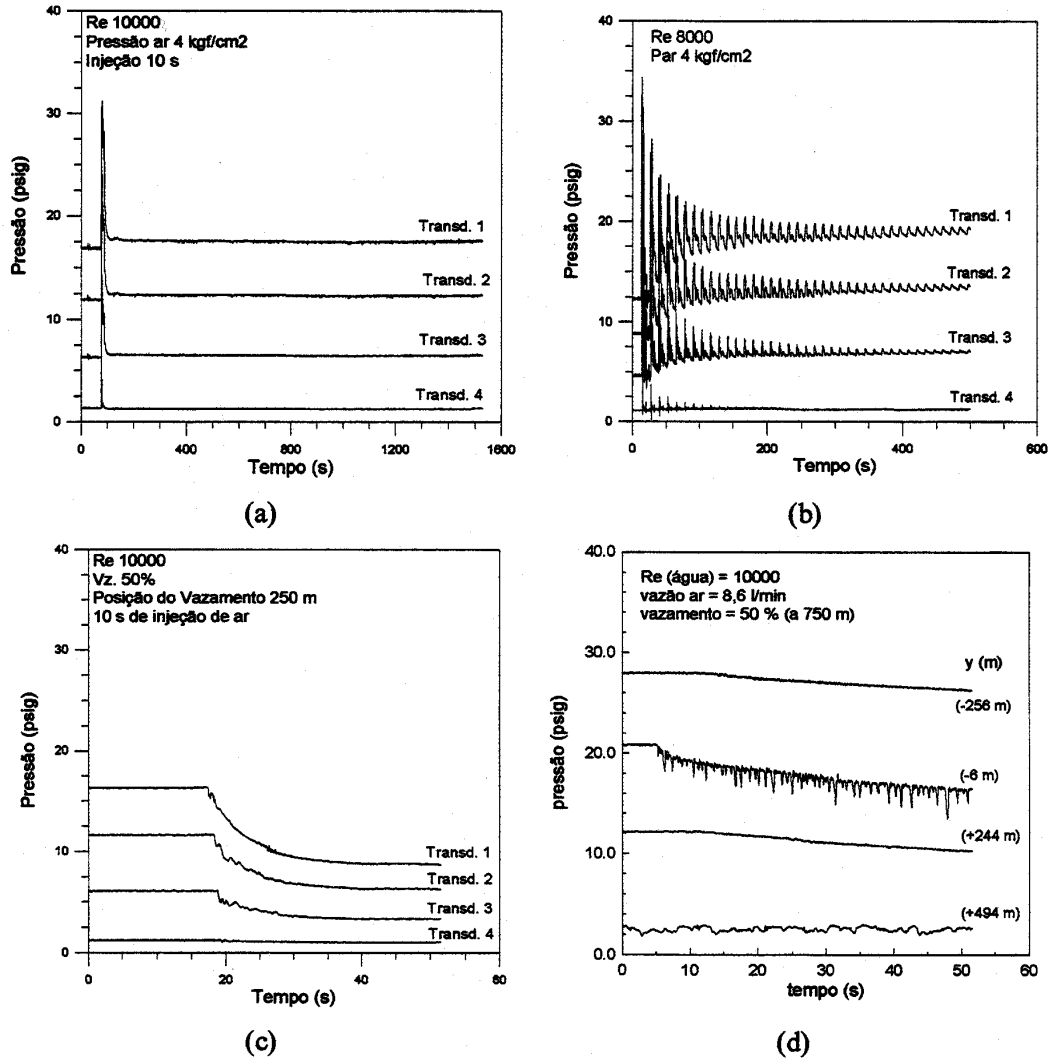


Figura 2.6 – Perfis de pressão obtidos por Cariatti.

Resultados mostram que o gás escoando na tubulação absorve grande parte do impacto causado pela onda de pressão, quando da ocorrência de vazamento, e também que existe maior dificuldade de propagação da onda de pressão no sentido contrário ao fluxo da tubulação.

BRAGA (2001) aprofundou o estudo realizado por CARIATTI (1999), detectando transientes de pressão causados por vazamentos na tubulação de 1248 m transportando ar-água.

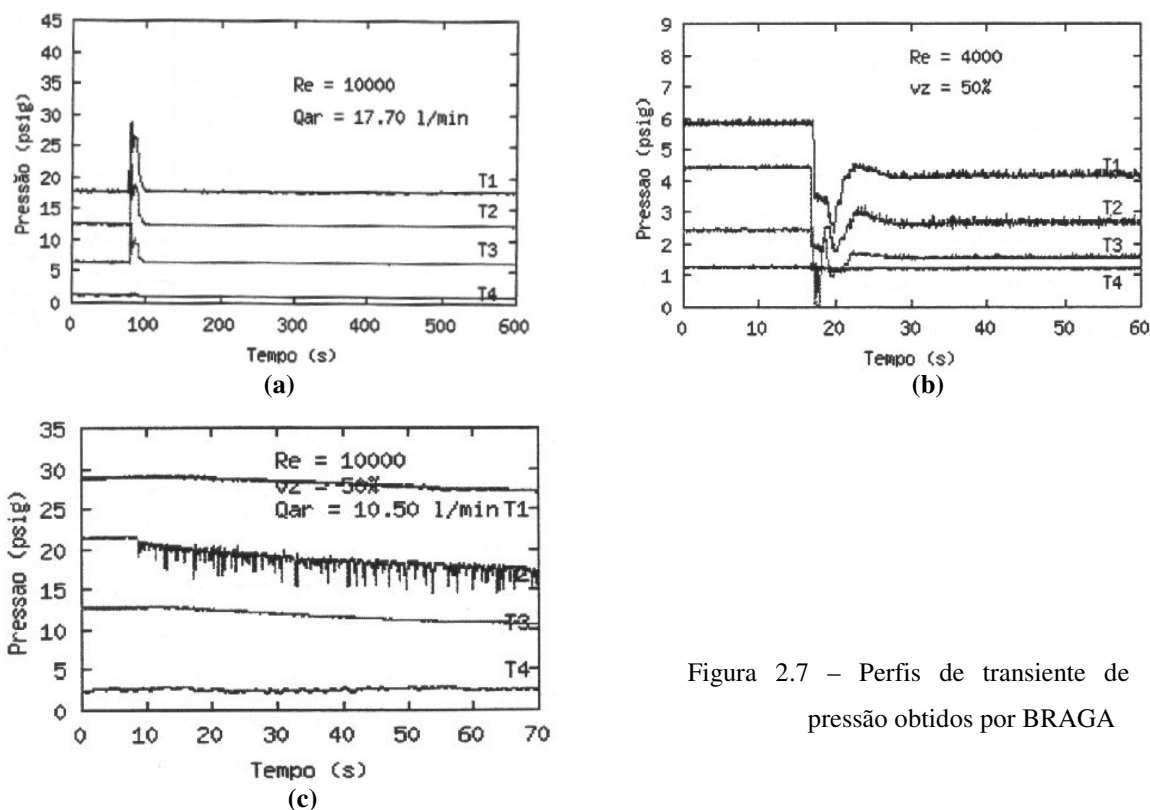


Figura 2.7 – Perfis de transiente de pressão obtidos por BRAGA

O estudo foi realizado para diferentes condições de operação da tubulação: número de Reynolds do líquido entre 4000 e 10000; porcentagem de vazamento de 10 a 50%; vazão de ar de 1,6 a 61,4 l/min; posição de vazamento a 250 m e 750 m da entrada da tubulação.

O trabalho experimental constituiu-se na detecção e análise de transientes de pressão gerados para os seguintes casos demonstrados na Figura 2.7:

(a) Injeção de bolhas isoladas de ar, sem vazamento; onde o escoamento das bolhas não altera o perfil da pressão ao longo da tubulação.

(b) Para a detecção de vazamentos na presença de uma única bolha de ar, os perfis obtidos mostram uma queda na pressão seguida de uma recuperação parcial. Para número de Reynolds e vazão de ar constante, o aumento na magnitude do vazamento aumenta a queda no valor da pressão e diminui sua recuperação. A detecção é afetada pela distância entre o vazamento e o transdutor e a quantidade de ar, que provoca um amortecimento na onda de pressão. A presença de ar gera reflexões da onda (efeito elástico) que interferem na detecção.

(c) Na detecção de vazamentos durante escoamento contínuos ar-água a queda de pressão menor se comparada ao caso anterior devido ao amortecimento. Para vazamentos a 750 m da entrada, a detecção só é possível para $Re > 6000$ e razão de vazamento maior que 30% da vazão nominal do líquido.

SOUZA (2002) desenvolveu uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações baseada na análise espectral de sinais de pressão medidos em trechos da tubulação (zona de reflexão) que favorecem a formação de ondas estacionárias. Este método possibilita a detecção de vazamentos mesmo quando este ocorre durante a realização de operações como partidas e paradas de bombas ou interrupção do fluxo. Estas operações geram transientes que podem encobrir o transiente de pressão gerado pelo vazamento.

Testes experimentais foram realizados em uma tubulação de 1250 m de extensão em várias configurações de fluxo e de vazamento durante a partida e a parada de uma bomba centrífuga.

Verificou-se que pela medida da fração energética em torno dos harmônicos associados ao trecho de reflexão é possível detectar a presença de vazamentos na tubulação com uma porcentagem de acerto superior a 70%.

3. Escoamentos Compressíveis

Escoamentos compressíveis são escoamentos nos quais a mudança na densidade induzida pela mudança na pressão no sistema tem uma influência significativa no fluxo.

Os escoamentos compressíveis de gás são analisados pela aplicação dos princípios da conservação de massa e momentum junto com uma equação de estado para deduzir as variações na velocidade, pressão, densidade e temperatura ao longo do campo do escoamento.

A seguir são desenvolvidas as equações que regem o transiente. Estas equações são usadas para desenvolver um programa que faz a simulação do transiente de pressão causado pelo vazamento na tubulação.

3.1 Equações diferenciais para o cálculo do transiente

A solução analítica para problemas de fluxo transiente é obtida pelo uso de equações da continuidade e do momentum. Essas equações correspondem ao princípio físico da conservação de massa e da Lei de Newton ($F = m.a$). Aplicando estas equações obtemos duas equações diferenciais parciais.

Para a dedução do modelo matemático do escoamento na tubulação são feitas as seguintes hipóteses:

- O fluido é compressível: a compressibilidade do fluido resulta em fluxo transiente.
- O escoamento é viscoso: a viscosidade resulta em força de cisalhamento no fluido em movimento.
- O escoamento é adiabático: não é considerada a transferência de energia entre o fluido e a tubulação. Conseqüentemente a temperatura T ao longo da tubulação é constante. (vide **Apêndice C**).

- O escoamento é unidimensional: todas as características da tubulação como a velocidade e a pressão dependem apenas do eixo x ao longo da tubulação.
- Para deduzir as equações consideramos um conduto de comprimento L e de diâmetro D constante.

3.1.1 Equação de Estado (STREETER, 1975)

A equação de estado para o gás pode ser escrita como:

$$p = \frac{z\rho RT}{M} \quad (3.1)$$

Onde p é a pressão absoluta, z o fator de compressibilidade, R a constante universal dos gases, ρ a massa especificado gás, M a massa molar e T a temperatura absoluta. Assumindo que a temperatura é constante, a velocidade da onda acústica será:

$$a = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \quad (3.2)$$

3.1.2 Equação da Continuidade

A lei da conservação de massa nos diz que a massa dentro de um volume de controle permanece constante. Para um gás em movimento dentro do volume de controle da Figura 3.1, a taxa do fluxo de massa global entrando no volume de controle é igual à taxa do fluxo de massa que deixa o volume de controle.

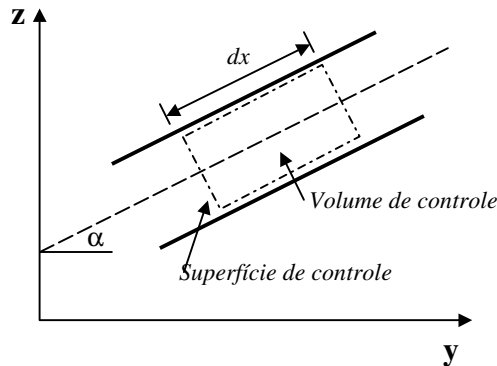


Figura 3.1 – Fluxo através do volume de controle

A massa presente no volume de controle V é:

$$m = \iiint_V \rho dV \quad (3.3)$$

O decréscimo de massa por unidade de tempo (dt) que ocorre no volume V é a somatória da massa que entra e sai de cada extremidade da tubulação, ou

$$dm = dt \iint_A \rho v dA \quad (3.4)$$

Outra expressão para o decréscimo de massa por unidade de tempo no volume V é

$$dm = -dt \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (3.5)$$

Igualando as duas equações e modificando obtemos:

$$\iiint_V \left[\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] dV = 0 \quad (3.6)$$

Desde que a equação acima seja verdadeira para todo valor de V , a condição abaixo deve ser satisfeita.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0 \quad (3.7)$$

Esta é a forma conservativa da equação da continuidade para o caso unidimensional. Desde que a taxa de fluxo de massa pode ser substituída por $q = A\rho v$, e da equação (3.2) temos que $\partial \rho = \partial p / a^2$, a equação (3.7) assume a seguinte forma:

$$\frac{A}{a^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (3.8)$$

3.1.3 Equação do Momentum

A segunda lei de Newton diz que a força agindo sob uma partícula de massa fixa em um determinado instante é igual á taxa de variação do momento da partícula no instante. Se considerarmos a partícula como um elemento do gás movimentando-se na direção x , temos:

$$\sum F_x = \frac{d}{dt}(mv) \quad (3.9)$$

onde: F_x é a componente na direção do movimento das forças agindo sob o elemento de gás.

Para um escoamento de gás passando pelo volume de controle a força global (na direção do movimento) agindo no gás dentro do volume é igual á taxa da variação do momento dentro do volume de controle mais a diferença entre o fluxo de momento entrando e saindo. O termo $(dm/dt)v$ é chamado fluxo de momento.

$$\frac{d}{dt}(mv) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho Av) dx + \frac{\partial}{\partial x}(\rho Av^2) dx \quad (3.10)$$

A força global na direção do fluxo consiste na somatória de todas as forças agindo sob o fluxo dentro da superfície de controle, elas são as seguintes:

1. A força global devido à gravidade agindo sob o gás dentro da superfície de controle é $g\rho A dx$, e a componente horizontal dessa força é:

$$g\rho A dx \sin\alpha \quad (3.11)$$

onde g é a força global devido a gravidade por unidade de massa e α é o ângulo entre a horizontal e a direção x .

$$2. \text{ A força devido a pressão} = pA - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) A = -\frac{\partial p}{\partial x} A dx \quad (3.12)$$

na direção do movimento.

3. A força de cisalhamento, que é devido ao atrito, é caracterizada pela expressão:

$$\text{Força de cisalhamento} = -\rho \frac{Av^2}{2} f \frac{dx}{D} \quad (3.13)$$

onde f é o coeficiente de atrito adimensional de Darcy, D é o diâmetro interno.

Substituindo as equações (3.10) a (3.13) na equação (3.9), e dividindo por $A \cdot dx$ obtemos:

$$\sum F_x = \frac{d}{dt}(mv) \Rightarrow -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\rho v^2}{2} \frac{f}{D} - g\rho \sin \alpha = \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v^2) \quad (3.14)$$

A forma geral da equação do momentum para o fluxo unidimensional com f de acordo com o regime é a seguinte:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha + \frac{f}{D} \rho \frac{v^2}{2} = 0 \quad (3.15)$$

Usando a equação $q = A\rho v$ e desprezando a normalmente pequena derivada convectiva

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \approx \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.16)$$

Obtemos:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha + \frac{f}{2DA^2 \rho} q^2 = 0 \quad (3.17)$$

As equações (3.8) e (3.17) representam os parâmetros não lineares distribuídos do modelo do conduto. São equações diferenciais em termos de duas variáveis dependentes, a taxa de fluxo de massa $q(x,t)$ e a pressão $p(x,t)$, e duas variáveis independentes, a distância ao longo da tubulação x e o tempo t . Uma solução geral não é disponível, mas a transformação em quatro equações diferenciais ordinárias agrupadas em dois pares de equações pelo método das características é possível.

3.1.4 Equação do Estado Estacionário

No estado estacionário o fluxo de massa se torna constante e $\partial q / \partial t = 0$, a equação (3.17) assume a seguinte forma:

$$dp + \left(\rho g \sin \alpha + \frac{f q^2}{2DA^2 \rho} \right) dx = 0 \quad (3.18)$$

Sendo a tubulação reta, usando a equação $\partial \rho = \partial p / a^2$ e integrando entre os limites, de $x = 0$, $p = p_j$ a $x = \Delta x$, $p = p_{j+1}$.

$$p_{j+1}^2 = p_j^2 - \frac{fa^2 q^2}{DA^2} \Delta x \quad (3.19)$$

Para fazer a simulação não foi utilizada a equação do estado estacionário porque a detecção do vazamento foi realizada em uma tubulação pressurizada, assim no estado estacionário a pressão na tubulação é considerada constante e igual a pressão inicial.

3.1.5 Perda de carga distribuída

Na equação do momentum o fator de atrito é calculado pela equação de Churchill. CHURCHILL (1977). Esta equação relaciona o fator de atrito com o número de Reynolds, Re , e com a rugosidade relativa, ε/D , em uma equação válida para todos os regimes de escoamento e uma grande faixa de valores da rugosidade de tubos.

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-3/2} \right]^{1/12} \quad (3.20)$$

onde:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.21)$$

$$A = (-2.457 \ln C)^{16} \quad (3.22)$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (3.23)$$

$$C = \left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D} \quad (3.24)$$

3.2 Método das características

Para simplificar a resolução das equações diferenciais será utilizado o método das características, que transforma as equações diferenciais parciais em equações ordinárias, serão desenvolvidas também as condições de contorno, permitindo assim a solução das equações.

Reescrevendo as equações da continuidade e do momentum:

Equação da continuidade:
$$L_1 = \frac{A}{a^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (3.25)$$

Equação do momentum:
$$L_2 = \frac{1}{A} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha + \frac{f}{2DA^2 \rho} q^2 = 0 \quad (3.26)$$

Para introduzir o sinal adequado q^2 é expresso por $q|q|$. Combinando linearmente as equações por um multiplicador, λ , temos:

$$L = \frac{A}{a^2} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\lambda a^2}{A} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\lambda}{A} \left[\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{A}{\lambda} \frac{\partial q}{\partial x} \right] + \lambda \left[\rho g \sin \alpha + \frac{f}{2DA^2 \rho} q|q| \right] \quad (3.27)$$

Para o primeiro termo entre colchetes ser a derivada total dp/dt :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\lambda a^2}{A} \quad (3.28)$$

Para o segundo termo entre colchetes ser a derivada total dq/dt :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A}{\lambda} \quad (3.29)$$

uma vez que:
$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{e} \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial q}{\partial t} \quad (3.30)$$

Igualando (3.28) com (3.29):

$$\lambda = \pm \frac{A}{a} \quad (3.31)$$

Os dois valores de λ determinados transformam as derivadas parciais em um par de equações diferenciais totais, condicionadas pelas equações (3.28) e (3.29).

$$\left. \begin{aligned} \frac{A}{a} \frac{dp}{dt} + \frac{dq}{dt} + A \left(\rho g \sin \alpha + \frac{f}{2DA^2 \rho} q|q| \right) &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= +a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (3.32)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{A}{a} \frac{dp}{dt} - \frac{dq}{dt} - A \left(\rho g \sin \alpha + \frac{f}{2DA^2 \rho} q|q| \right) &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= -a \end{aligned} \right\} C^- \quad (3.33)$$

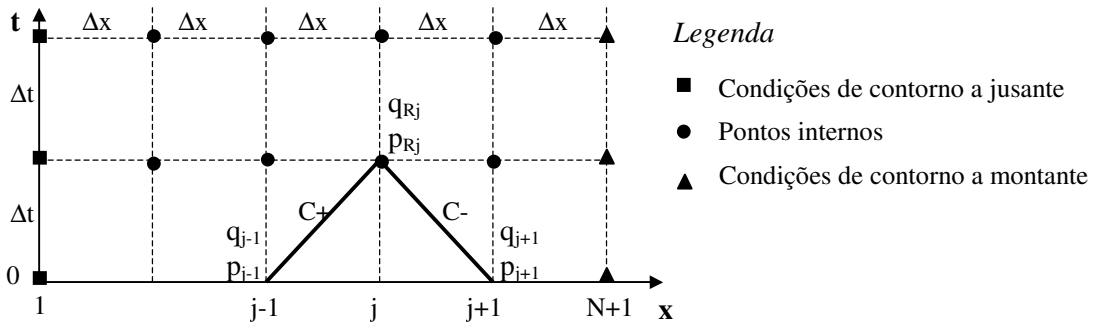


Figura 3.2 – Grade retangular para solução das equações das características

As equações (3.33) e (3.35) são representadas no plano x-t como duas linhas retas com inclinação $\pm 1/a$, conhecidas como linha das características, como pode ser observado na Figura 3.2. O significado físico que elas representam é o caminho percorrido pela perturbação. A equação (3.32) é válida somente ao longo da característica C+ e a equação (3.34) tem validade ao longo da característica C-, ambas são válidas ao longo do comprimento do conduto ($0 < x < L$) e as condições de contorno fornecem informações das extremidades ($x = 0$ e $x = L$). O conduto é dividido em N partes, q e p são inicialmente conhecidos no começo de cada seção (ou calculados no passo anterior). Pela grade da

Figura 3.2 vemos que o incremento no tempo é $\Delta t = \Delta x/a$. Temos como objetivo calcular as condições desconhecidas a $t = t_0 + \Delta t$.

Como os intervalos de tempo são pequenos podemos utilizar o método das diferenciais finitas de primeira ordem. Multiplicando as equações das características por dt e integrando ao longo da respectiva linha da característica:

$$q_{Rj} - q_{j-1} + \frac{A}{a}(p_{Rj} - p_{j-1}) + A\rho \Delta t g \sin \alpha + \frac{f \Delta t}{2DA\rho} q_{j-1} |q_{j-1}| = 0 \quad (3.36)$$

$$q_{Rj} - q_{j+1} - \frac{A}{a}(p_{Rj} - p_{j+1}) + A\rho \Delta t g \sin \alpha + \frac{f \Delta t}{2DA\rho} q_{j+1} |q_{j+1}| = 0 \quad (3.37)$$

As equações acima podem ser escritas na forma:

$$q_{Rj} = C_R - C_a p_{Rj} \quad (3.38) \quad \text{e} \quad q_{Rj} = C_n + C_a p_{Rj} \quad (3.39)$$

Onde:

$$C_R = q_{j-1} + \frac{A}{a} p_{j-1} - A\rho \Delta t g \sin \alpha - \frac{f \Delta t}{2DA\rho} q_{j-1} |q_{j-1}| \quad (3.40)$$

$$C_n = q_{j+1} - \frac{A}{a} p_{j+1} - A\rho \Delta t g \sin \alpha - \frac{f \Delta t}{2DA\rho} q_{j+1} |q_{j+1}| \quad (3.41)$$

$$C_a = \frac{A}{a} \quad (3.42)$$

Resolvendo (3.38) e (3.39) simultaneamente: $q_{Rj} = 0,5 (C_R + C_n)$ (3.43)

A simulação do transiente é feita considerando a tubulação dividida em N partes, as condições do estado estacionário, q_j e p_j , a $t = t_0$, são obtidas em todos os pontos. Para determinar as condições em $t = t_0 + \Delta t$ obtemos q_{Rj} pela equação (3.43) e p_{Rj} pela equação (3.38) ou (3.39), com j variando de 2 a N . Utilizamos as condições de contorno para calcular q_{R1} , p_{R1} , p_{Rn+1} e q_{Rn+1} . Substituímos os valores de q_j e p_j pelos q_{Rj} e p_{Rj} calculados, é feito novo incremento no tempo e o procedimento é repetido.

3.3 Condições de contorno

As condições de contorno são desenvolvidas pela solução da equação (3.38) para contornos a jusante ou equação (3.39) para contornos a montante, junto com as condições impostas pela vizinhança. A condição deve ser um valor constante de uma das variáveis, uma variação específica de uma das variáveis com o tempo ou uma relação em forma de uma equação diferencial.

3.3.1 Reservatório a montante

Se a perda de carga e a velocidade na entrada da tubulação são desprezíveis temos que $P_{R1} = P_{res}$, onde, P_{res} é a pressão do gás no reservatório. Substituindo na equação (3.39) para $j = 1$, obtemos:

$$q_{R1} = C_n + C_a P_{res} \quad (3.44)$$

3.3.2 Vazamento

A tubulação será considerada como sendo uma junção de duas seções para determinarmos as condições de contorno no caso de vazamento.

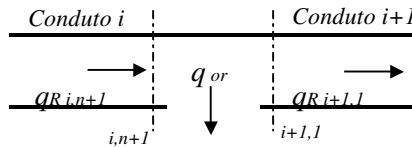


Figura 3.3 – Condições de contorno: vazamento

Cada seção é dividida em n trechos, e são separadas na posição onde ocorreu a ruptura (Figura 3.3). Utiliza-se dois subscritos, o primeiro para designar o número da seção enquanto o segundo deve indicar o número do trecho.

Se a diferença na velocidade nos trechos $(i, n+1)$ e $(i+1, 1)$ e a perda de carga no vazamento são desprezíveis, então:

$$p_{R_{i,n+1}} = p_{R_{i+1,1}} \quad (3.45)$$

As equações das características negativa e positiva para o trecho (i, n+1) e (i+1, 1) são:

$$q_{R_{i,n+1}} = C_R - C_a p_{R_{i,n+1}} \quad (3.46)$$

$$q_{R_{i+1,1}} = C_n + C_a p_{R_{i+1,1}} \quad (3.47)$$

A equação da continuidade na abertura é:

$$q_{R_{i,n+1}} = q_{R_{i+1,1}} + q_{or} \quad (3.48)$$

onde: $q_{R_{i,n+1}}$ é a vazão do fluido antes do vazamento, $q_{R_{i+1,1}}$ é a vazão do fluido após o vazamento, q_{or} é a vazão do fluido no vazamento.

A vazão do fluido no vazamento será calculada a partir da equação (C.7), que é utilizada no **Apêndice C** para calcular a porcentagem de vazamento na tubulação com escoamento. Para o cálculo da vazão em massa, a equação (C.7) pode ser escrita como:

$$q_{or} = \rho \cdot Y \cdot C' \cdot (0,7854 \cdot D_{or}^2) \sqrt{\frac{2 \Delta p_{or}}{\rho}} \quad (3.49)$$

onde Y é o fator de expansão, C' o coeficiente de fluxo, d_{or} o diâmetro do orifício de vazamento e Δp_{or} o diferencial de pressão no orifício. Para a simulação é adotado o valor médio de 0,75 para o fator Y e de 0,72 para C' .

Resolvendo simultaneamente as equações (3.45) a (3.49) em termos de $p_{R_{i,n+1}}$ temos:

$$p_{R_{i,n+1}} = \frac{C_R - q_{or} - C_n}{2C_a} \quad (3.50)$$

Agora $p_{R_{i+1,1}}$, $q_{R_{i,n+1}}$ e $q_{R_{i+1,1}}$ podem ser determinados pelas equações (3.45) a (3.47).

3.3.3 Orifício a jusante

O fluxo de gás através do orifício é calculado pela equação (3.49). E a pressão é calculada pela equação a seguir:

$$p_{R_{n+1}} = \frac{C_r - q_{R_{n+1}}}{C_a} \quad (3.51)$$

onde $q_{R_{n+1}} = q_{or}$, calculado pela equação (3.49). Para a simulação foi adotado um orifício de 1 mm, conforme o procedimento experimental.

3.3.4 Tempo de integração

O tempo de integração escolhido deve satisfazer a condição de estabilidade de Courant:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad (3.52)$$

Essa condição nos diz que o comprimento das divisões de qualquer seção da tubulação deve ser maior ou igual a $a\Delta t$, assim a equação abaixo pode ser usada para obter o tempo de integração.

$$\Delta t = \frac{L_j}{a_i n_i} \quad (i = 1 \text{ a } N) \quad (3.53)$$

Onde n_i é o número de divisões da seção da tubulação e N o número de seções do sistema.

Como o sistema adotado na simulação é linear o problema de convergência não é tão significativo, mesmo assim é importante respeitar o intervalo de tempo para garantir a coerência entre os resultados. Para as condições adotadas na simulação (vide **Apêndice D** e **Apêndice G**) o intervalo de tempo Δt é de 0,0023 segundos.

No **Apêndice D** encontram-se os parâmetros, as etapas e o resultado da simulação do transiente causado pelo vazamento em uma tubulação com escoamento contínuo.

No **Apêndice G** encontra-se a listagem do programa de simulação.

4. Equipamentos e Métodos

Neste trabalho, as características dos transientes de pressão gerados pela ocorrência de vazamento em uma tubulação transportando gás foram analisadas em duas situações:

1. Ocorrência de vazamento em um trecho de tubulação de 6 metros de comprimento, fechado na extremidade de saída, de modo que não havia escoamento de gás ao longo da tubulação.
2. Ocorrência de vazamento em uma tubulação de 60 metros de comprimento, com escoamento contínuo de gás.

As duas tubulações foram construídas com tubos de ferro galvanizado de ½” de diâmetro. O vazamento é provocado manualmente através de uma válvula de abertura/fechamento rápido, instalada em uma saída lateral na entrada da tubulação. A magnitude do vazamento é controlada pela instalação de orifício de diâmetro variável em uma seção da saída lateral, anterior à válvula.

O fluido que escoar na tubulação é ar, que provém da linha de ar comprimido que serve os laboratórios da FEQ. A pressão do ar é medida através de um manômetro instalado na entrada da tubulação. A pressão máxima na linha é de 7 kgf/cm^2 (~100 psig).

Dois transdutores de pressão foram conectados à tubulação. O primeiro está localizado junto à posição do vazamento na entrada da tubulação e o outro está localizado no final da linha. Os transdutores de pressão permitem monitorar a tubulação, estando conectados a um microcomputador PC através de uma placa ADA.

Vazamentos foram simulados experimentalmente para várias condições de operação:- pressão do ar na tubulação, magnitude do vazamento (diâmetro do orifício), razão do vazamento (razão entre a magnitude do vazamento e a quantidade de ar na tubulação).

4.1 Detecção de vazamento em trecho fechado de tubulação

A primeira parte do trabalho constitui na detecção de vazamentos em trecho fechado de tubulação. Esta situação pode ser encontrada na prática nos casos em que a tubulação está parada, aguardando requisição de demanda de gás por parte do consumidor.

Os experimentos foram conduzidos em uma tubulação de 6 metros de comprimento, onde a extremidade de saída foi fechada, transformando a tubulação em uma espécie de vaso de pressão. Após a alimentação de ar ser concluída a tubulação foi isolada da linha central de ar comprimido, através do fechamento de uma válvula gaveta. O vazamento foi então provocado a partir dessa situação “estática”.

A montagem experimental utilizada para simular o vazamento em uma tubulação estática é mostrada na Figura 4.1.

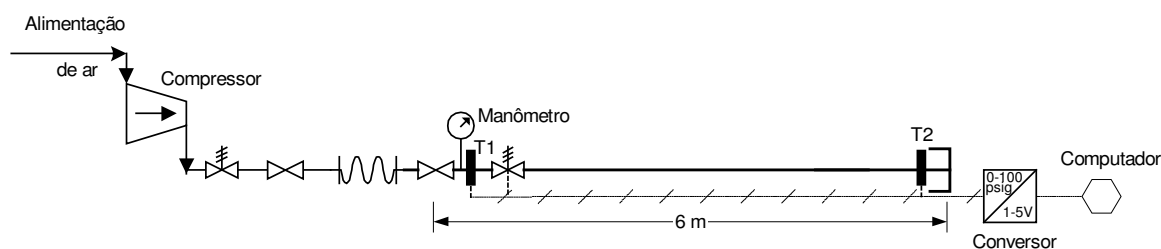


Figura 4.1 – Esquema do trecho fechado de tubulação.

Transientes de pressão foram detectados e analisados para vazamentos de 100% do ar contido na tubulação e para razões de vazamento intermediárias. Os orifícios utilizados para simular vazamentos de diferentes magnitudes apresentaram diâmetros de: 0,7; 1; 2; 3; 4 e 5 mm.

A válvula que provoca o vazamento está também conectada ao computador, de modo que este começa a armazenar os dados no instante em que ela é aberta. Quando a válvula está aberta ela emite ao computador um sinal de 5 V e quando fechada um sinal de 0 V. Esses sinais são adquiridos pelo computador junto com o sinal dos transdutores de

pressão e é possível determinar o tempo que a válvula permaneceu aberta, ou seja a duração do vazamento (Figura 4.2).

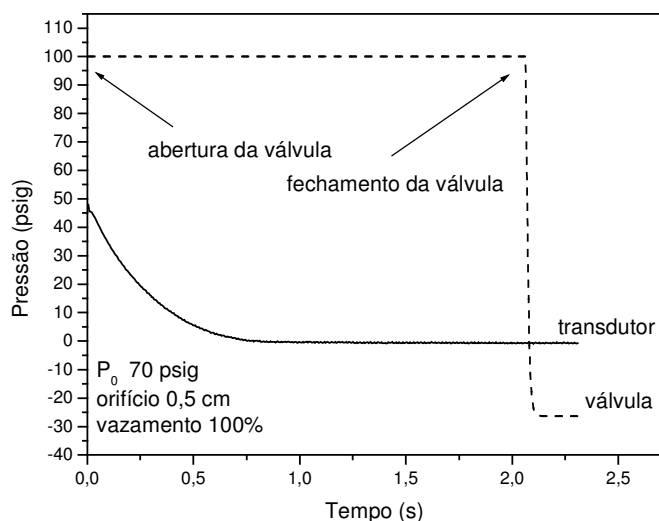


Figura 4.2 – Sinal emitido pela válvula e pelo transdutor de pressão

Assim, conhecendo a magnitude do vazamento, o tempo que a válvula permaneceu aberta e a pressão inicial é possível calcular a razão de vazamento. Todos os cálculos estão demonstrados no **Apêndice C**.

Diversos experimentos foram realizados variando-se o tempo do vazamento, a pressão no interior da tubulação e a magnitude do vazamento (diâmetro do orifício). A Tabela 4.1 mostra as condições experimentais utilizadas nos experimentos com a tubulação fechada.

Tabela 4.1 – Condições experimentais – Tubulação com trecho fechado.

Diâmetro do orifício (magnitude do vazamento)	0,7; 1; 2; 3; 4 e 5 mm
Pressão inicial	16 a 80 psig
Porcentagem de vazamento	100% e valores intermediários

4.2 Detecção de vazamento em tubulação com escoamento contínuo

Neste caso os experimentos foram realizados em uma tubulação de 1/2" de diâmetro e 60 m de comprimento, construída a partir de tubos de ferro galvanizado de 6 m de comprimento e unidos com cotovelos de 90 °. Na extremidade de saída da tubulação foi instalado um orifício de 0,7mm, para manter a tubulação pressurizada. O esquema da tubulação é mostrado na Figura 4.3.

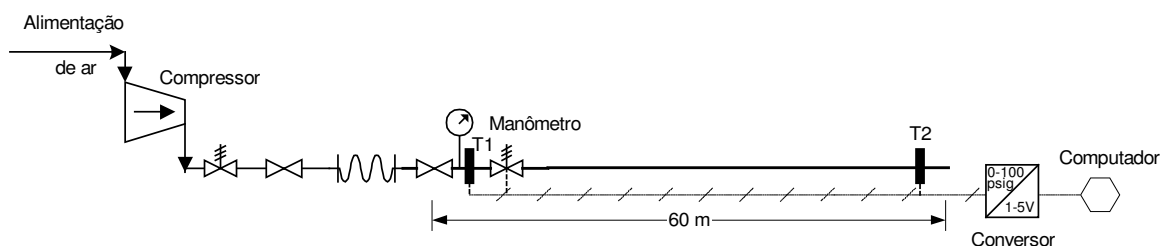


Figura 4.3 – Esquema da tubulação com escoamento contínuo.

A vazão de ar fluindo na tubulação foi estimada através das equações encontradas no PERRY (1980). Os cálculos estão demonstrados no **Apêndice D**.

Tabela 4.2 – Condições experimentais – Tubulação com escoamento contínuo.

Diâmetro do orifício (magnitude do vazamento)	1; 2; 3; 4 e 5 mm
Pressão na tubulação	16 a 80 psig
Porcentagem de vazamento	3 a 74 %

4.3 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é constituído pelos seguintes instrumentos: transdutores de pressão, conversor Analógico/ Digital/ Analógico e microcomputador, além do programa de aquisição de dados.

4.3.1. Transdutores de Pressão

Os transdutores de pressão transformam medidas de pressão em voltagem. Os transdutores usados neste trabalho são do tipo piezoelétricos, eles são constituídos de um material sólido que tem a capacidade de gerar uma carga elétrica proporcional à deformação sofrida, produzindo uma diferença de potencial entre os eletrodos. A diferença de potencial gerada é transmitida a um amplificador, que amplia este sinal e o envia ao microcomputador. O sinal elétrico emitido pelos transdutores é um sinal na faixa de 1 a 5V. É necessário que este sinal seja discretizado e convertido. Cada transdutor permite uma carga máxima de pressão para a qual foi projetado, conforme mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Faixa de pressão dos transdutores.

Transdutor	Pressão máxima especificada (psig)
T1	300
T2	100

4.3.2. Placa Conversora Analógica-Digital-Analógica (ADA)

A placa ADA utilizada é composta de um multiplexador, um conversor analógico-digital e um conversor digital-analógico.

Como todos os transdutores enviam seus sinais ao micro simultaneamente, e estes sinais são de natureza analógica, é necessário utilizar um multiplexador e um conversor analógico digital em conjunto com o micro. O multiplexador possibilita ao micro ter acesso aos sinais dos transdutores alternadamente, enquanto o conversor analógico-digital (CAD) discretiza estes sinais e os transforma em números binários. O multiplexador utilizado possui 8 portas para receber os sinais enviados pelos transdutores.

O CAD é constituído por um sampler e por uma placa conversora de sinais analógicos em digitais. O sampler funciona como um interruptor permitindo a passagem da corrente elétrica em intervalos regulares de tempo, sua função é discretizar os sinais contínuos enviados pelo transdutor. O sinal discretizado é de natureza analógica, que não é reconhecido diretamente pelo computador. O CAD é o responsável por transformar sinais analógicos em palavras de 12 bits.

Conversão do sinal analógico em digital

Os transdutores de pressão utilizados transmitem um sinal analógico à placa ADA na faixa de 1 a 5 V. Este sinal é convertido em número decimal equivalente na faixa de 1012 a 4095, de acordo com a relação:

$$\frac{(SD - 1012)}{(4095 - 1012)} = \frac{(SA - 1)}{(5 - 1)} \quad (4.1)$$

onde SA é sinal analógico e SD sinal digital.

Este sinal é convertido em sinal de pressão na subrotina leitura do programa de aquisição de dados. O sinal digital é proporcional à pressão máxima permitida pelo transdutor.

Como exemplo, para o transdutor de pressão máxima de 100 psig temos:

$$P = 100 \frac{(SD - 1012)}{(4095 - 1012)} \quad (4.2)$$

4.3.3. Microcomputador

O microcomputador tem como funções: receber os dados emitidos pelos transdutores, arquivá-los e apresentar os dados experimentais em forma gráfica ao usuário. Utilizou-se um computador PC 486 DX, 50 MHz, Winchester 250 MB, 8 MB RAM.

Temporização

A temporização é feita para garantir a correspondência entre o tempo e as leituras de pressão. Para determinar o intervalo de tempo gasto para a execução de cada laço de

leitura nos programas de aquisição de dados utiliza-se o relógio interno do microcomputador através da subrotina *clock()* e da biblioteca *time.h* da linguagem C.

A subrotina leitura realiza a aquisição de dados, conversão de sinais analógicos em digitais, conversão do sinal digital em unidades de pressão e filtragem dos dados através do cálculo do valor médio de um determinado número de leituras. Para garantir a exata correspondência entre as variáveis do processo, o tempo gasto na realização destas tarefas deve ser incorporado ao tempo gasto pelo transdutor para realizar a leitura.

O intervalo de tempo entre duas leituras sucessivas de um dado transdutor pode ser calculado de duas maneiras. A primeira é arquivar o valor de *clock()* como *tempo1* ao iniciar a leitura e para cada final de uma leitura é associado um *tempo2*, a diferença entre *tempo1* e *tempo2* corresponde ao tempo gasto entre pontos sucessivos.

A segunda maneira é arquivar o valor de *clock()* como *tempo1* ao iniciar a leitura e no final da leitura de *n* pontos é associado um *tempo2*, a diferença é dividida pelos *n* pontos lidos. Ao dividir este valor pelo número de vezes que foi realizado o laço de leitura, obtemos o intervalo de tempo consumido entre duas leituras seguidas de um transdutor.

Filtragem dos dados

Ruídos gerados por instrumentos de medição, equipamentos elétricos ou variáveis do processo (ex: variações na vazão do escoamento) podem interferir na aquisição de dados dificultando a identificação do vazamento. A filtragem dos dados possibilita a redução de ruídos. Neste trabalho utilizou-se um filtro de média aritmética e um filtro exponencial duplo.

Média aritmética

É o cálculo da média de um determinado número de medidas sucessivas, este valor médio é considerado como sendo o valor filtrado de uma determinada variável, para o intervalo de tempo consumido durante as medidas. Para sistemas com ruídos de alta frequência a redução não é considerada satisfatória, assim a média aritmética é considerada como um pré-filtro em um sistema de aquisição de dados, sendo necessária a utilização de outro filtro.

Filtro exponencial duplo

A equação (4.3) indica que o valor filtrado no instante t , é função do valor medido no mesmo instante e dos valores filtrados nos instantes $t-1$ e $t-2$. Estudos realizados por NAVES (1991) mostram que os melhores resultados de filtragem foram obtidos utilizando-se $a = 0,5$; este será o valor utilizado no sistema de aquisição de dados.

$$\overline{Y}_n = a^2 . X_t + 2.(1 - a) . \overline{Y}_{t-1} - (1 - a)^2 . \overline{Y}_{t-2} \quad (4.3)$$

onde Y corresponde ao valor filtrado e X á medida de pressão do transdutor.

4.3.4. Programas de aquisição de dados

São responsáveis por gerenciar o funcionamento dos equipamentos de forma a fornecer os dados organizados e de forma gráfica.

Os programas de aquisição de dados, elaborados em linguagem C, apresentam as seguintes tarefas:

1. Leitura dos dados no estado estacionário.
2. Conversão dos dados lidos em sinais digitais e em sinais de pressão.
3. Apresentação na tela do perfil de pressão do estado estacionário.
4. Abertura manual da válvula para provocar o vazamento.
5. Leitura dos dados em estado transiente.
6. Conversão dos dados lidos em sinais digitais e em sinais de pressão.
7. Apresentação do perfil de pressão, e do sinal correspondente à válvula.
8. Arquivo dos dados de perfil de pressão com o tempo.

No programa utilizado na tubulação com escoamento existe apenas uma etapa de leitura e impressão de dados na tela, apresentando as seguintes tarefas:-

1. Início da leitura dos dados (tubulação encontra-se no estado estacionário).
2. Abertura manual da válvula para provocar o vazamento.
3. Término da leitura dos dados.
4. Conversão dos dados lidos em sinais digitais e em sinais de pressão.
5. Apresentação do perfil de pressão, e do sinal correspondente à válvula.
6. Arquivo dos dados de perfil de pressão com o tempo.

A listagem do programa de aquisição de dados para o trecho fechado de tubulação encontra-se no **Apêndice H**.

4.3.5. Procedimento experimental

As etapas do procedimento experimental são as seguintes:

Para o trecho de tubulação fechado

1. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento.
2. A tubulação é preenchida com ar comprimido a determinada pressão e a válvula entre a tubulação e a entrada de ar é fechada.
3. Obtém-se os dados referentes ao estado estacionário.
4. É provocado o vazamento manualmente, controlando o tempo que a válvula ficou aberta.
5. Ao abrir a válvula o computador começa a adquirir os dados do estado transiente.

6. Pelos dados adquiridos é possível saber com exatidão o tempo do vazamento para posteriormente calcular a razão de vazamento.

Para a tubulação com escoamento contínuo

1. Instalação do orifício que controla a magnitude do vazamento.
2. É feita a regulação da pressão no compressor, a válvula entre o compressor e a tubulação é aberta, deixando o fluxo de ar escoar pela tubulação.
3. O programa começa a adquirir os dados.
4. É provocado o vazamento manualmente
5. A aquisição de dados é encerrada depois de um tempo determinado no programa
6. A válvula do vazamento é fechada manualmente.

5. Resultados e Análise

5.1 Detecção de vazamento em trecho fechado da tubulação

A seguir são apresentados e analisados os transientes de pressão gerados por vazamento em trecho fechado da tubulação. As Figuras 5.1 a 5.3 mostram os transientes de pressão utilizando-se os orifícios de 1 mm; 3 mm e 5 mm, para diferentes pressões iniciais e porcentagens de vazamento. Os demais perfis de transiente de pressão encontram-se no **Apêndice E**.

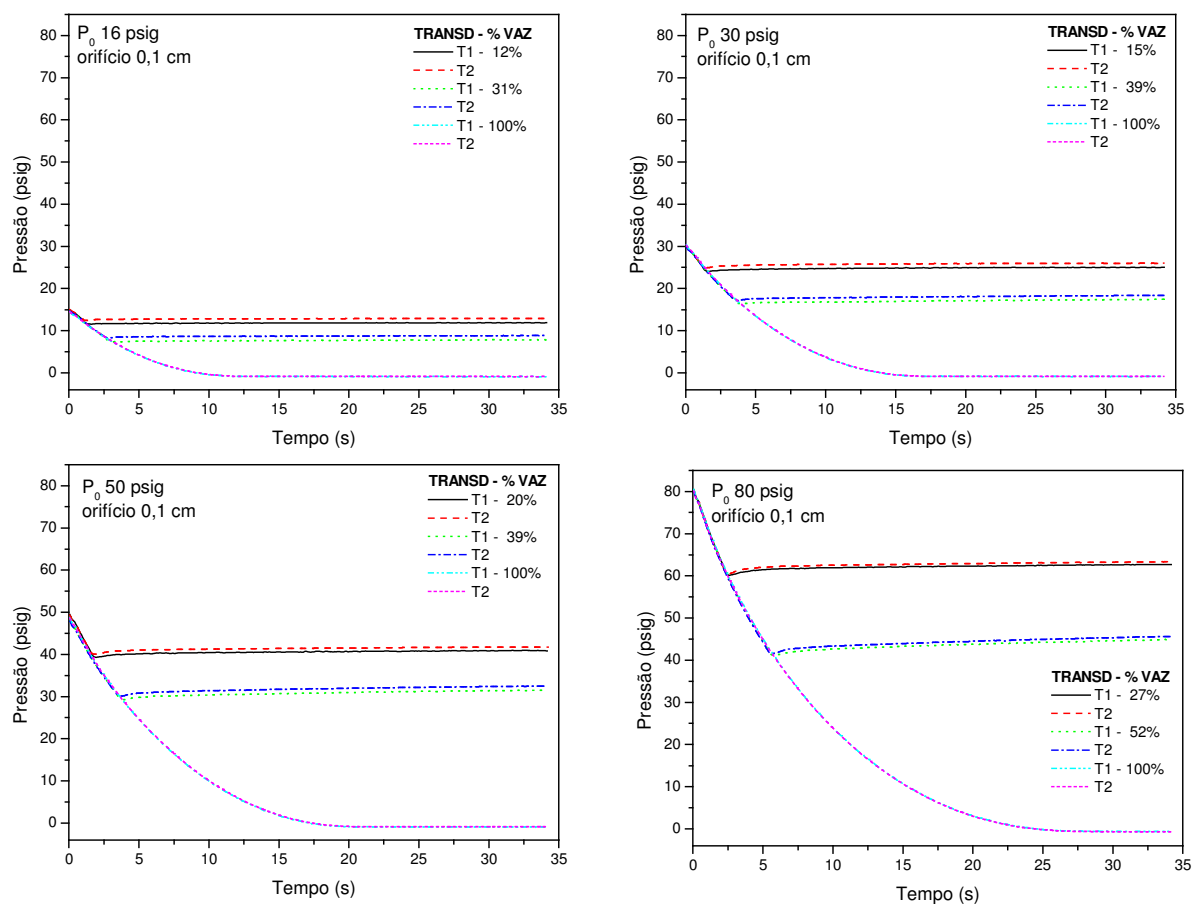


Figura 5.1– Transientes de pressão (orifício 1 mm). Tubulação fechada.

O tempo de duração de cada experimento foi sempre o suficiente para que o sistema readquirisse o estado estacionário, quer pelo fechamento da válvula, quer pelo esvaziamento da tubulação. O tempo de monitoramento do sistema foi estabelecido no programa de aquisição de dados, variando-se o número de pontos da média aritmética. Para o orifício de 0,7 mm utilizou-se uma média aritmética de 900 pontos, e para o orifício de 5mm a média foi de 50 pontos, uma vez que a queda da pressão acontecia muito rapidamente. Para os demais orifícios usou-se valor intermediário de pontos na média aritmética

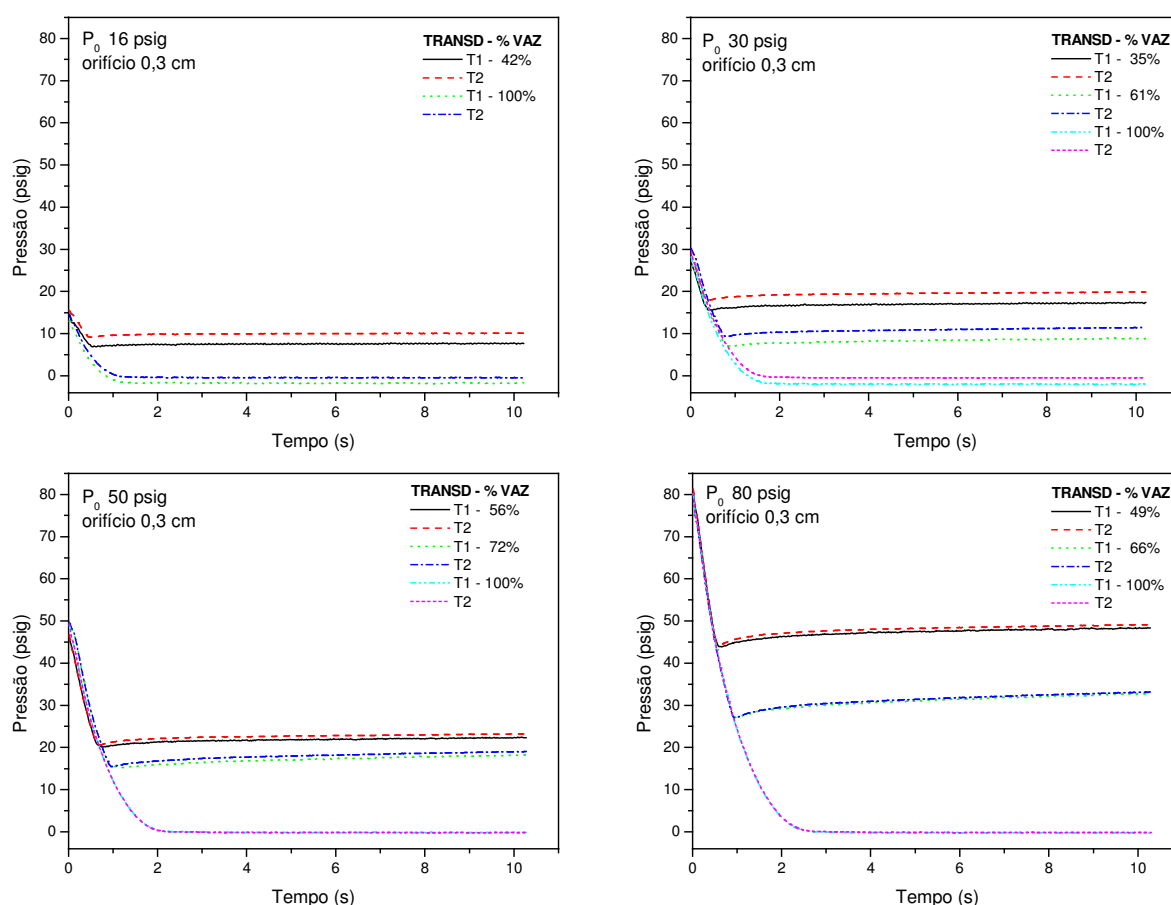


Figura 5.2. – Transientes de pressão (orifício 3 mm). Tubulação fechada.

As Figuras 5.1 a 5.3 mostram que a partir do instante em que o vazamento é provocado, a pressão na tubulação cai continuamente e como era esperado, quanto maior o orifício através do qual ocorre o vazamento, mais rápida é a queda na pressão. Com o orifício de 1 mm a tubulação esvazia entre 10 s e 25 s, quando a pressão varia entre 16 psig

e 80 psig, enquanto que utilizando-se o orifício de 5 mm, para a mesma faixa de pressão, esse tempo fica entre 0,5 s e 1 s.

A característica do perfil do transiente de pressão observado para o trecho de tubulação é a mesma daquele encontrado para a tubulação com escoamento contínuo, como será visto mais adiante, isto é, a ocorrência de vazamento provoca uma queda contínua no valor da pressão. Esse comportamento difere daquele observado para tubulações operando com líquidos, onde a ocorrência de vazamento gera um pulso de pressão, isto é, uma queda seguida de uma recuperação parcial da pressão.

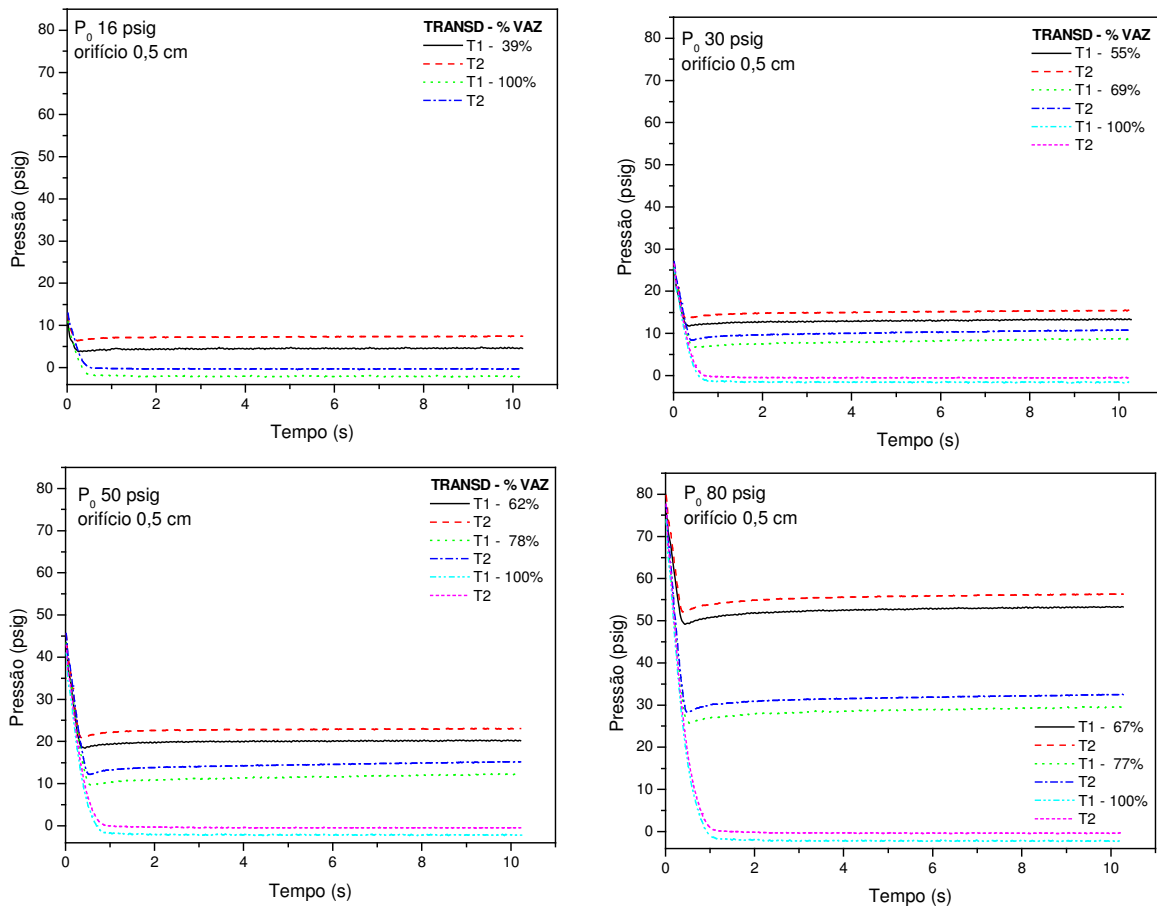


Figura 5.3 – Transientes de pressão (orifício 5 mm). Tubulação fechada.

A ocorrência de vazamento em uma tubulação gera uma onda de pressão que viaja a montante e a jusante da posição do vazamento. Neste trabalho, os transdutores T1 e T2 mostram resultados praticamente idênticos mesmo estando separados por uma distância de

6m. Esta é uma indicação de que a onda de pressão atinge os dois transdutores (o T1 localizado numa posição adjacente ao vazamento e o T2 distante 6 metros) praticamente no mesmo instante.

Em alguns casos, principalmente aqueles onde o vazamento é de grande magnitude, como acontece em todos os experimentos utilizando-se o orifício de 5 mm, os perfis de pressão produzidos pelos transdutores T1 e T2, não são exatamente coincidentes. É necessário considerar alguns efeitos gerados pelo fato da tubulação estar fechada. Com a ocorrência de vazamento, o ar inicia um escoamento no sentido da posição do vazamento, enquanto a onda de pressão viaja, a jusante do vazamento, em contra-corrente com o fluxo de ar. Deve-se esperar também, que o fluxo de ar provoque um certo amortecimento da onda de pressão e todos esses efeitos são captados pelo transdutor T2.

Nos casos em que o vazamento foi interrompido pelo fechamento da válvula (vazamentos intermediários), observou-se em todos os transientes de pressão uma queda de pressão seguida de uma pequena recuperação no instante de fechamento. A recuperação da pressão ocorreu de forma suave, sem a presença de pulsos, isto é, oscilações bruscas, mesmo com o fechamento rápido da válvula.

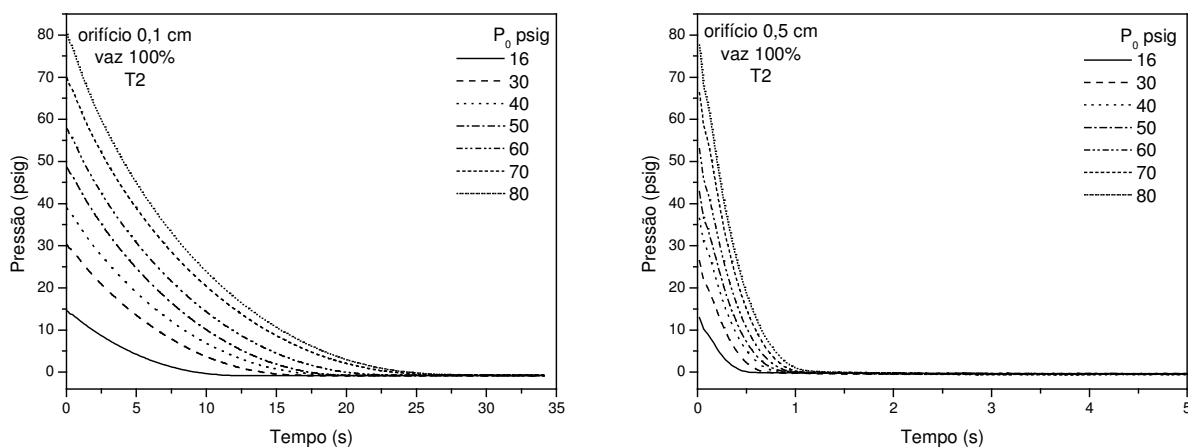


Figura 5.4 – Comparação entre transientes de pressão, a diferentes pressões iniciais para o mesmo orifício

A Figura 5.4 mostra a comparação dos perfis do transiente de pressão para o vazamento de 100% em diferentes pressões iniciais para o orifício de 1 e 5 mm de diâmetro. Os perfis mostrados na Figura 5.4 foram obtidos pelo transdutor T2, sendo que

através do transdutor T1 obtém-se o mesmo perfil. Observa-se a semelhança entre as curvas e a proporcionalidade entre a pressão inicial e o tempo necessário para esvaziar a tubulação.

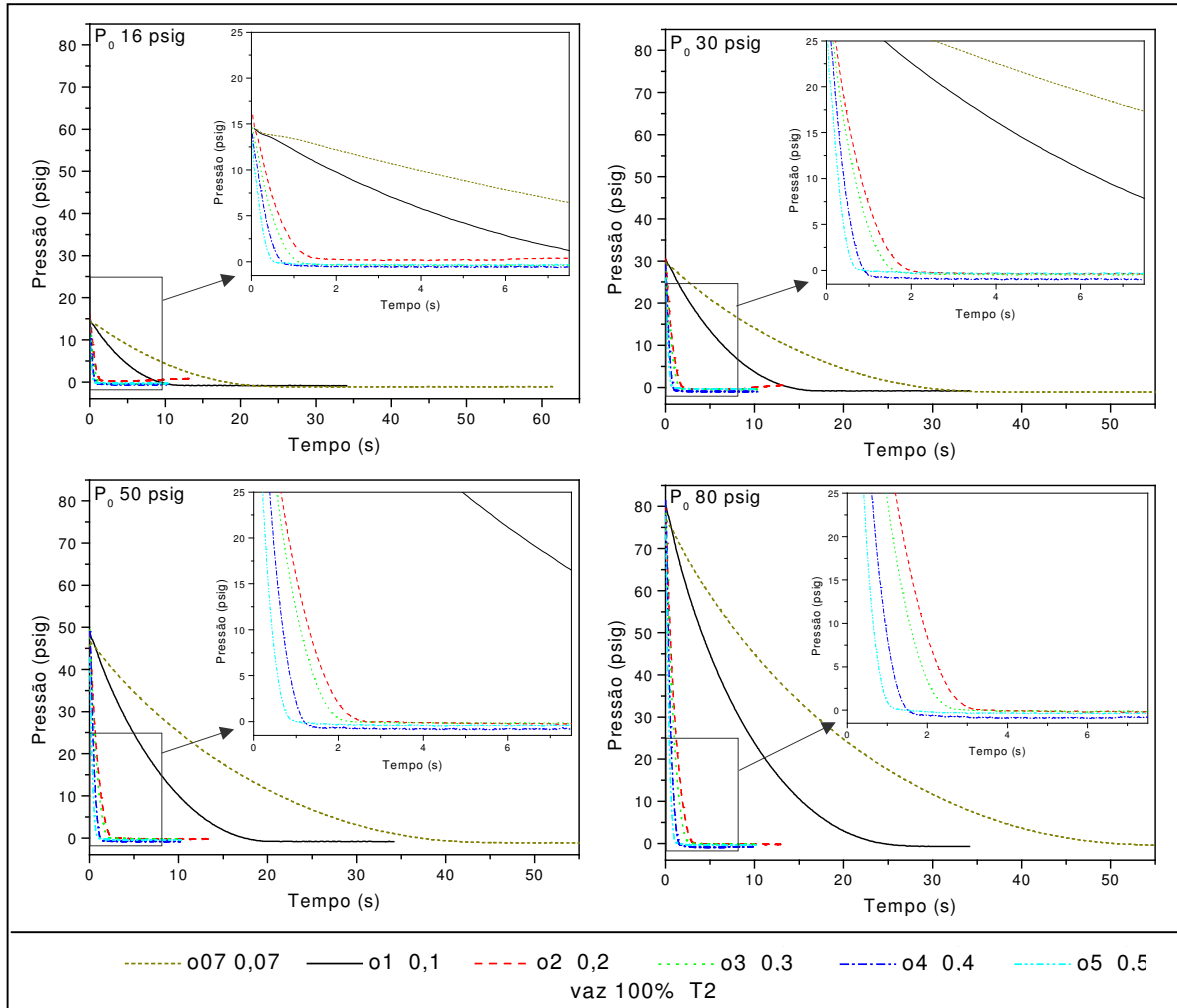


Figura 5.5 – Comparação entre transientes de pressão para orifícios diferentes e mesma pressão inicial.

Na Figura 5.5 temos o perfil do transiente de pressão para uma mesma pressão inicial para os diferentes orifícios. Observa-se com mais detalhe como o aumento no diâmetro do orifício influencia os perfis de transientes de pressão, tornando mais acentuada a queda de pressão. Há uma diferença mais pronunciada entre as curvas obtidas com os orifícios de 0,7 mm e de 1mm, e aquelas para os demais orifícios. Este comportamento foi observado para todos os valores de pressão.

Para fazer uma comparação do comportamento do transiente de pressão durante um vazamento em uma tubulação fechada de maior comprimento, ou maior volume, onde os transdutores encontram-se a uma distância dez vezes maior, o sistema usado para fazer

os experimentos com escoamento teve a extremidade fechada sendo transformado em um vaso de pressão.

A Figura 5.6 mostra uma comparação entre os transientes de pressão, obtidos na tubulação fechada de 6m e aqueles obtidos na tubulação de 60 metros. Observa-se nos perfis na tubulação de 6 m uma queda mais abrupta na pressão, simplesmente porque o volume nessa tubulação é menor. No caso da tubulação de 60 m, os perfis de pressão obtidos através do transdutor de pressão T2 serão influenciados não só pelos efeitos já descritos anteriormente, mas também pelos efeitos causados pela propagação da onda de pressão em um trecho não linear de tubulação, constituído de tubos de 6 m de comprimento unidos por cotovelos de 90°.

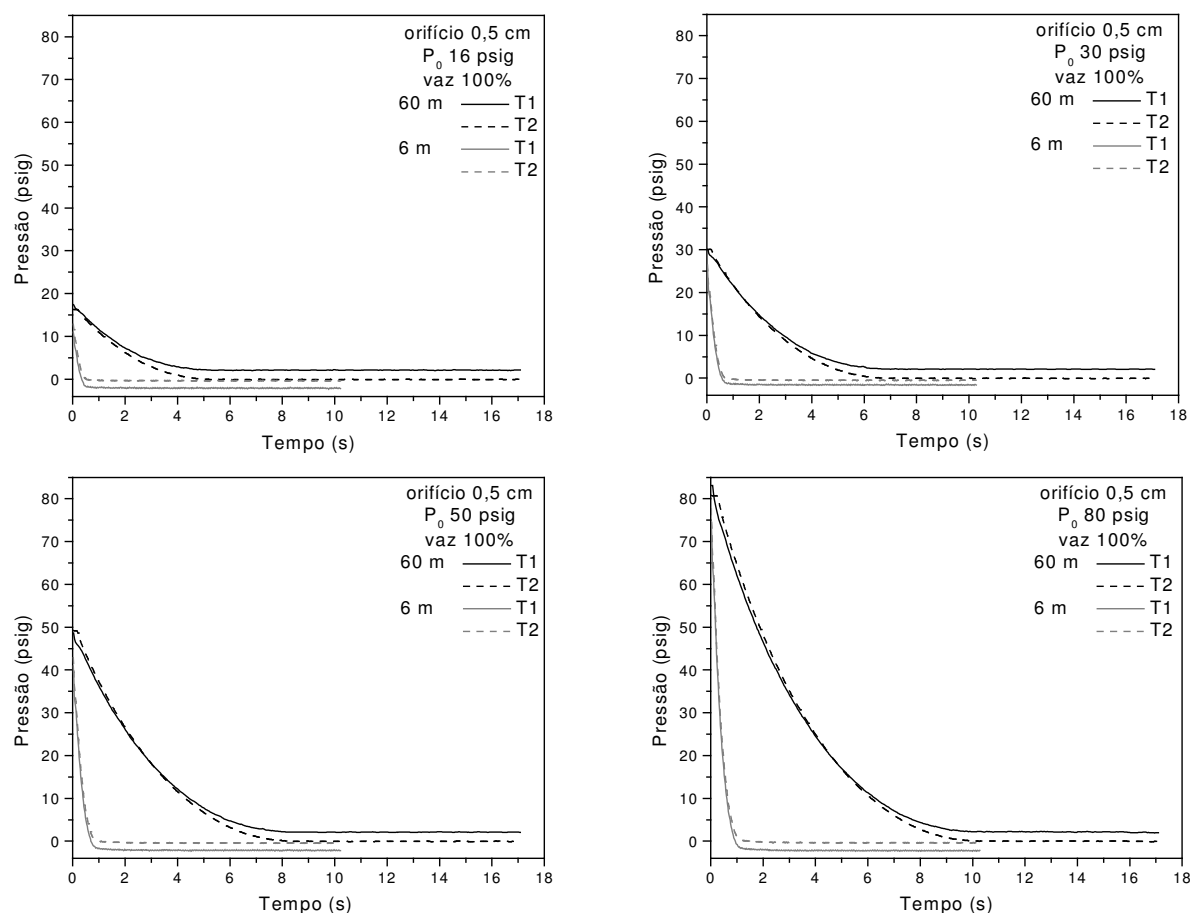


Figura 5.6 – Comparação entre transiente de pressão, tubulação 6m e 60m, orifício 0,5 cm

A simulação do vazamento na tubulação estática foi realizada através modelo para fluxo sônico a partir de um sistema gasoso pressurizado de Rasouli e Williams corrigido por BEYCHOK. A equação e embasamento teórico encontram-se no **Apêndice B**.

A Figura 5.7 faz uma comparação entre os transientes simulados e experimentais, para a mesma pressão inicial e diferentes orifícios, no caso do vaso de pressão de 6m.

A Figura 5.8 mostra uma comparação entre os transientes de pressão simulados e experimentais para o vaso de pressão de 60 metros de comprimento no caso do orifício de 0,5 cm.

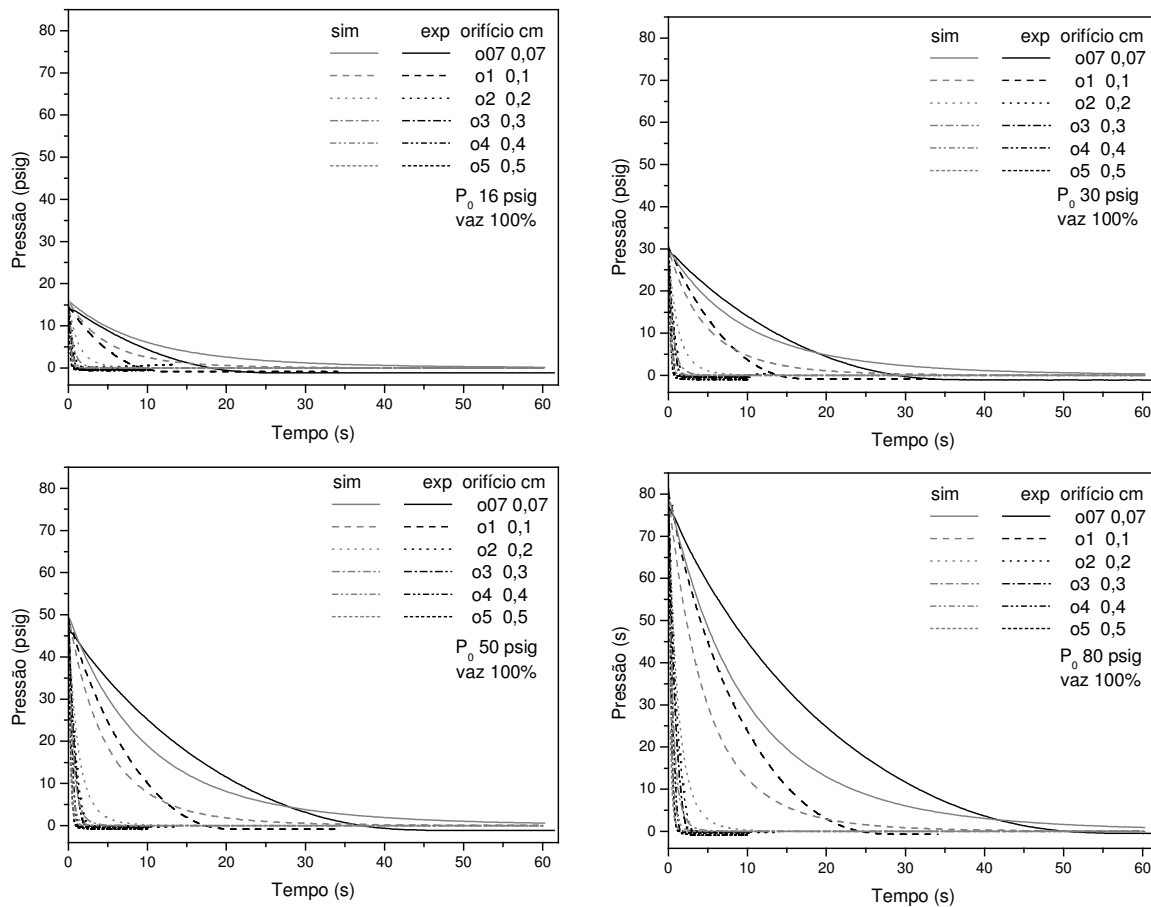


Figura 5.7 – Comparação entre transiente de pressão simulados e experimentais. Tubulação fechada de 6 metros

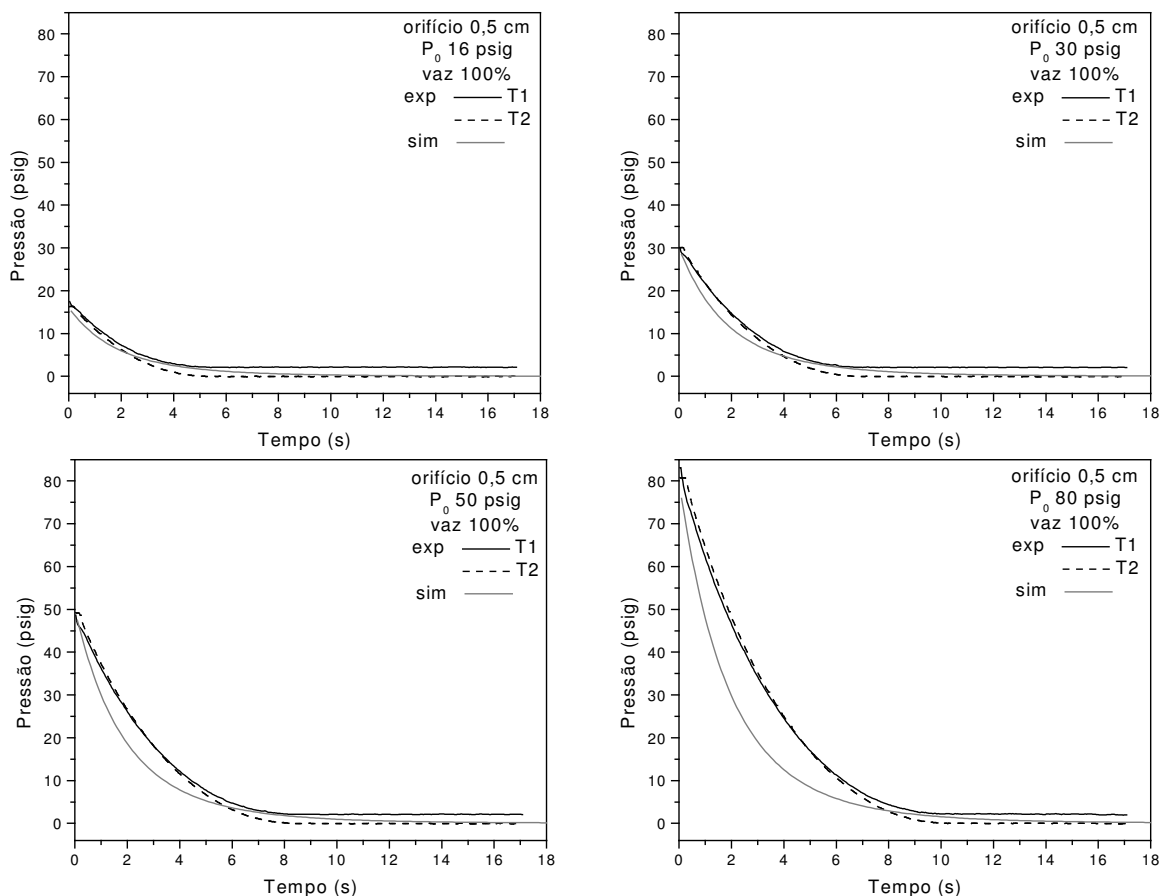


Figura 5.8 – Comparação entre transiente de pressão simulados e experimentais, tubulação fechada de 60 m

Podemos observar que as curvas não são idênticas, mas apenas com a simulação podemos ter uma imagem do comportamento do sistema durante o vazamento.

Na Figura 5.7 vemos que quanto menor o orifício, mais longe a curva experimental fica da simulada, sendo que a maior diferença ocorre no caso do orifício de 0,3 cm. Essa diferença pode ter sido causada pelo fato de que foi adotado na simulação um coeficiente de descarga único para todos os orifícios.

Na figura 5.8 é mais fácil de observar que quanto maior a pressão maior é o desvio do resultado teórico para o experimental.

5.2 Detecção do vazamento em tubulação com escoamento contínuo

Os transientes de pressão causados por vazamentos em tubulação de 60 m com escoamento contínuo são analisados a seguir.

As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram os transientes de pressão para os orifícios de 1 mm; 2 mm e 5 mm, para diferentes pressões iniciais quando um vazamento contínuo ocorre no sistema. Os demais perfis do transiente de pressão encontram-se no **Apêndice F**.

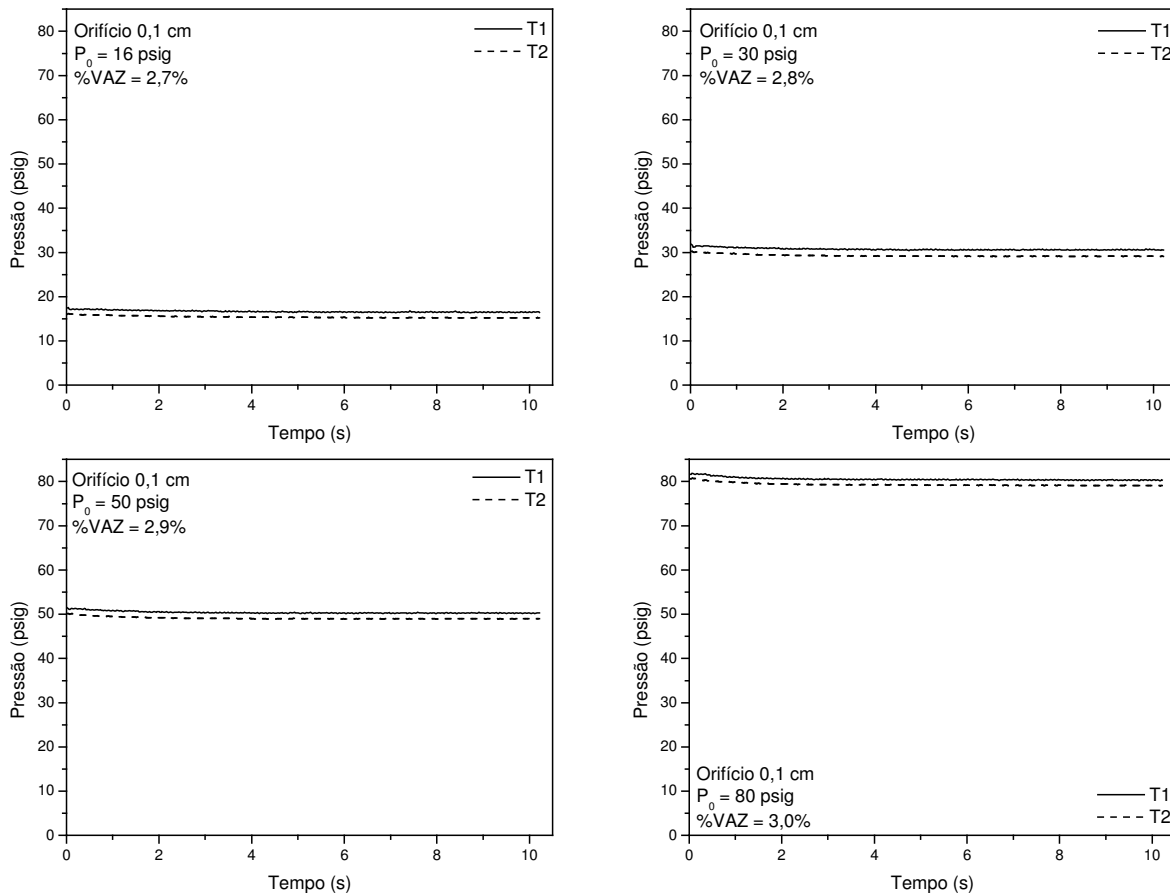


Figura 5.9 – Transientes de pressão (orifício 0,1cm). Tubulação com escoamento.

Podemos observar na Figura 5.9 que o vazamento provocado pelo orifício de 1 mm, correspondente a 3% da vazão nominal, não é detectado, a queda de pressão provocada no sistema pelo vazamento foi muito pequena.

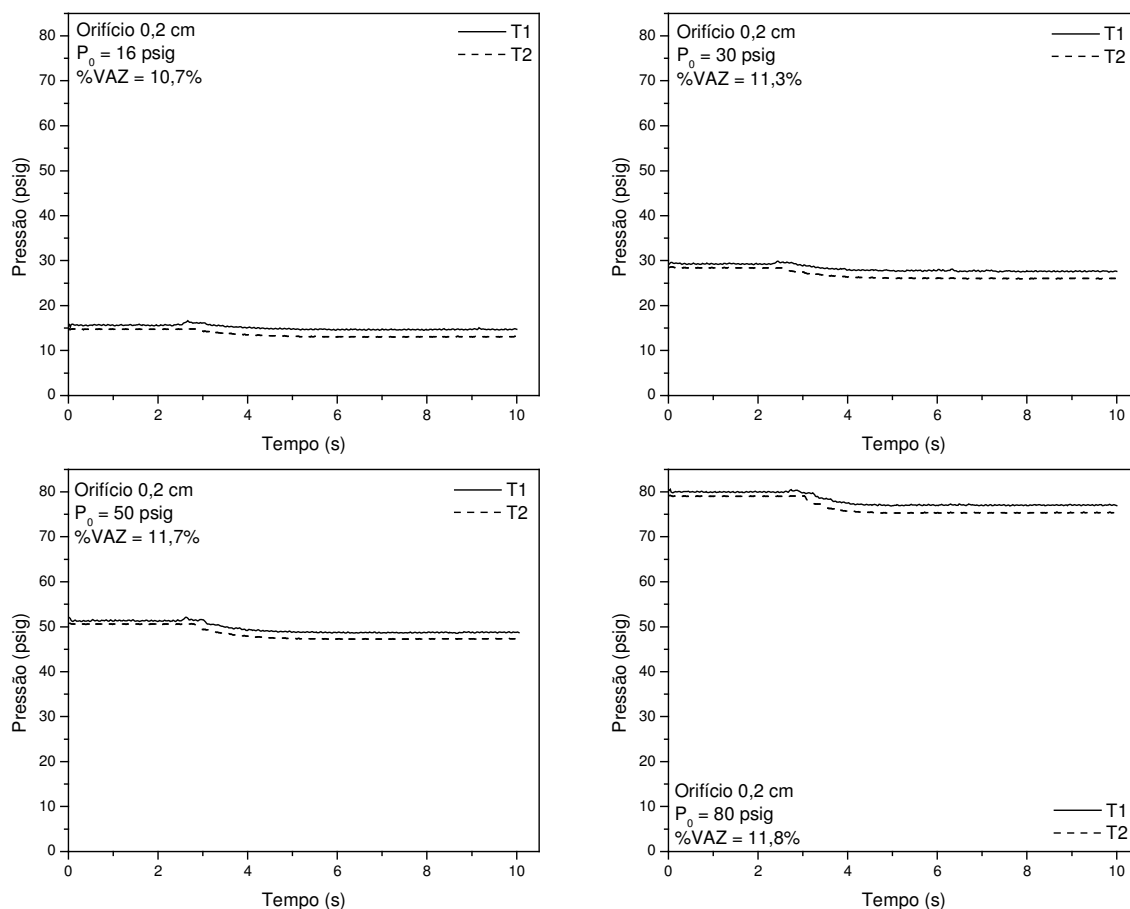


Figura 5.10 – Transientes de pressão (orifício 0,2cm). Tubulação com escoamento.

Na Figura 5.10 é apresentado o perfil do transiente de pressão do orifício 2 mm, onde já é possível detectar o vazamento. Em todos os transientes de pressão obtidos foi possível observar um perfil padrão, no instante em que o vazamento é provocado a pressão começa a cair até atingir um valor limite onde passa a ser constante, formando um novo patamar.

Na figura 5.11 temos o perfil do transiente de pressão provocado pelo orifício de 5 mm. Durante os experimentos foi observado que quanto maior a magnitude do vazamento

(diâmetro do orifício) maior é o nível de ruído provocado pela descarga do ar á atmosfera através do vazamento. O aumento na pressão inicial provoca um aumento no nível de ruído, porém não tão significativo como o provocado pelo aumento no diâmetro do orifício.

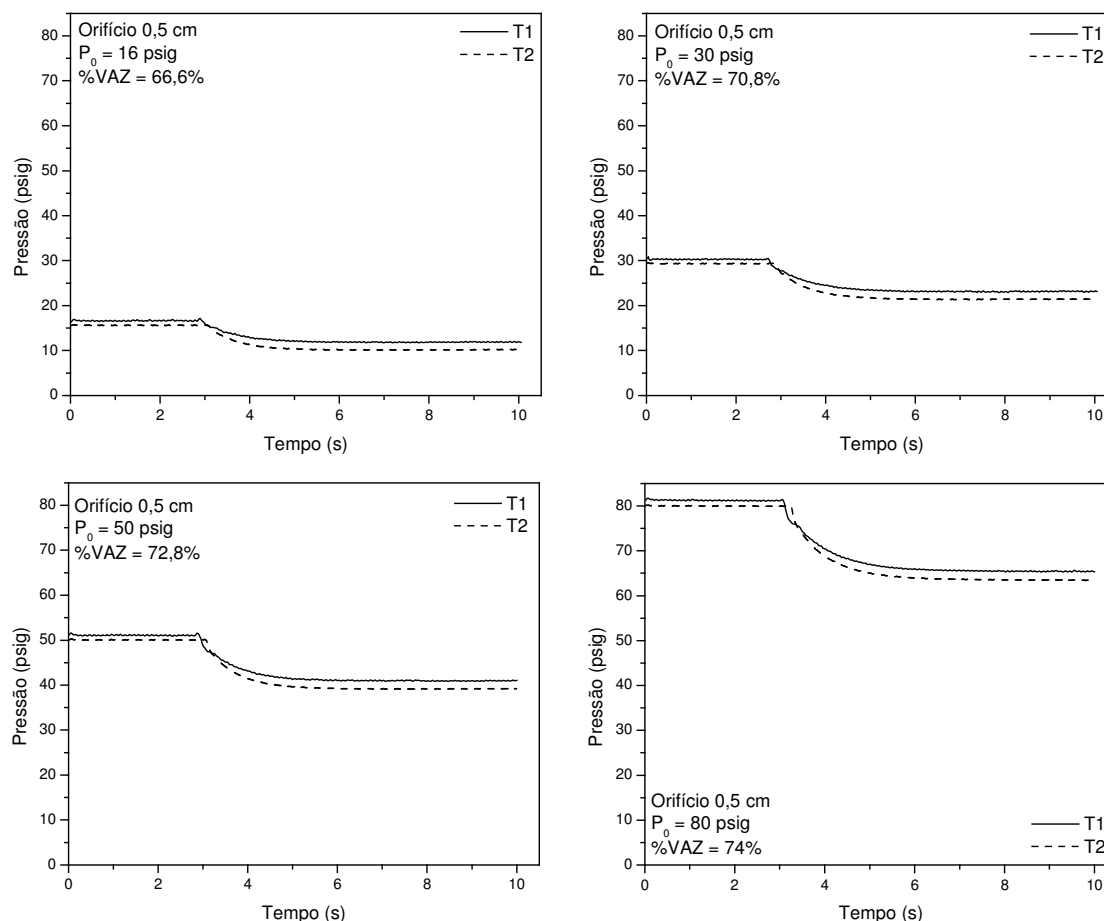


Figura 5.11 – Transientes de pressão (orifício 0,5cm). Tubulação com escoamento.

A Figura 5.12 mostra a comparação para os transientes de pressão para o mesmo orifício e diferentes pressões iniciais, o vazamento tem início no instante 0. É possível observar que o aumento da pressão inicial do sistema não tem influência no vazamento, a queda de pressão é praticamente constante. Isto ocorre porque em todos os casos estudados a descarga para a atmosfera através no vazamento acontece com fluxo “choked”, onde o aumento da pressão não induz ao aumento da vazão. O único fator que faz a porcentagem de vazamento variar é o fator de expansão Y que é dependente da pressão. (vide tabela de cálculo C.2 no **Apêndice C**).

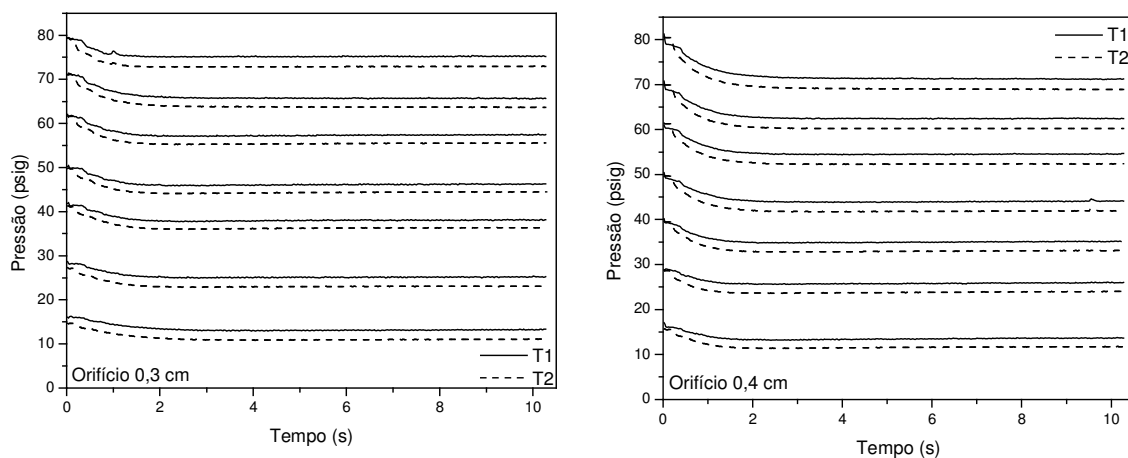


Figura 5.12 – Comparação dos transientes de pressão para o mesmo orifício (vazamento provocado no instante 0).

Na figura 5.13 temos a comparação dos transientes provocados pelo vazamento para o mesmo valor de pressão e diferentes orifícios, o vazamento tem início no instante 0. Os perfis mostrados nas figuras foram obtidos pelo transdutor T2, pelo transdutor T1 obtém-se o mesmo perfil. As figuras mostram que quanto maior a magnitude do vazamento (diâmetro do orifício) maior é a queda de pressão.

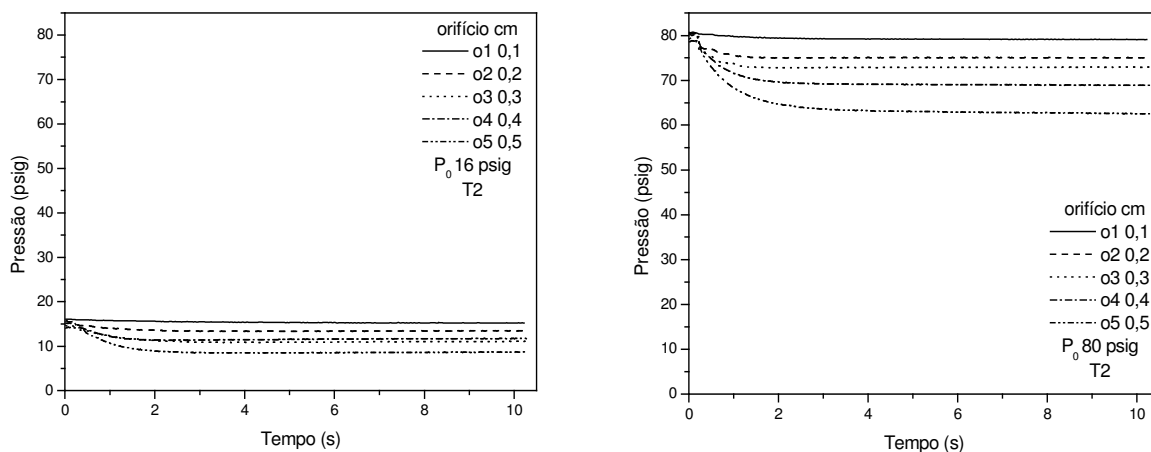


Figura 5.13 – Comparação dos transientes de pressão para o mesmo valor de pressão

A figura 5.14 mostra o transiente de pressão quando a válvula é fechada poucos segundos após o vazamento ter sido provocado. Quando a válvula é fechada, eliminando o vazamento, a pressão recupera-se rapidamente retornando ao valor inicial após alguns segundos. A defasagem entre os transdutores pode ser observada em dois pontos: no momento em que a válvula é aberta e no momento em que a válvula é fechada.

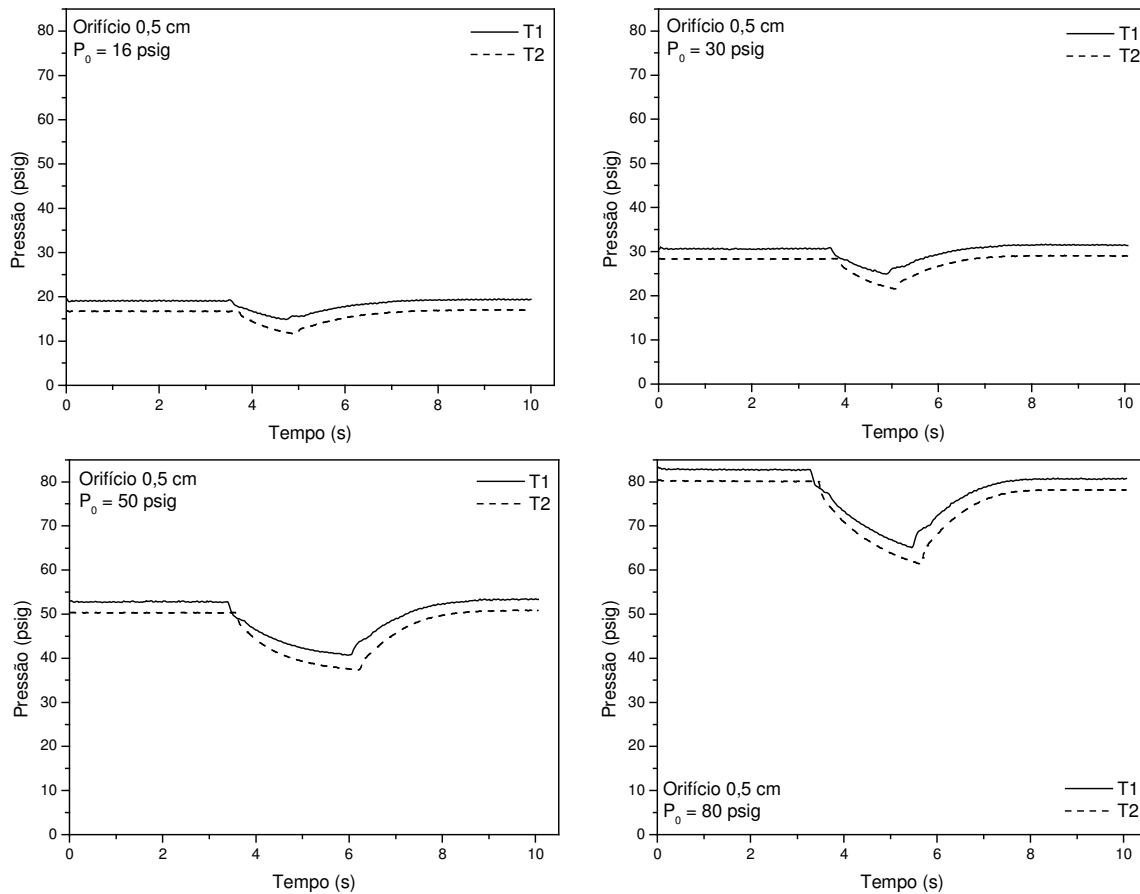


Figura 5.14 – Transientes de pressão (orifício 0,5cm). Vazamentos de 1 segundo.

A Figura 5.15 mostra a defasagem dos transdutores em dois pontos: no momento de abertura e no momento de fechamento da válvula. Em todos os experimentos realizados a defasagem dos transdutores é de aproximadamente 0,16 segundo, com um erro de 0,02 segundo que é o tempo entre dois pontos adquiridos durante o experimento. Este valor representa o tempo que a onda de pressão gasta para percorrer a distância de 60 metros que

separam os transdutores, assim, podemos dizer que a velocidade experimental da onda de pressão é de 375 m/s, um valor próximo do valor teórico da velocidade da onda de pressão obtida nas condições de fluxo e calculado no **Apêndice A** que é de 345,6 m/s.

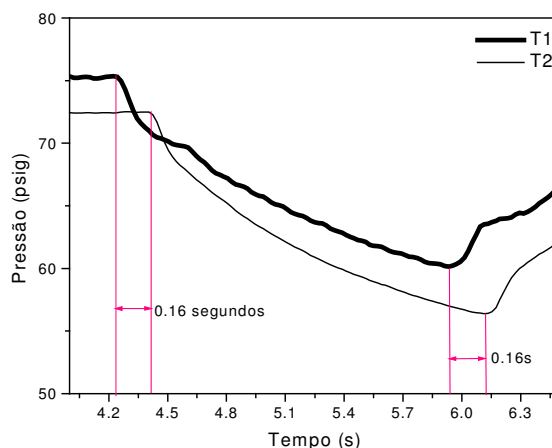


Figura 5.15 – Defasagem entre os transdutores.

A figura 5.16 mostra a comparação dos resultados experimentais com os simulados, para as pressões iniciais de 16, 30, 50 e 80 psig e orifícios de 1 e 5 mm, para um transiente de pressão localizado no início da tubulação.

Pela análise da figura percebemos que o resultado simulado apresenta uma perda de carga muito menor que o resultado experimental, mas o perfil e o comportamento apresentado pelo transiente no caso experimental e simulado são semelhantes.

Um dos motivos dessa diferença pode ter sido que na simulação foi considerada uma perda de carga na entrada da tubulação muito pequena. Assim transformando essa perda de carga em comprimento equivalente de tubulação reta aumentando a distância entre o reservatório e o vazamento obtém-se o gráfico da figura 5.17.

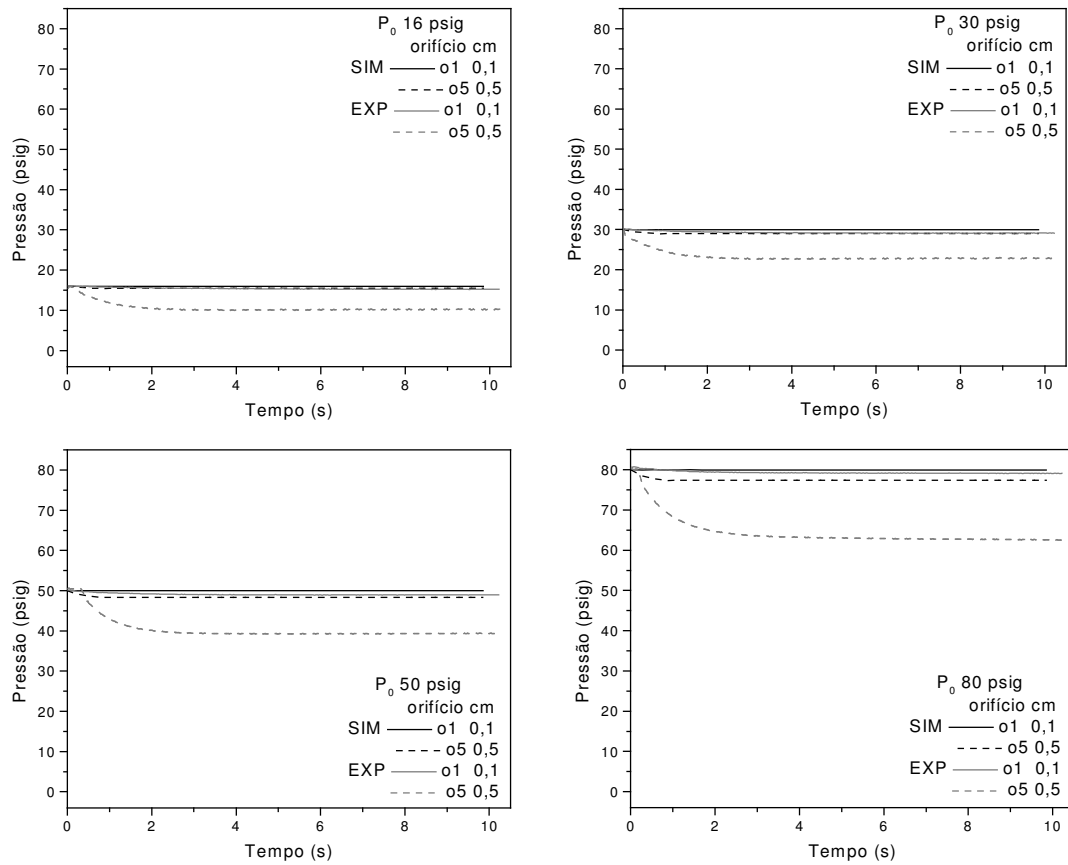


Figura 5.16 – Comparação dos resultados experimentais e simulados. Tubulação com escoamento

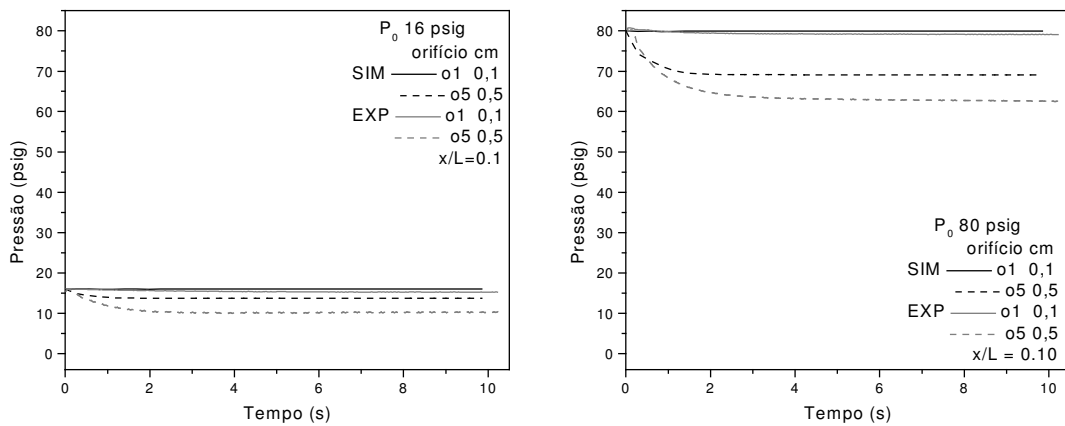


Figura 5.17 – Comparação entre o perfil do transiente de pressão experimental e o simulado para x/L 0,1.

6. Conclusões e Sugestões

O presente trabalho constituiu em detectar e analisar transientes de pressão, causados por vazamentos, em uma tubulação operando com ar comprimido com e sem escoamento.

O equipamento de detecção é constituído de dois transdutores de pressão acoplados a um computador PC.

A detecção foi realizada para várias condições de operação: pressão do ar na tubulação variando de 1 a 6 kgf/cm², diâmetro do orifício (magnitude do vazamento) variando de 0,7 a 5 mm e razão de vazamento variando de 3% a 74% na detecção com escoamento e chegando a 100% na detecção estática.

Uma segunda etapa do trabalho foi um estudo teórico, onde os transientes de pressão causados pelo vazamento foram simulados para ambos os casos.

A simulação da ruptura no trecho fechado de tubulação foi baseada em um modelo para o fluxo sônico a partir de um sistema pressurizado que fornece a variação de pressão com o tempo.

Para a tubulação com escoamento foi desenvolvido em linguagem C um programa que faz a simulação do transiente provocado pelo vazamento.

A detecção do vazamento é realizada comparando os transientes de pressão simulados e reais.

6.1 Conclusões

A característica do perfil do transiente de pressão observado para o trecho de tubulação é a mesma daquele encontrado para a tubulação com escoamento contínuo, onde a ocorrência de vazamento provoca uma queda contínua no valor da pressão, um comportamento diferente do observado para tubulações operando com líquidos.

Pela análise dos transientes de pressão obtidos na detecção estática observamos que quando o vazamento é de grande magnitude os perfis de pressão produzidos pelos transdutores T1 e T2, não são exatamente coincidentes. Esta diferença pode ser causada pela onda de pressão provocada pelo vazamento que, na tubulação fechada, viaja em contra-corrente com o fluxo de ar, deve-se esperar também, que o fluxo de ar provoque um certo amortecimento da onda de pressão.

Nos vazamentos intermediários observou-se uma queda de pressão seguida de uma pequena recuperação no instante de fechamento sem a presença de pulsos.

Existe a proporcionalidade entre a pressão inicial e o tempo necessário para esvaziar a tubulação. O aumento no diâmetro do orifício influencia os perfis de transientes de pressão, tornando mais acentuada a queda de pressão.

Na tubulação com escoamento contínuo não foi possível detectar o vazamento provocado pelo orifício de 1 mm, correspondente a 3% da vazão nominal.

É possível observar que o aumento da pressão inicial do sistema não tem influência no vazamento, a queda de pressão é praticamente constante. Existe a proporcionalidade entre a magnitude do vazamento e a queda de pressão.

A velocidade experimental da onda de pressão foi determinada através do tempo que a onda gasta para percorrer os 60 metros que separam os transdutores, foi obtido um valor de aproximado de 375 m/s.

O perfil e o comportamento apresentado pelo transiente no caso experimental e simulado são semelhantes.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para dar continuidade ao presente trabalho e aos trabalhos desenvolvidos anteriormente usando a técnica de detecção de vazamentos pela análise de transientes de pressão, sugere-se:

- Aplicar a técnica para a detecção de vazamentos em tubulações transportando gás a uma pressão superior a 7 kgf/cm^2 ,
- Desenvolver uma técnica para localizar vazamentos em tubulações transportando gás,
- Desenvolver uma técnica de detecção de vazamentos em tubulações transportando gás através da análise e detecção da frequência do ruído provocado pelo escape de gás através do vazamento.

7. Referências Bibliográficas

BEGGS, H. D. *Gas Production Operations*. 3 ed. OGCI Publications, USA, 1991.

BELSITO, S., BANERJEE, S. Leak detection in pipelines based on neural networks. *The First European Congress on Chemical Engineering*, v.1, p. 771-774, 1997, Florence, Italy.

BELSITO, S., LOMBARDI, P., ANDREUSSI, P., BANERJEE, S. Leak detection in liquefied gas pipeline by artificial neural networks. *AIChE Journal*, v.44, n.12, p.2675-2688, 1998.

BEYCHOK, M. R. – Vide **Referências da Internet**

BILLMANN, L., ISERMANN, R. Leak detection methods for pipelines. *Automatica*, v.23, n.3, p. 381-385, 1987.

BLACK, P. A review of pipeline leak detection technology. *Pipeline System*, v.7, *Fluid Mechanics and its Applications*, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.p. 287-298, 1992.

BRAGA, C. F. *Detecção de vazamentos por computador “on-line” em tubulações transportando misturas gás-líquido*. Universidade Estadual de Campinas, 2001, Tese (mestrado).

BUIATTI, C. M. *Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line*. Universidade Estadual de Campinas, 1995, Tese (mestrado).

- CARIATI, S. A. *Detecção de vazamentos por computador “on-line” em tubulações transportando líquido e misturas gás-líquido*. Universidade Estadual de Campinas, 1999, Tese (mestrado).
- CHAUDRY, M. H. *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, Litton Educational Publishing, p. 1-73, 1979.
- CHUNG, W.-Y., LEE, D.-D. Real time multi-channel gas leakage monitoring system using CPLD chip. *Sensors and actuators B*, v. 77, p. 186-189, 2001.
- CHURCHILL, S. W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering*, v. 84, n. 24, p. 91-92, nov.7, 1977.
- CIST, D. B., SCHUTZ, A.E. *State of the art for pipe & leak detection*, Geophysical Survey Systems, Inc., N. Salem, USA, Nov 2001.
- DEMPSEY, J., AL-HABIB, R. SCADA computer system controls major Saudi Aramco crude oil pipeline. *5th World Congress on Chemical Engineering*, v. 1, p. 973-980, San Diego, California, USA, 1996.
- FUKUSHIMA, K., MAESHIMA, R., KINOSHITA, A., SHIRAISHI, H., KOSHIJIMA, I. Gas pipeline leak detection system using the online simulation method. *Computers and Chemical Engineering*, v. 24, n.2-7, p.453-456, 2000.
- Gas Engineer’s Handbook*, gráfico 1/30.
- HUNDAIDI, O., CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Applied Acoustics*, v. 58, p.235-254, 1999.
- JÖNSSON, L., LARSON, M. Leak detection through hydraulic transient analysis. *Pipeline System*, v. 7, *Fluid Mechanics and its Applications*, p. 273-286, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 1992.

KE, S.L., TI, H.C. Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network. *Chemical Engineering Journal*, v. 76, p. 169-177, 2000.

KENNEDY, J. L. *Oil and Gas pipeline fundamentals*, 2.ed., PennWell Publishing Company, Tulsa, USA, 1993, 366 p.

LECKNER, P. – Vide **Referências da Internet**

LUDWIG, E.E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical plants*, v.1, Third Edition, Gulf Publishing Company, USA, 1995, Cap 1 e 2.

MATKO, D., GEIGER, G., GREGORITZA, W. Pipeline simulation techniques. *Mathematics and Computer in Simulation*, v.52, p. 211-230, 2000.

NAVES, G. J. *Técnicas de computação em tempo real em controle e supervisão de tubulações*. Universidade Estadual de Campinas, 1991, Tese (mestrado).

OOSTHUIZEN, P. H., CARSCALLEN, W. E. *Compressible Fluid Flow*, McGraw-Hill, USA, 1997. Cap. 3 e 9.

OSIADACZ, A. J. *Simulation and Analysis of gas networks*, E&F.N. Spon Ltd, London, 1987, Cap. 4 e 7.

PERRY'S *Chemical Engineers' Handbook*, Seventh Edition, McGraw-Hill, Australia, p. 2-140 e Cap.6, 1998.

PERRY. *Manual de Engenharia Química*, Quinta Edição, Ed.Guanabara, Rio de Janeiro, 1980, Cap 5.

PUDAR, R. S., LIGGETT, J. A. Leaks in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 118, n. 7, p.1031-1046, 1992.

- SANDBERG, C., HOLMES, J., MCCOY, K., E KOPPITSCH, H. The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 25, n. 5, p. 906-909, 1989.
- SILVA, A. R. *Supervisão de tubulações por computador on-line*. Universidade Estadual de Campinas, 1996, Tese (mestrado).
- SOUZA, A. L. *Detecção de vazamentos em tubulações através da Análise Espectral*. Universidade Estadual de Campinas, 2002, Tese (doutorado).
- STREETER, V. L., WYLIE, G. B. *Fluid Mechanics*, Mc Graw-Hill, 1975. Cap. 5 p. 291-297, Cap. 12 p. 647-667.
- VERDE, C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice*, v. 9, p. 673-682, 2001.
- WATANABE, K., HIMMELBLAU, D. M. Detection and location of a leak in a gas-transport pipeline by a new acoustic method. *AIChE Journal*, v. 32, n.10, p.1690-1701, 1986.
- WIKE, A. Liquid pipelines can use many varieties of SCADA-based leak detection systems. *Pipeline & Gas Journal*, v.213, n. 6, p.16-20, 1986.
- ZHANG, J. Statistical pipeline leak detection for all operating conditions. *Pipeline & Gas Journal Online*, Fev 2001.

7.1 Referências da rede de Internet

Access Science, *The online Encyclopedia of Science & Technology*, McGraw-Hill, www.AccessScience.com

BEYCHOK, M. R., Calculating Accidental Release flow rates from pressurized gas systems, <http://www.air-dispersion.com/feature2.html>.

Gas/dP Homepage, 1999 Optimal Systems Limited, <http://www.optimal-systems.demon.co.uk/gdp-topics-frames.htm>

Gás e Energia, <http://www.gasenergia.com.br/>

GasNet, <http://www.gasnet.com.br>

Gaspetro, Petrobrás, <http://www.gaspetro.com.br/gas.htm>

LECKNER, P. A Process Design Engineer's Perspective on Using Equivalent Lengths of Valves and Fittings in Pipeline Pressure Drop Calculations, <http://www.cheresources.com/eqlength.shtml>

Loss coefficients for fittings, <http://www.optimal-systems.demon.co.uk/loss-coefficients-intro.htm>

Leakzone, http://www.leakzone.com/articles/mass_ex3.htm

Natural Gas Infrastructure – Overview, <http://www.netl.doe.gov/scng/trans-dist/distribute.html>

Apêndice A

Escoamento Sônico

(<http://www.optimal-systems.demon.co.uk/gdp-topics-frames.htm>)

À medida que um fluido escoar em uma tubulação a pressão diminui e a velocidade aumenta. A velocidade máxima será estabelecida em um ponto de restrição ou na saída e é limitada pela velocidade da onda de pressão que viaja na velocidade do som no fluido.

A velocidade do som é calculada pela seguinte fórmula:

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s} \quad (\text{A.1})$$

Considerando como isentrópico o processo que ocorre quando a onda passa pelo gás, a equação pode ser simplificada para:

$$a = \sqrt{\frac{zkRT}{M}} \quad (\text{A.2})$$

onde k é a constante adiabática (c_p/c_v). Para o sistema em estudo onde o ar escoar na tubulação com uma temperatura média de 25°C a velocidade do som será:

$$a = \sqrt{\frac{0,9973 \times 1,4 \times 8,314 \times 298}{0,028964}} = 345,6 \text{ m/s}$$

A velocidade máxima que o fluido pode atingir (enquanto a área transversal é constante) é a velocidade do som nas condições do escoamento. Nesta velocidade o efeito da baixa pressão a jusante não pode mais ser transmitida a montante e causar um aumento na taxa de fluxo. O escoamento nestas condições é dito “choked”, ou sônico.

Para entender como ocorre o escoamento sônico suponha um sistema formado por dois reservatórios (A e B) conectados por uma tubulação como mostra a Figura A.1.

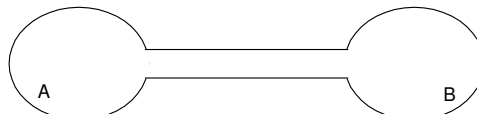


Figura A.1 – Reservatórios conectados por uma tubulação

- Se os dois reservatórios encontram-se á mesma pressão ($P_A=P_B$) não há escoamento pela tubulação.
- Um pequeno aumento em P_A (ou diminuição de P_B) irá induzir o escoamento pela tubulação em direção ao reservatório B . A pressão no final da tubulação será idêntica à P_B , e a pressão dentro da tubulação será menor do que P_A pela quantidade resultante da aceleração e das perdas devido à contração. A taxa de fluxo será tal que a soma de todas as perdas que ela causa será igual que a perda de pressão entre os dois reservatórios.
- Aumentando ainda mais P_A eventualmente a velocidade de saída irá atingir a velocidade sônica.
- Um aumento posterior de P_A não irá mais induzir ao aumento no fluxo. Isto ocorre porque P_B é transmitida em direção ao reservatório A na velocidade em que a onda do som propaga-se no gás. Assim, P_B não irá influenciar a pressão na saída da tubulação e o aumento na diferença de pressão entre A e B não irá mais causar um aumento no fluxo de gás. O escoamento então é denominado sônico. A perda de carga da pressão de saída para P_B acontece por uma série de choques que são altamente não-isoentrópicos.

O escoamento sônico pode ser observado na descarga para a atmosfera de um sistema pressurizado ou na saída de uma tubulação transportando gás pressurizado.

A diferença de pressão necessária para ter o escoamento sônico é fornecida pela seguinte fórmula:

$$\frac{P_{VP}}{P_{atm}} \geq \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (A.3)$$

onde P_{VP} é a pressão no interior do sistema, P_{atm} a pressão atmosférica externa. Para o ar temos $k = 1,4$; e o escoamento sônico irá ocorrer para uma pressão igual ou maior que 27,8 psia.

Apêndice B

Vazamento de Gás em Trecho Fechado de Tubulação

O vazamento é influenciado por três principais fatores. Primeiro, ele depende da geometria do defeito, principalmente do seu diâmetro, assim a vazão de vazamento é diretamente proporcional ao diâmetro do defeito (orifício).

Segundo, a vazão de vazamento depende das propriedades do fluido, principalmente da viscosidade, esta por sua vez é dependente da temperatura. Portanto, para o mesmo defeito e diferença de pressão, quanto maior a viscosidade do fluido menor será o vazamento.

Finalmente o fluxo de vazamento depende da diferença de pressão ao longo da trajetória do escoamento. Aumentando a diferença entre a pressão interna e a pressão ambiente aumentará a vazão volumétrica do vazamento, até que a velocidade de escoamento do gás atinja a velocidade do som e o escoamento torna-se sônico. A partir desse ponto, o aumento da pressão não aumenta a taxa volumétrica do escoamento. De toda maneira, aumentando a pressão aumentará a densidade do gás, resultando em um maior fluxo de massa para a mesma taxa de fluxo volumétrico. (http://www.leakzone.com/articles/mass_ex3.htm)

B.1 Cálculo do vazamento em trecho fechado de tubulação ^(BEYCHOK)

Em um artigo sobre o cálculo da taxa de escoamento sônico a partir de um vazamento acidental de um sistema pressurizado de gás, BEYCHOK compara dois modelos de cálculos: o apresentado por Rasouli e Williams e o apresentado por Birds, Stewart e Lightfoot, chegando à conclusão que os dois modelos apresentam resultados idênticos. A partir desta conclusão essas fórmulas são usadas para calcular a taxa de escoamento média para o período de vazamento, a partir da qual é feito o cálculo da porcentagem de

vazamento. A fórmula apresentada por Rasouli e Williams é usada para fazer uma simulação da queda de pressão em função do tempo provocada por um vazamento em um sistema pressurizado.

Modelo de Rasouli e Williams:

$$C_D \left(\frac{A_{or}}{V_{TF}} \right) \left(\frac{R}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{k-1}{2k} \right) k^{3/2} \left(\frac{2}{k+1} \right)^a \left(\frac{T_0}{P_0^b} \right)^{1/2} (t_2 - t_1) = P_2^c - P_1^c \quad (B.1)$$

Modelo de Bird, Stewart e Lightfoot:

$$F^d = 1 + \left[t \times C_D \times \left(\frac{k-1}{2} \right) \left(\frac{A_{or}}{V_{TF}} \right) \left\{ k \frac{P_0}{\rho_0} \left(\frac{2}{k+1} \right)^e \right\}^{1/2} \right] \quad (B.2)$$

onde: $a = (k+1)/(2k-2)$

$b = (k-1)/k$

$c = -(k-1)/(2k)$

$d = (1-k)/2$

$e = (k+1)/(k-1)$

F é a fração de massa do gás inicial remanescente no trecho fechado de tubulação no tempo t, A_{or} é a área do orifício do vazamento, V_{TF} o volume da tubulação fechada e C_D o coeficiente de descarga do orifício.

B.2 Cálculo da porcentagem de vazamento ^(BEYCHOK)

O cálculo da porcentagem de vazamento levou em conta dois fatores:

1. O escoamento do orifício acontece em regime sônico (“choked flow”), porque para todos os experimento a pressão inicial no interior da tubulação é maior que 27,8 psia (**Apêndice A**).

2. A fórmula deve fornecer a taxa de fluxo média e não o fluxo inicial instantâneo. O fluxo inicial instantâneo a partir de um vazamento em um trecho fechado de tubulação é

muito maior que a média da taxa de fluxo durante todo o período de vazamento, porque a pressão e a taxa de fluxo diminuem com o tempo e com o esvaziamento do sistema.

Resolvendo a equação B.2 para uma tubulação de 6 metros de comprimento e ½” de diâmetro, sendo o gás usado ar ($k = 1,4$; $M = 0,028964$ e $z = 0,9973$), podemos obter a fração de massa do gás inicial remanescente na tubulação fechada no tempo t :

$$F = \left[1 + \left(180,56 \times t \times C_D \times A_{or} \times \sqrt{\frac{P_0}{\rho_0}} \right) \right]^{-5} \quad (B.3)$$

onde:

$$\rho = \frac{P_0 M}{z R T_0} \quad (B.4)$$

O valor de C_D adotado é 0,72, um valor usual também adotado no artigo de BEYCHOK.

A porcentagem de vazamento será:

$$\% \text{ Vaz} = (1 - F) \times 100 \quad (B.5)$$

As Tabelas B.1 a B.6 mostram os resultados do cálculo da porcentagem de vazamento.

Tabela B.1 – Cálculo da porcentagem de vazamento para o orifício de 0,07 cm.

Área orifício (m ²)	P ₀ (psig)	P ₀ (Pa abs)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	ρ (kg/m ³)	F	% B.5
							B.4
3,85E-07	16	211669,0	1,84	27	2,46	0,88	12,5
3,85E-07	16	211669,0	6,15	27	2,46	0,65	35,0
3,85E-07	30	308195,6	3,08	27	3,59	0,80	19,8
3,85E-07	30	308195,6	7,51	27	3,59	0,59	40,7
3,85E-07	40	377143,2	3,69	27	4,39	0,77	23,1
3,85E-07	40	377143,2	6,52	27	4,39	0,63	36,6
3,85E-07	50	446090,8	3,93	27	5,19	0,76	24,4
3,85E-07	50	446090,8	8,12	27	5,19	0,57	43,0
3,85E-07	60	515038,3	3,44	27	6,00	0,78	21,8
3,85E-07	60	515038,3	7,26	27	6,00	0,60	39,7
3,85E-07	70	583985,9	2,95	27	6,80	0,81	19,1
3,85E-07	70	583985,9	6,27	27	6,80	0,64	35,6
3,85E-07	80	652933,5	2,33	27	7,60	0,85	15,5
3,85E-07	80	652933,5	5,91	27	7,60	0,66	34,0

Apêndice B

Tabela B.2 – Cálculo da porcentagem de vazamento para o orifício de 0,1 cm.

					B.4	B.3	B.5
Área orifício (m ²)	P ₀ (psig)	P ₀ (Pa abs)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	ρ (kg/m ³)	F	%
7,85E-07	16	211669,0	0,89	28	2,46	0,88	12,3
7,85E-07	16	211669,0	2,53	28	2,46	0,69	30,6
7,85E-07	30	308195,6	1,09	28	3,59	0,85	14,8
7,85E-07	30	308195,6	3,42	28	3,59	0,61	38,6
7,85E-07	40	377143,2	1,64	28	4,39	0,79	21,3
7,85E-07	40	377143,2	3,34	28	4,39	0,62	37,9
7,85E-07	50	446090,8	1,50	28	5,19	0,80	19,7
7,85E-07	50	446090,8	3,42	28	5,19	0,61	38,6
7,85E-07	60	515038,3	1,50	28	6,00	0,80	19,7
7,85E-07	60	515038,3	3,35	28	6,00	0,62	38,0
7,85E-07	70	583985,9	1,3	28	6,80	0,83	17,4
7,85E-07	70	583985,9	4,10	28	6,80	0,56	44,0
7,85E-07	80	652933,5	2,19	28	7,60	0,73	27,2
7,85E-07	80	652933,5	5,32	28	7,60	0,48	52,3

Tabela B.3 – Cálculo da porcentagem de vazamento para o orifício de 0,2 cm.

					B.4	B.3	B.5
Área orifício (m ²)	P ₀ (psig)	P ₀ (Pa abs)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	ρ (kg/m ³)	F	%
3,14E-06	16	211669,0	0,60	27	2,46	0,71	29,3
3,14E-06	30	308195,6	0,44	27	3,59	0,77	22,6
3,14E-06	30	308195,6	0,93	27	3,59	0,59	41,0
3,14E-06	40	377143,2	0,52	27	4,39	0,74	26,0
3,14E-06	40	377143,2	0,79	27	4,39	0,64	36,3
3,14E-06	50	446090,8	0,33	27	5,19	0,82	17,6
3,14E-06	50	446090,8	0,96	27	5,19	0,58	41,9
3,14E-06	60	515038,3	0,88	27	6,00	0,61	39,4
3,14E-06	60	515038,3	1,04	27	6,00	0,56	44,4
3,14E-06	70	583985,9	0,44	27	6,80	0,77	22,6
3,14E-06	70	583985,9	0,93	27	6,80	0,59	41,0
3,14E-06	80	652933,5	0,36	27	7,60	0,81	19,0
3,14E-06	80	652933,5	0,74	27	7,60	0,65	34,6

Tabela B.4 – Cálculo da porcentagem de vazamento para o orifício de 0,3 cm.

					B.4	B.3	B.5
Área orifício (m ²)	P ₀ (psig)	P ₀ (Pa abs)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	ρ (kg/m ³)	F	%
7,07E-06	16	211669,0	0,43	28,5	2,46	0,58	42,2
7,07E-06	30	308195,6	0,33	28,5	3,59	0,65	34,7
7,07E-06	30	308195,6	0,76	28,5	3,59	0,39	60,6
7,07E-06	40	377143,2	0,33	28,5	4,39	0,65	34,7
7,07E-06	40	377143,2	0,79	28,5	4,39	0,38	61,9
7,07E-06	50	446090,8	0,66	28,5	5,19	0,44	55,9
7,07E-06	50	446090,8	1,09	28,5	5,19	0,28	72,4
7,07E-06	60	515038,3	0,31	28,5	6,00	0,67	33,1
7,07E-06	60	515038,3	0,88	28,5	6,00	0,34	65,5
7,07E-06	70	583985,9	0,41	28,5	6,80	0,59	40,8
7,07E-06	70	583985,9	0,92	28,5	6,80	0,33	67,0
7,07E-06	80	652933,5	0,9	28,5	7,60	0,34	66,3
7,07E-06	80	652933,5	0,53	28,5	7,60	0,51	48,7

Tabela B.5 – Cálculo da porcentagem de vazamento para o orifício de 0,4 cm.

					B.4	B.3	B.5
Área orifício (m ²)	P ₀ (psig)	P ₀ (Pa abs)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	ρ (kg/m ³)	F	%
1,26E-05	16	211669,0	0,21	27,5	2,46	0,62	38,1
1,26E-05	30	308195,6	0,39	27,5	3,59	0,42	57,5
1,26E-05	30	308195,6	0,49	27,5	3,59	0,35	65,1
1,26E-05	40	377143,2	0,31	27,5	4,39	0,50	49,9
1,26E-05	40	377143,2	0,67	27,5	4,39	0,25	75,1
1,26E-05	50	446090,8	0,27	27,5	5,19	0,54	45,5
1,26E-05	50	446090,8	0,49	27,5	5,19	0,35	65,1
1,26E-05	60	515038,3	0,47	27,5	6,00	0,36	63,8
1,26E-05	60	515038,3	0,74	27,5	6,00	0,22	78,1
1,26E-05	70	583985,9	0,33	27,5	6,80	0,48	52,0
1,26E-05	70	583985,9	0,67	27,5	6,80	0,25	75,1
1,26E-05	80	652933,5	0,35	27,5	7,60	0,46	53,9
1,26E-05	80	652933,5	0,64	27,5	7,60	0,26	73,7

Tabela B.6 – Cálculo da porcentagem de vazamento para o orifício de 0,5 cm.

					B.4	B.3	B.5
Área orifício (m ²)	P ₀ (psig)	P ₀ (Pa abs)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	ρ (kg/m ³)	F	%
1,96E-05	16	211669,0	0,14	27	2,46	0,61	39,2
1,96E-05	30	308195,6	0,23	27	3,59	0,45	54,8
1,96E-05	30	308195,6	0,35	27	3,59	0,31	68,7
1,96E-05	40	377143,2	0,33	27	4,39	0,33	66,8
1,96E-05	40	377143,2	0,49	27	4,39	0,21	79,0
1,96E-05	50	446090,8	0,29	27	5,19	0,37	62,5
1,96E-05	50	446090,8	0,47	27	5,19	0,22	77,8
1,96E-05	60	515038,3	0,51	27	6,00	0,20	80,1
1,96E-05	60	515038,3	0,68	27	6,00	0,13	87,2
1,96E-05	70	583985,9	0,18	27	6,80	0,53	46,8
1,96E-05	70	583985,9	0,47	27	6,80	0,22	77,8
1,96E-05	80	652933,5	0,33	27	7,60	0,33	66,8
1,96E-05	80	652933,5	0,45	27	7,60	0,23	76,5

B.3 Simulação de vazamento em um trecho fechado de tubulação

A simulação do vazamento na tubulação estática foi feita pelo modelo de Rasouli e Williams para fluxo sônico a partir de um sistema gasoso pressurizado. O modelo foi publicado em 1995, e originalmente era específico para vazamento de metano e continha um erro de derivação e um erro tipográfico, no artigo de BEYCHOK os erros foram corrigidos e o modelo foi generalizado, obtendo a equação B.1.

Resolvendo a equação B.1 para ar (k = 1,4, M = 28,964 e z = 0,9981), obtemos a equação B.6, que relaciona a pressão com o tempo.

$$P_2 = \left[P_0^{-0,1428} + \left(2,32 \times C_D \times \frac{A_{or}}{V_{TF}} \times t \times \sqrt{\frac{T_0}{P_0^{0,2857}}} \right) \right]^{-7} \quad (B.6)$$

A simulação foi feita adotando a temperatura de 28 °C e C_D = 0,72. Variando a área do orifício e o tempo foi possível obter curvas que podem ser comparadas com os

dados experimentais. A Figura B.1 mostra os gráficos obtidos para a tubulação de 6 metros de comprimento e 1/2" de diâmetro para as pressões iniciais de 16, 30, 50 e 80 psig e orifícios variando de 0,07 a 0,5 cm de diâmetro.

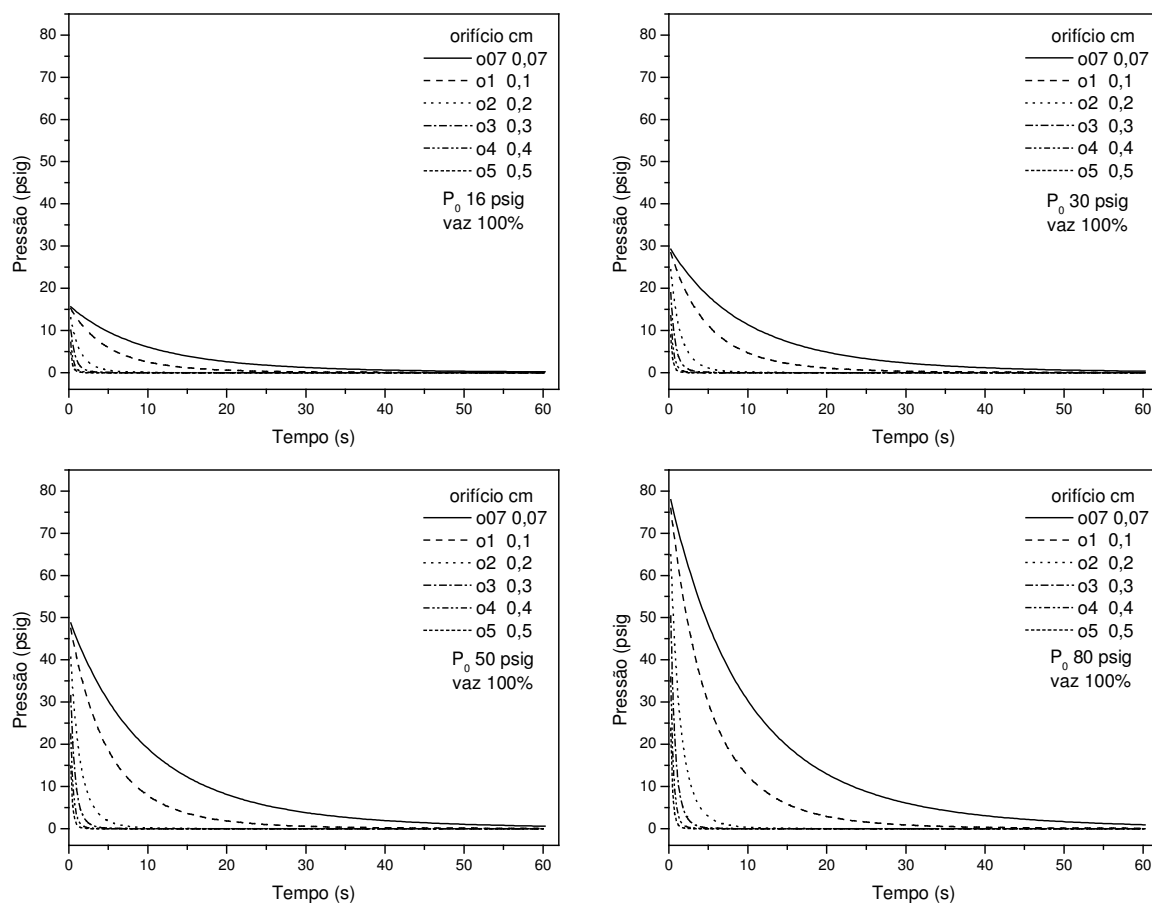


Figura B.1 – Simulação do vazamento.

Apêndice C

Tubulação com Escoamento Contínuo.

Em escoamentos compressíveis onde o atrito das paredes é o principal fator nas mudanças das propriedades do fluido, o escoamento ocorre entre os dois extremos das condições adiabáticas e isotérmicas. Quando a tubulação é razoavelmente curta, o escoamento é adiabático. Quando a tubulação é extremamente longa existe área suficiente para a troca de calor fazendo o escoamento ser não adiabático e aproximadamente isotérmico.

A descarga de fluidos compressíveis da saída de uma tubulação de pequeno comprimento para atmosfera, como o caso da tubulação em estudo, é considerada adiabática.

Para este sistema a perda de carga devido ao atrito pode ser calculada pela equação de Darcy. (LUDWIG, 1995)

C.1 Perda de carga na tubulação (perdas singulares)

Perdas devido a encaixes (válvulas, conexões....) são aumentos na entropia causados pelo atrito e turbulência. Em caso de encaixes onde o diâmetro não é alterado, o aumento na entropia manifesta-se como perda de carga.

O estudo das perdas através dos encaixes para o fluido compressível é um campo muito mal pesquisado. Na ausência de outros meios para o cálculo, equações para fluidos incompressíveis são comumente usadas sem gerar erros significativos (LECKNER).

Uma das equações mais usadas para determinar a perda de carga em uma tubulação reta é a equação de Darcy Weisbach que é válida tanto para gases como para líquidos.

$$h = N \frac{v^2}{2g} \quad (C.1)$$

$$\text{onde} \quad N = f \frac{L}{D} \quad (C.2)$$

h é a perda de carga em metros e N é conhecido como coeficiente de resistência ao atrito em carga cinética e é uma medida das seguintes perdas de carga em uma válvula ou encaixe:

- Atrito na tubulação na entrada ou saída de partes retas do encaixe.
- Mudanças na direção do caminho do escoamento.
- Obstruções no caminho do escoamento.
- Mudanças bruscas ou graduais na seção transversal ou na forma do caminho do escoamento.

O atrito na tubulação na entrada ou saída de partes retas do encaixe é muito pequeno se comparado com os outros três. O coeficiente N é independente do fator de atrito e do número de Reynolds, assim pode ser considerado constante para qualquer encaixe sob todas as condições de fluxo, variando apenas com o diâmetro do encaixe.

A equação de Darcy Weisbach pode ser escrita de forma a fornecer a perda de carga em pressão (ΔP em Pa):

$$\Delta P = \frac{N q^2}{2 A^2 \rho} \quad (C.3)$$

Para a tubulação reta o calculo da perda de carga é feito usando o fator de atrito utilizado correspondente ao número de Reynolds. Para o encaixe, f é o fator de atrito na zona de completa turbulência, e é designado f_t , e o comprimento equivalente do encaixe é designado L_{eq} . Assim:

$$N = N_{tub} + N_t = f \frac{L}{D} + f_t \frac{L_{eq}}{D} \quad (C.4)$$

No caso da tubulação em estudo só será considerada a perda de carga provocada pelos 18 cotovelos utilizados para unir os pedaços de 6m que formam a tubulação.

Cada cotovelo tem uma perda de carga equivalente a um comprimento de 0,474 m e um coeficiente de resistência cinética de 1,13. (LUDWIG, 1995). Assim, os 18 cotovelos provocam uma perda de carga correspondente a 8,5 metros ($L_{eq} = 8,5$ m), e uma carga cinética de 20,34 ($N_t = 20,34$).

Devido à perda de carga provocada pelos encaixes o comprimento equivalente da tubulação passa a ser 68,5 metros.

C.2 Cálculo da vazão nominal ^(PERRY,1980)

O Perry mostra uma solução gráfica referente à descarga de um gás perfeito da condição de estagnação em uma grande câmara por um bocal sem atrito seguido de uma tubulação de comprimento L, como mostrado na Figura C.1.

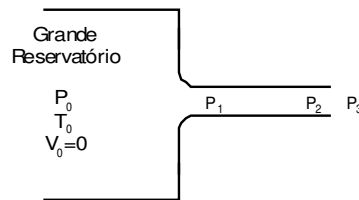


Figura C.1 – Tubo de descarga de um grande reservatório.

Para este sistema podemos calcular a densidade mássica máxima de fluxo, G° , em kg/s.m^2 :

$$G^\circ = P_0 \sqrt{\frac{Mk}{RT_0} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (\text{C.5})$$

Resolvendo a equação para ar à 24 °C, obtemos:

$$G^\circ = 0,002345 \times P_0 \quad (\text{C.6})$$

onde P_0 é a pressão de estagnação absoluta em Pa.

G° pode ser alcançável hipoteticamente numa expansão isotérmica através do sistema quando $N=0$. Essa expansão não é fisicamente realizável. Para uma tubulação de

comprimento finito o fluxo de massa é menor do que G° , a razão entre o fluxo de massa real e o G° pode ser obtida através do gráfico a seguir:

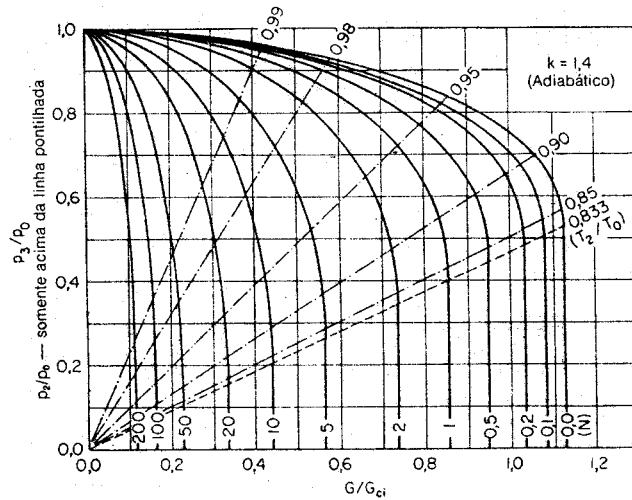


Figura C.2 – Gráfico para o projeto adiabático de fluidos compressíveis através de tubulações (Perry, 1980 Fig 5.29B)

O gráfico da Figura C.2 mostra para vários valores da resistência de atrito N (número de cargas cinéticas do duto), a relação entre P_2/P_0 ou P_3/P_0 e a relação G/G° . Quando P_3 é menor que P_0 , o escoamento é dito sônico, neste ponto as curvas passam a ser verticais e o fluxo torna-se independente da pressão externa. A perda de carga da pressão de saída para a pressão atmosférica acontece em uma série de choques que são altamente não-isoentrópicos.

Nas condições de escoamento sônico, para o ar com $k=1,4$ temos $T_2/T_0 = 0,8333$, no cruzamento dessa linha interrompida com o valor de N correspondente é obtida a razão G/G° .

Como o valor de N é desconhecido, seria preciso conhecer a vazão nominal para calcular o fator de atrito, a determinação da vazão e da perda de carga é feita de forma iterativa entre as equações (C.4) e (C.6).

Dessa maneira, para determinar o valor da vazão volumétrica, primeiro é feito o cálculo de G° através da equação (C.6). Adota-se um valor de f correspondente com a rugosidade relativa para calcular N para o sistema (tubulação e encaixes), com o qual um valor aproximado de G é determinado. Usando este valor de G , obtém-se o número de Reynolds e através do diagrama de Moody obtém-se novo valor de f . Repetem-se os

cálculos usando este valor revisado estimado de f , são feitas interações até que o número de Reynolds não sofra variações.

Tabela C.1 – Cálculo da vazão nominal

P_0 (psig)	ΔP (psi)	Re	N	Q (kg/s)	Q (l/min)
16	21,64	56395	165,7	0,0130	314,44
30	31,53	82426	164,6	0,0191	315,65
40	38,61	101026	164,2	0,0234	316,09
50	45,68	119646	163,8	0,0277	316,53
60	52,75	138226	163,6	0,0320	316,75
70	59,81	156829	163,4	0,0363	316,97
80	66,92	175400	163,1	0,0406	317,30

O resultado final obtido está na Tabela C.1. A perda de carga mostrada na Tabela C.1 aconteceria no caso experimental se a tubulação não tivesse o orifício de 1 mm de diâmetro, que a mantém pressurizada, na saída. Pelos perfis dos transientes de pressão obtidos nos experimentos é possível observar que o valor de pressão obtido pelo transdutor T1, no início da tubulação, é praticamente igual ao obtido pelo transdutor T2, no fim da tubulação, o que mostra que pela tubulação ser pressurizada a perda de carga é praticamente inexistente.

C.3 Cálculo da porcentagem de vazamento (LUDWIG, 1995)

Para calcular a porcentagem de vazamento, primeiro é preciso calcular a vazão de vazamento.

O cálculo da vazão de vazamento, q_{or} em kg/s, é feito através de uma fórmula que fornece o fluxo de gás (fluídos compressíveis) através de um bocal ou orifício quando há escoamento na tubulação (Eq. 2-48 LUDWIG, 1995).

$$q_{or} = \rho \cdot Y \cdot C' \cdot A_{or} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (C.7)$$

$$C' = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (C.8)$$

onde: Y é o fator de expansão, C' é o coeficiente de fluxo para o orifício, β a razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno e C_d o coeficiente de descarga do orifício

(adotado como 0,72).

O uso do coeficiente C' elimina o cálculo da velocidade de aproximação. Como a descarga de ar da tubulação é feita para a atmosfera, ΔP é igual à pressão manométrica na entrada. A massa específica ρ foi calculada nas condições de fluxo e o fator de expansão Y é dependente de ΔP e de β . (obtido através da Figura 2-38 B, LUDWIG,1995).

A Tabela C.2 mostra os resultados obtidos para os diversos orifícios.

Tabela C.2 – Porcentagem de vazamento na tubulação com escoamento contínuo

Orifício d (mm)	d (m)	A (m ²)	C	P (psig)	ρ (kg/m ³)	Y	q _{or} (l/min)	Q _{tub} (l/min)	% VAZ
0,07	0,0007	3,85E-07	0,72	16	2,49	0,83	4,11	314,4	1,31
	0,0007	3,85E-07	0,72	30	3,62	0,78	4,38	315,6	1,39
	0,0007	3,85E-07	0,72	40	4,44	0,76	4,45	316,1	1,41
	0,0007	3,85E-07	0,72	50	5,25	0,75	4,52	316,5	1,43
	0,0007	3,85E-07	0,72	60	6,06	0,74	4,54	316,7	1,43
	0,0007	3,85E-07	0,72	70	6,87	0,74	4,61	317,0	1,45
	0,0007	3,85E-07	0,72	80	7,68	0,73	4,60	317,3	1,45
0,1	0,001	7,85E-07	0,72	16	2,49	0,83	8,38	314,4	2,67
	0,001	7,85E-07	0,72	30	3,62	0,78	8,94	315,6	2,83
	0,001	7,85E-07	0,72	40	4,44	0,76	9,09	316,1	2,88
	0,001	7,85E-07	0,72	50	5,25	0,75	9,22	316,5	2,91
	0,001	7,85E-07	0,72	60	6,06	0,74	9,27	316,7	2,93
	0,001	7,85E-07	0,72	70	6,87	0,74	9,41	317,0	2,97
	0,001	7,85E-07	0,72	80	7,68	0,73	9,38	317,3	2,96
0,2	0,002	3,14E-06	0,72	16	2,49	0,83	33,52	314,4	10,66
	0,002	3,14E-06	0,72	30	3,62	0,78	35,74	315,6	11,33
	0,002	3,14E-06	0,72	40	4,44	0,76	36,35	316,1	11,50
	0,002	3,14E-06	0,72	50	5,25	0,75	36,88	316,5	11,65
	0,002	3,14E-06	0,72	60	6,06	0,74	37,10	316,7	11,71
	0,002	3,14E-06	0,72	70	6,87	0,74	37,63	317,0	11,87
	0,002	3,14E-06	0,72	80	7,68	0,73	37,53	317,3	11,83
0,3	0,003	7,07E-06	0,72	16	2,49	0,83	75,41	314,4	23,99
	0,003	7,07E-06	0,72	30	3,62	0,78	80,42	315,6	25,48
	0,003	7,07E-06	0,72	40	4,44	0,76	81,80	316,1	25,88
	0,003	7,07E-06	0,72	50	5,25	0,75	82,98	316,5	26,22
	0,003	7,07E-06	0,72	60	6,06	0,74	83,47	316,7	26,36
	0,003	7,07E-06	0,72	70	6,87	0,74	84,67	317,0	26,71
	0,003	7,07E-06	0,72	80	7,68	0,73	84,44	317,3	26,61
0,4	0,004	1,26E-05	0,72	16	2,49	0,83	134,07	314,4	42,64
	0,004	1,26E-05	0,72	30	3,62	0,78	142,97	315,6	45,30
	0,004	1,26E-05	0,72	40	4,44	0,76	145,41	316,1	46,00
	0,004	1,26E-05	0,72	50	5,25	0,75	147,52	316,5	46,61
	0,004	1,26E-05	0,72	60	6,06	0,74	148,39	316,7	46,85
	0,004	1,26E-05	0,72	70	6,87	0,74	150,52	317,0	47,48
	0,004	1,26E-05	0,72	80	7,68	0,73	150,12	317,3	47,31
0,5	0,005	1,96E-05	0,72	16	2,49	0,83	209,48	314,4	66,63
	0,005	1,96E-05	0,72	30	3,62	0,78	223,40	315,6	70,78
	0,005	1,96E-05	0,72	40	4,44	0,76	227,21	316,1	71,88
	0,005	1,96E-05	0,72	50	5,25	0,75	230,50	316,5	72,83
	0,005	1,96E-05	0,72	60	6,06	0,74	231,86	316,7	73,21
	0,005	1,96E-05	0,72	70	6,87	0,74	235,19	317,0	74,19
	0,005	1,96E-05	0,72	80	7,68	0,73	234,57	317,3	73,93

Apêndice D

Simulação do Transiente Causado por um Vazamento

Foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C para a simulação do transiente causado pelo vazamento na tubulação com escoamento contínuo de gás. O programa fornece o perfil da pressão e a vazão em massa, ao longo da tubulação em função do tempo, quando ocorre um vazamento com determinada vazão e posição na tubulação.

O algoritmo do programa foi desenvolvido usando as equações do **Capítulo 3**. Para adequar ao modelo experimental foi considerado:- pressão no estado estacionário constante e igual à pressão inicial, um reservatório a montante e um orifício a jusante.

A tubulação foi dividida em 100 partes, as equações 3.38 e 3.39 são usadas para calcular os pontos intermediários da tubulação. O intervalo de tempo utilizado foi de 0,0023 segundos respeitando a condição de estabilidade de Courant.

D.1 Parâmetros e etapas do programa de simulação

Para a simulação do transiente de pressão na tubulação foram utilizados os seguintes parâmetros:

Tubulação:

Material: ferro galvanizado.

Comprimento, $L = 60$ m.

Comprimento equivalente, $Leq = 68,5$ m. (calculado no **Apêndice C**)

Diâmetro, $D = \frac{1}{2}'' = 0,0127$ m.

Ângulo entre o plano horizontal e a direção longitudinal do conduto, $\alpha=0$ tubulação horizontal.

Rugosidade relativa, $\epsilon/D = 0,012$.

Fluído:

Gás escoando na tubulação: ar.

Temperatura ambiente, $T = 25^{\circ}\text{C}$.

Massa molar, $M = 0,028964 \text{ kg/mol}$ (BEGGS).

Viscosidade, $\mu_{25^{\circ}\text{C}} = 0,0184 \text{ cp} = 1,84 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ (Gás Engineerrs' Handbook).

Fator de compressibilidade, $z = 0,9973$ (PERRY).

Constante universal dos gases, $R = 8,3144 \text{ J/(mol K)}$.

Variáveis: condições de operação

P_{res} : Pressão inicial.

x/l : Posição do vazamento.

Q_0 : Vazão inicial de gás.

Q_{or}/Q_0 : razão do vazamento.

O programa apresenta as seguintes etapas:

1. Entrada de dados.
2. Determinação condições do estado estacionário.
3. Cálculo da pressão e vazão no interior da tubulação
4. Cálculo da pressão e vazão nas extremidades da tubulação e no vazamento (condições de contorno).
5. Armazenamento dos dados e impressão.
6. Novo incremento no tempo e retorna ao passo 3, até atingir o tempo determinado na simulação.

A listagem do programa de simulação do vazamento em uma tubulação com escoamento contínuo encontra-se no **Apêndice G**.

D.2 Resultados da simulação

Os resultados da simulação são mostrados nos gráficos a seguir, onde é possível observar o perfil do transiente provocado pelo vazamento.

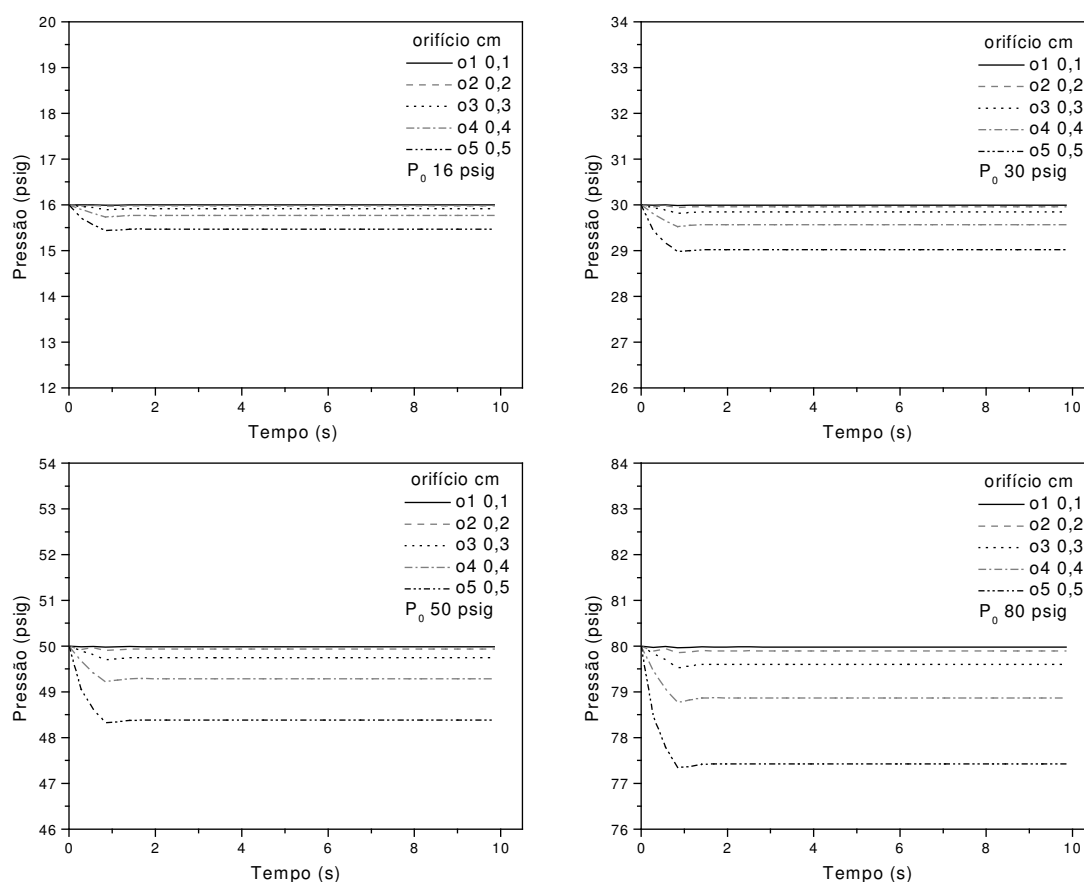


Figura D.1 – Resultados simulados do transiente de pressão. Transdutor T1.

A Figura D.1 mostra os resultados simulados do transiente de pressão obtidos para um vazamento no começo da linha, o perfil mostrado foi adquirido por um transdutor localizado imediatamente antes do vazamento. A simulação foi realizada para as pressões iniciais de 16, 30, 50 e 80 psig e a ruptura na tubulação foi simulada por orifícios de 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 cm.

Apêndice D

O perfil do transiente de pressão obtido mostra uma queda de pressão seguida de uma leve recuperação atingindo um patamar onde a pressão passa a ser constante. A queda de pressão depende da magnitude do vazamento (diâmetro do orifício), quanto maior o vazamento, mais pronunciada é a queda de pressão. A queda de pressão provocada pelo orifício de 1 mm é praticamente inexistente.

Pela Tabela D.1 podemos fazer uma análise do perfil de pressão ao longo da tubulação. Percebe-se que após o vazamento o valor da pressão passa a ser praticamente constante na tubulação.

Tabela D.1 – Valores de pressão ao longo da tubulação com o tempo
(vazamento em $x/L=0,4$, P_0 80 psig e orifício de 5mm)

Distância X/L	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Tempo											
0,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
0,28	80,00	77,69	75,27	72,58	69,60	71,08	72,19	72,85	73,14	73,23	73,24
0,84	80,00	75,81	71,30	66,29	60,55	60,79	60,93	60,99	61,01	61,00	60,99
1,41	80,00	74,77	69,13	62,92	55,87	55,89	55,89	55,88	55,87	55,86	55,85
1,97	80,00	74,28	68,10	61,30	53,64	53,63	53,62	53,61	53,60	53,59	53,58
2,53	80,00	74,06	67,63	60,56	52,60	52,60	52,59	52,58	52,57	52,56	52,54
3,10	80,00	73,95	67,41	60,22	52,14	52,13	52,11	52,10	52,09	52,07	52,06
3,66	80,00	73,91	67,31	60,06	51,92	51,90	51,89	51,88	51,86	51,84	51,83
4,22	80,00	73,88	67,27	59,99	51,81	51,80	51,78	51,77	51,75	51,74	51,72
4,78	80,00	73,87	67,24	59,96	51,77	51,75	51,73	51,72	51,70	51,69	51,67
5,35	80,00	73,87	67,23	59,94	51,74	51,73	51,71	51,69	51,68	51,66	51,65
5,91	80,00	73,87	67,23	59,93	51,73	51,72	51,70	51,68	51,67	51,65	51,64
6,47	80,00	73,87	67,23	59,93	51,73	51,71	51,69	51,68	51,66	51,65	51,63
7,04	80,00	73,87	67,22	59,93	51,72	51,71	51,69	51,68	51,66	51,64	51,63
7,60	80,00	73,87	67,22	59,93	51,72	51,71	51,69	51,68	51,66	51,64	51,63
8,16	80,00	73,87	67,22	59,93	51,72	51,71	51,69	51,67	51,66	51,64	51,63
8,72	80,00	73,87	67,22	59,93	51,72	51,71	51,69	51,67	51,66	51,64	51,63
9,29	80,00	73,87	67,22	59,93	51,72	51,71	51,69	51,67	51,66	51,64	51,63
9,85	80,00	73,87	67,22	59,93	51,72	51,71	51,69	51,67	51,66	51,64	51,63

A Figura D.2 mostra o perfil de pressão obtido pelo transdutor T2, localizado no fim da linha.

Percebemos que ocorre um aumento na pressão, uma queda abrupta e a estabilização da pressão. Esse aumento da pressão ocorre porque no instante inicial o efeito do vazamento não foi sentido no fim da tubulação, o gás continua chegando na mesma vazão e devido ao orifício no fim da linha, a pressão aumenta.

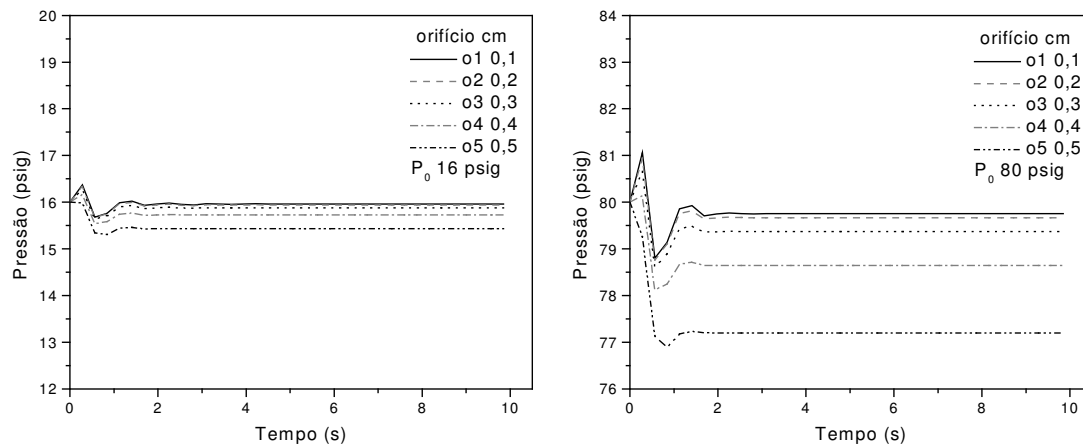


Figura D.2 – Resultados simulados do transiente de pressão. Transdutor T2

A Figura D.3 mostra o perfil do transiente de pressão obtido para a pressão inicial de 80 psig, para um vazamento provocado por um orifício de 0,5 cm localizado em diferentes posições ao longo da tubulação, x/L 0,03; 0,1; 0,5 e 0,8 (x = distância do vazamento do início da linha, L = comprimento da tubulação).

Pela análise da figura percebemos que aumentando a distância do vazamento ao início da linha, ou seja, distanciando do reservatório onde a pressão é constante, a queda de pressão é maior. E o perfil do transiente de pressão obtido pelo transdutor T1, localizado imediatamente antes do vazamento, passa a ser idêntico ao obtido por T2, localizado no fim da tubulação.

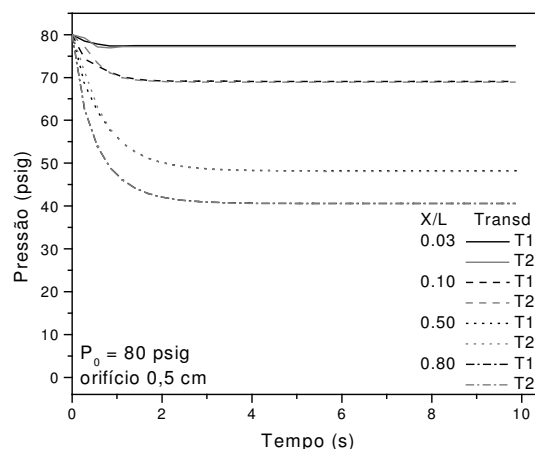


Figura D.3 – Transiente de pressão, P_0 80 psig, orifício 0,5 cm e diferentes x/L .

Apêndice E

Transientes de pressão causados por vazamento em um trecho fechado de tubulação.

Neste apêndice são apresentados os transientes de pressão causados por um vazamento em um trecho fechado de tubulação de 6 metros de comprimento, estes resultados são comparados com os transientes obtidos em um trecho fechado de tubulação de 60 metros de comprimento.

Apêndice E

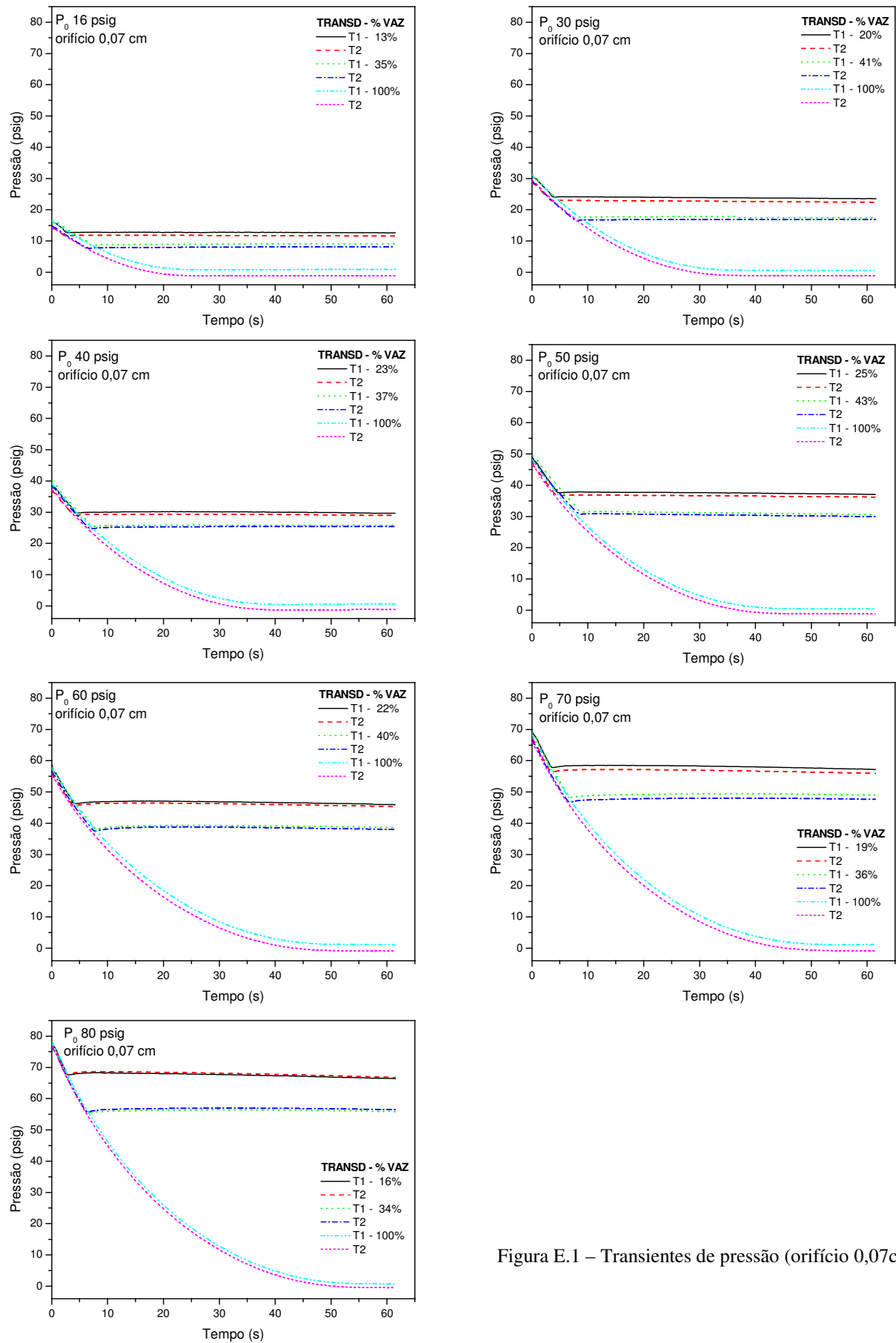


Figura E.1 – Transientes de pressão (orifício 0,07cm)

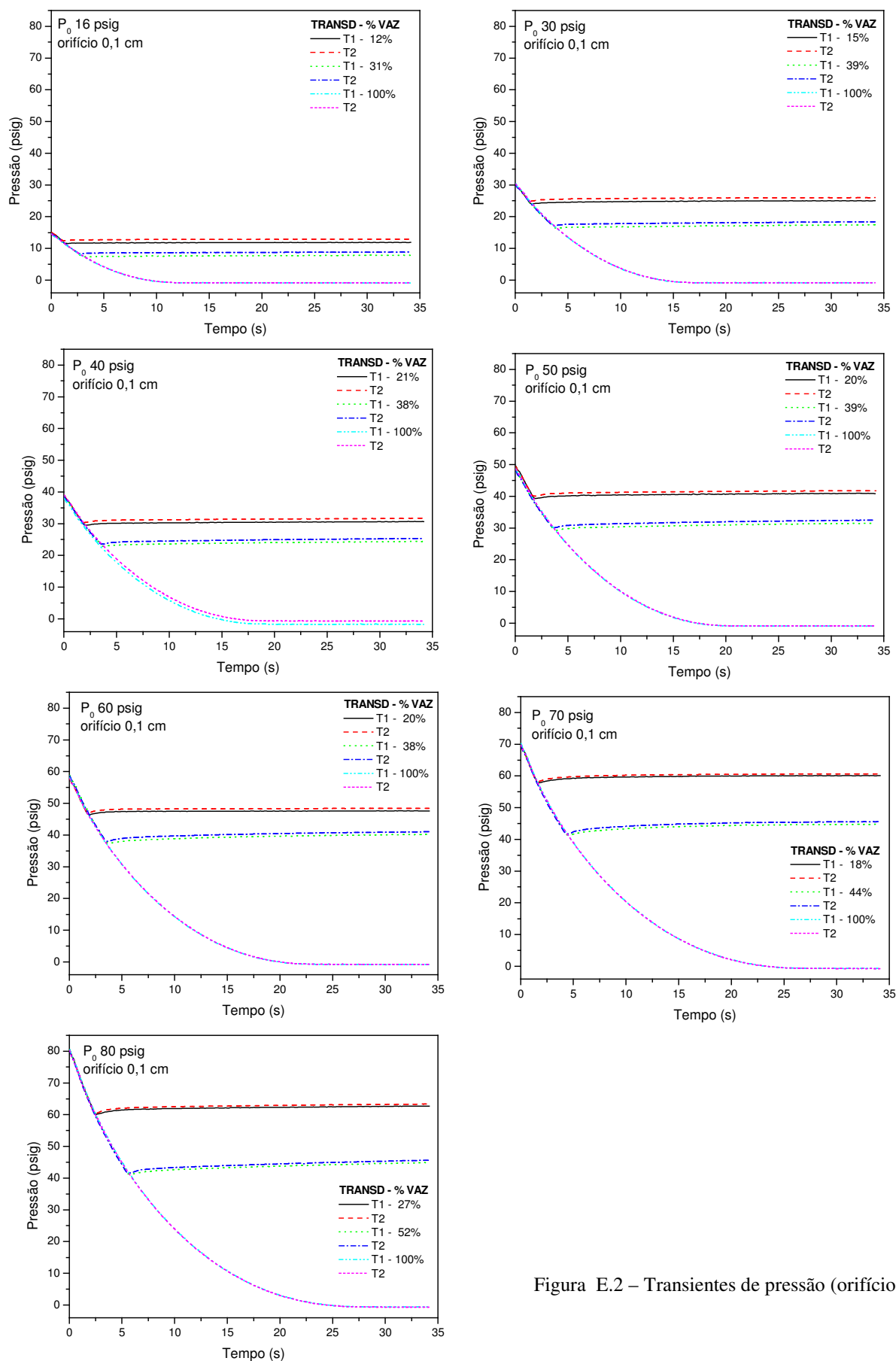


Figura E.2 – Transientes de pressão (orifício 0,1cm)

Apêndice E

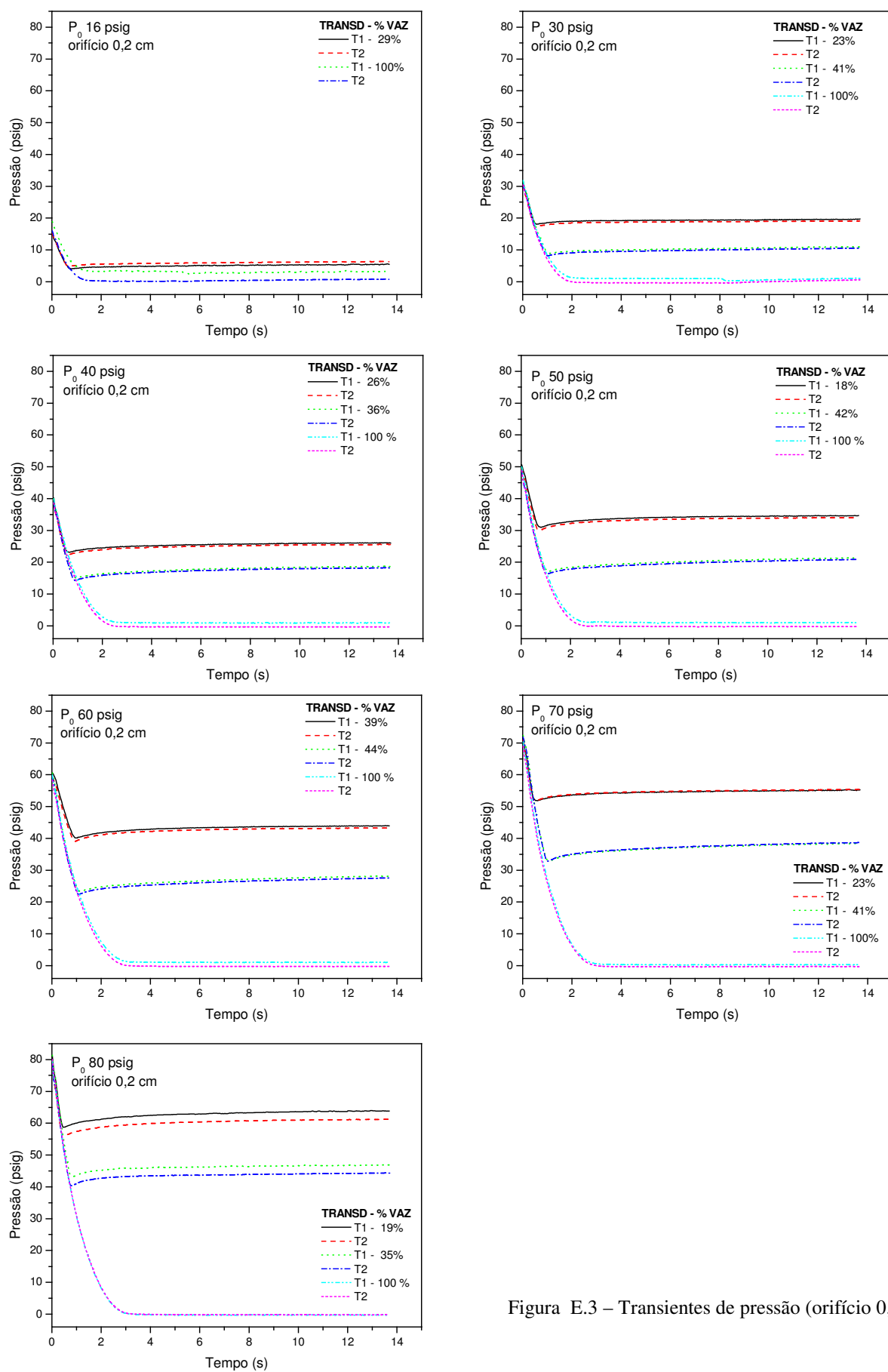


Figura E.3 – Transientes de pressão (orifício 0,2cm)

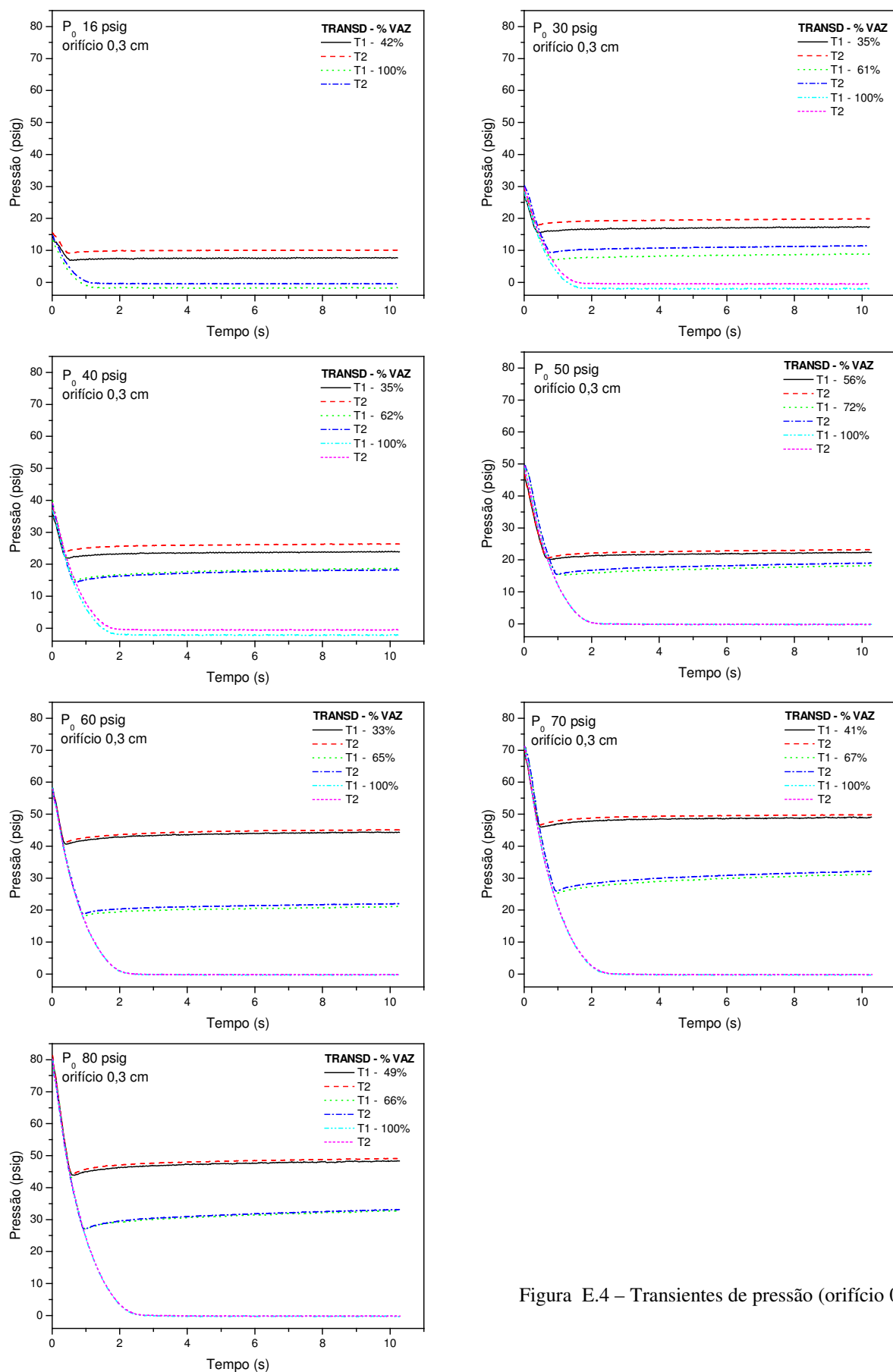


Figura E.4 – Transientes de pressão (orifício 0,3 cm)

Apêndice E

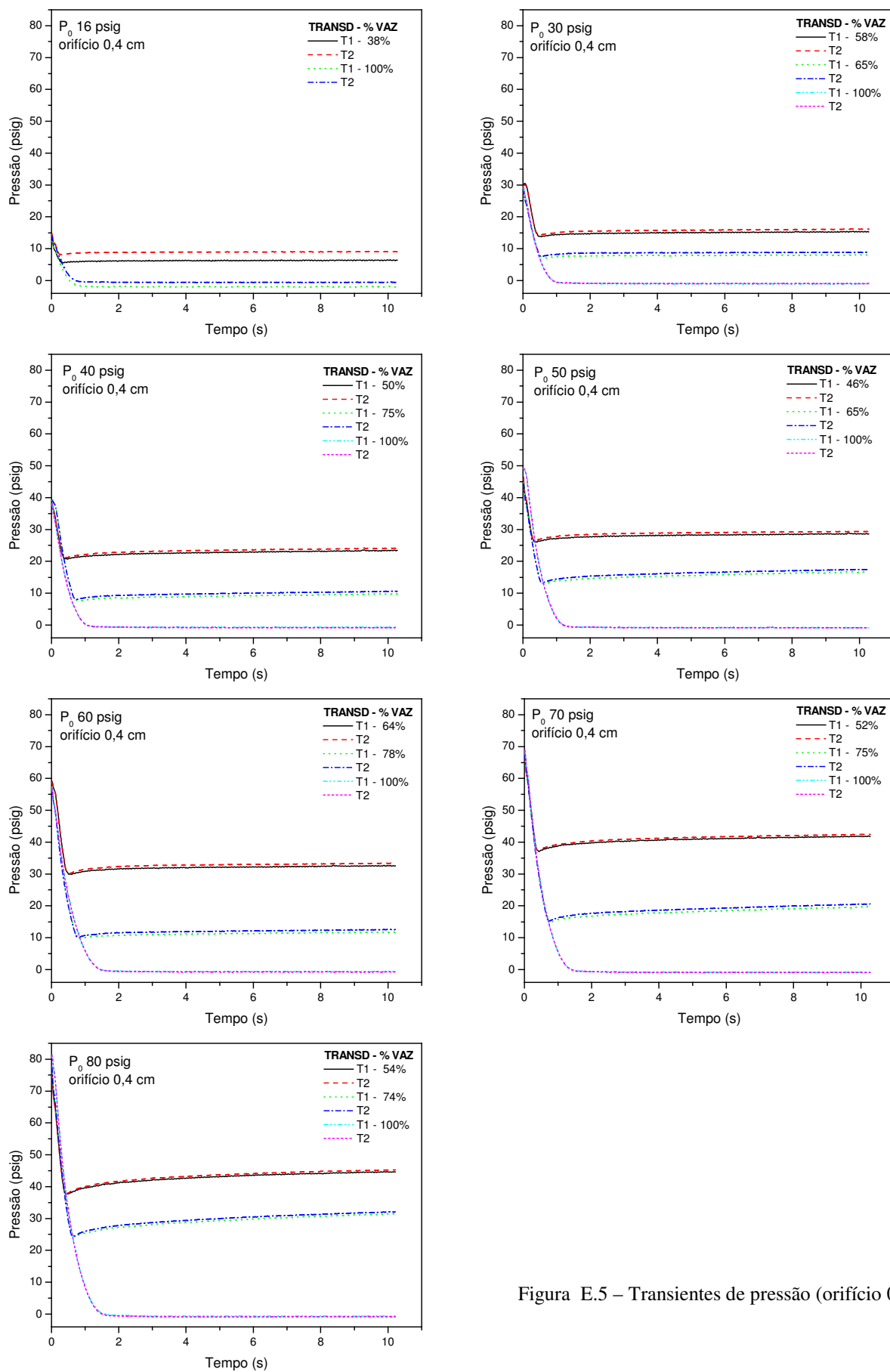


Figura E.5 – Transientes de pressão (orifício 0,4 cm)

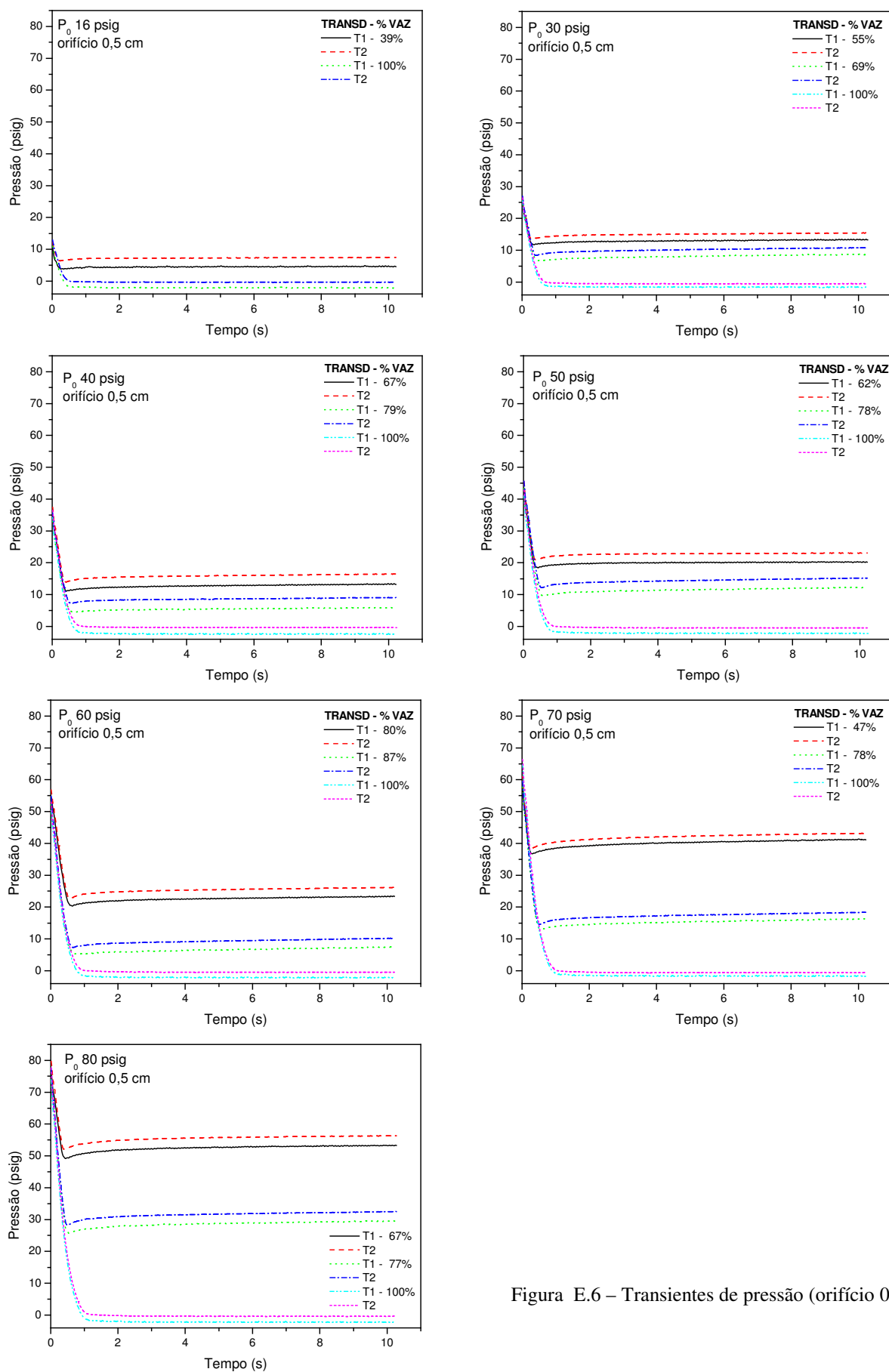


Figura E.6 – Transientes de pressão (orifício 0,5cm)

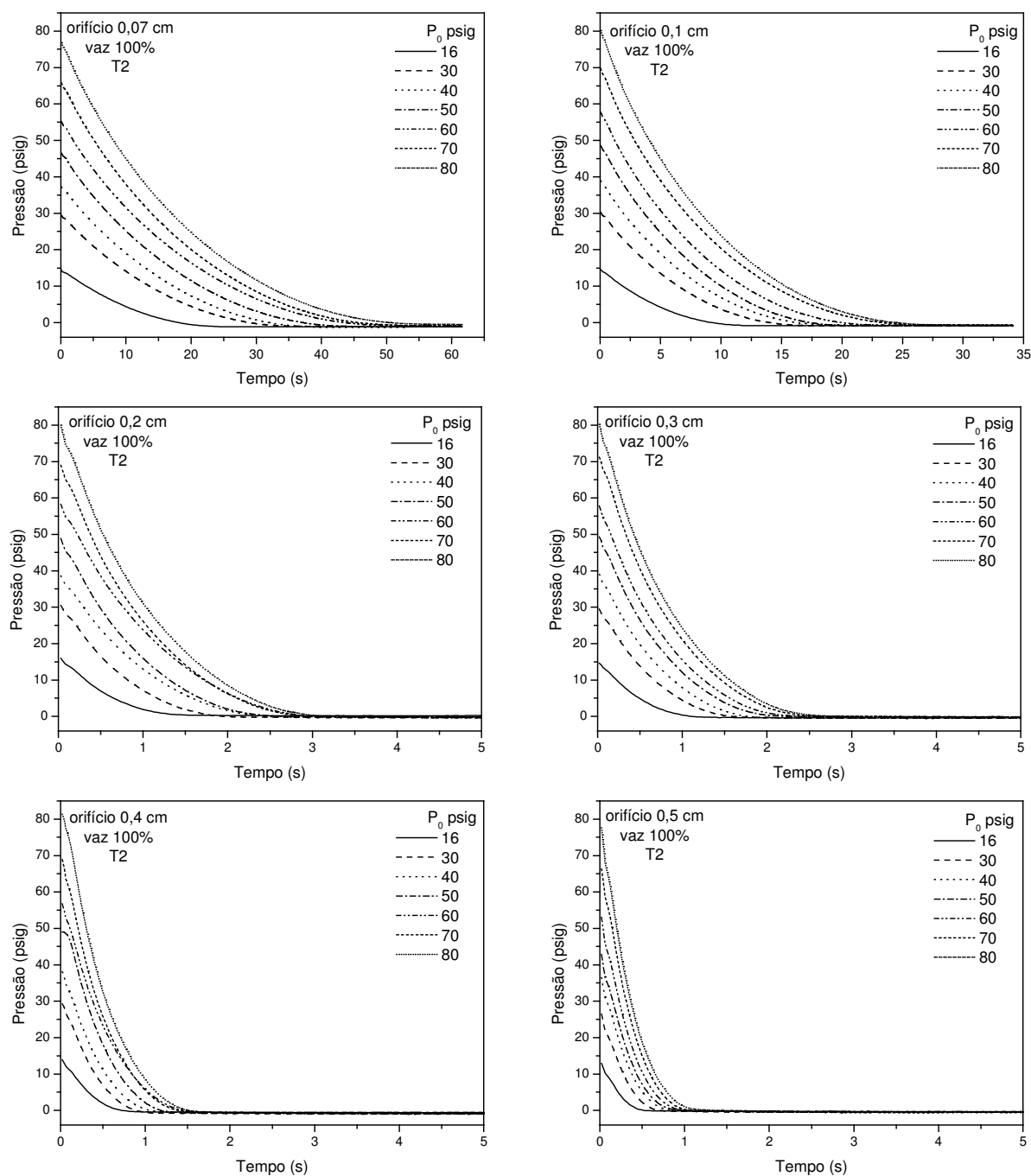


Figura E.7 – Comparação entre transientes de pressão, a diferentes pressões iniciais para o mesmo orifício

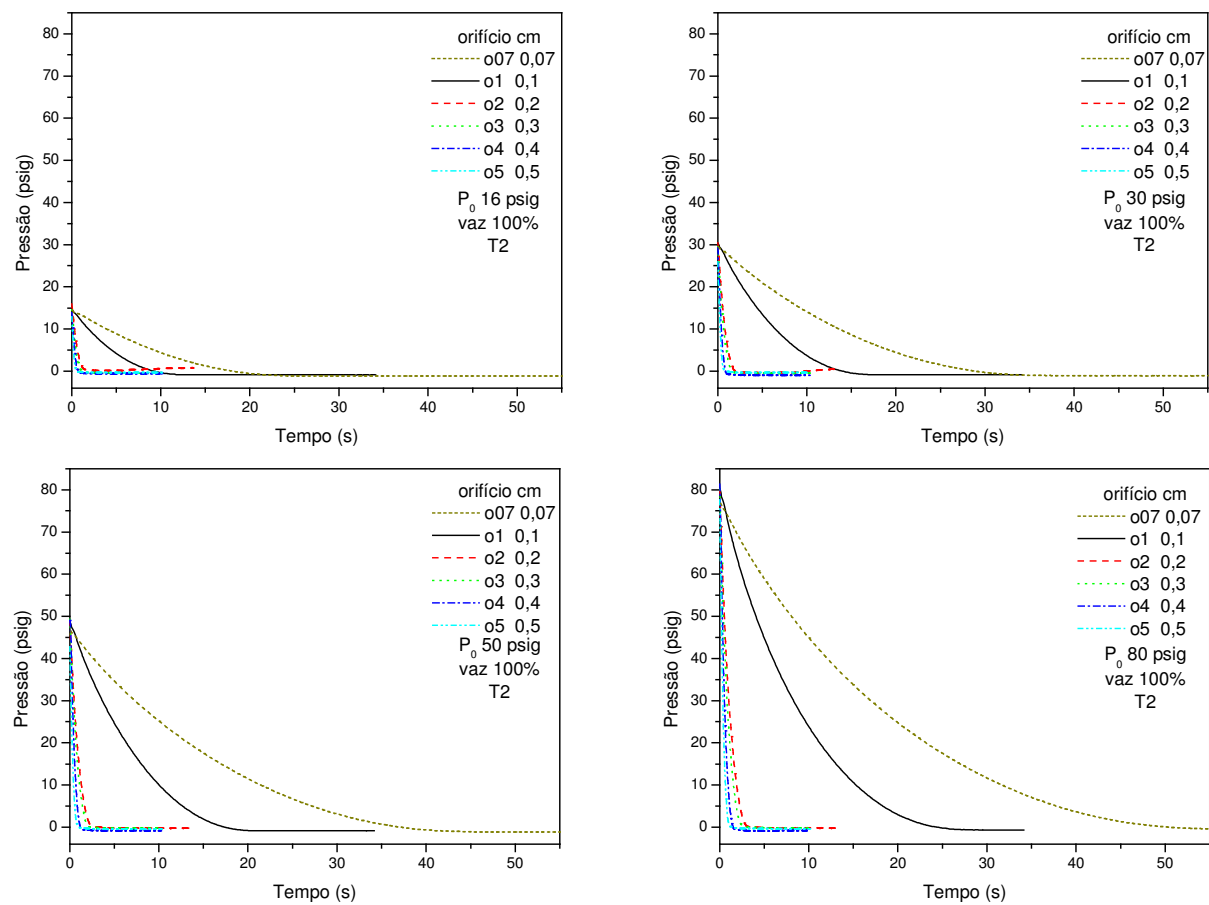


Figura E.8 – Comparação entre transientes de pressão para orifícios diferentes e mesma pressão inicial.

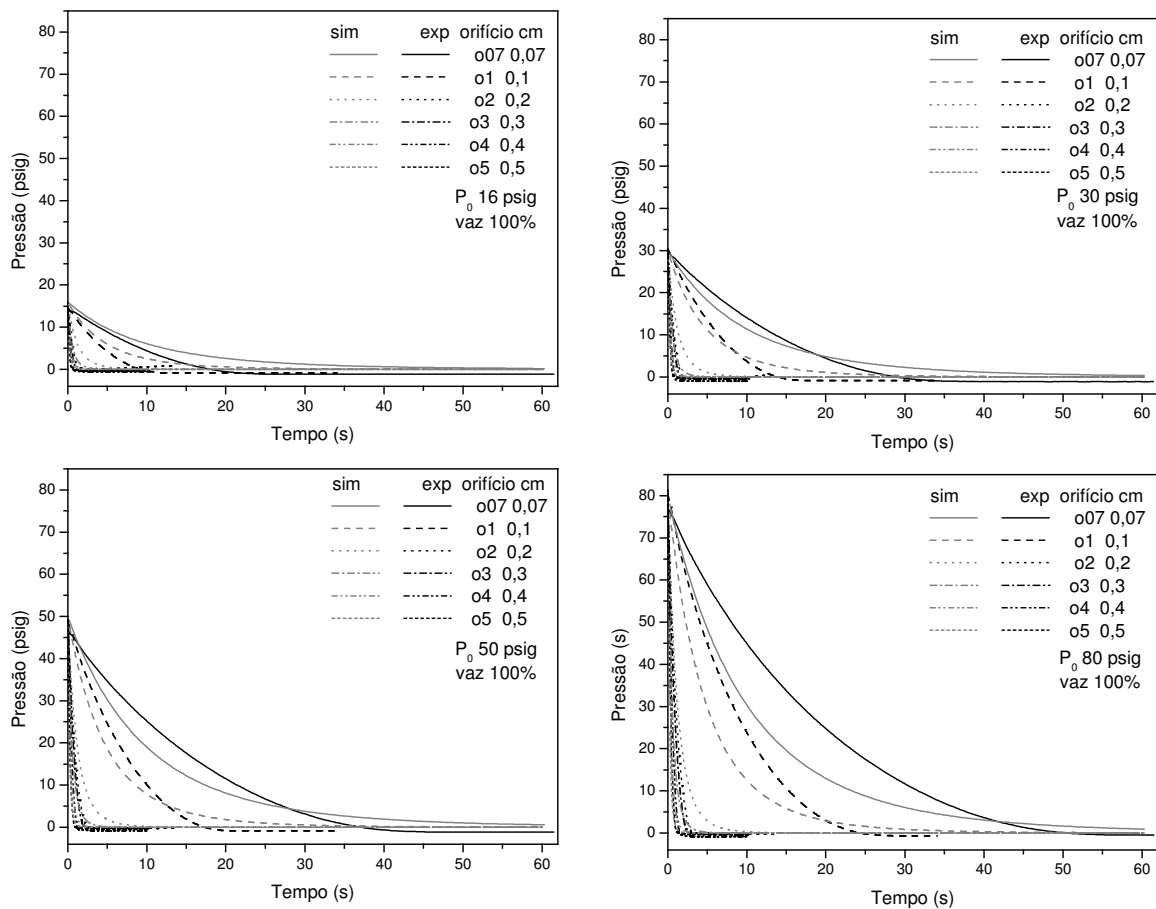


Figura E.9 – Comparação de resultados experimentais e simulados
Tubulação de 6 metros

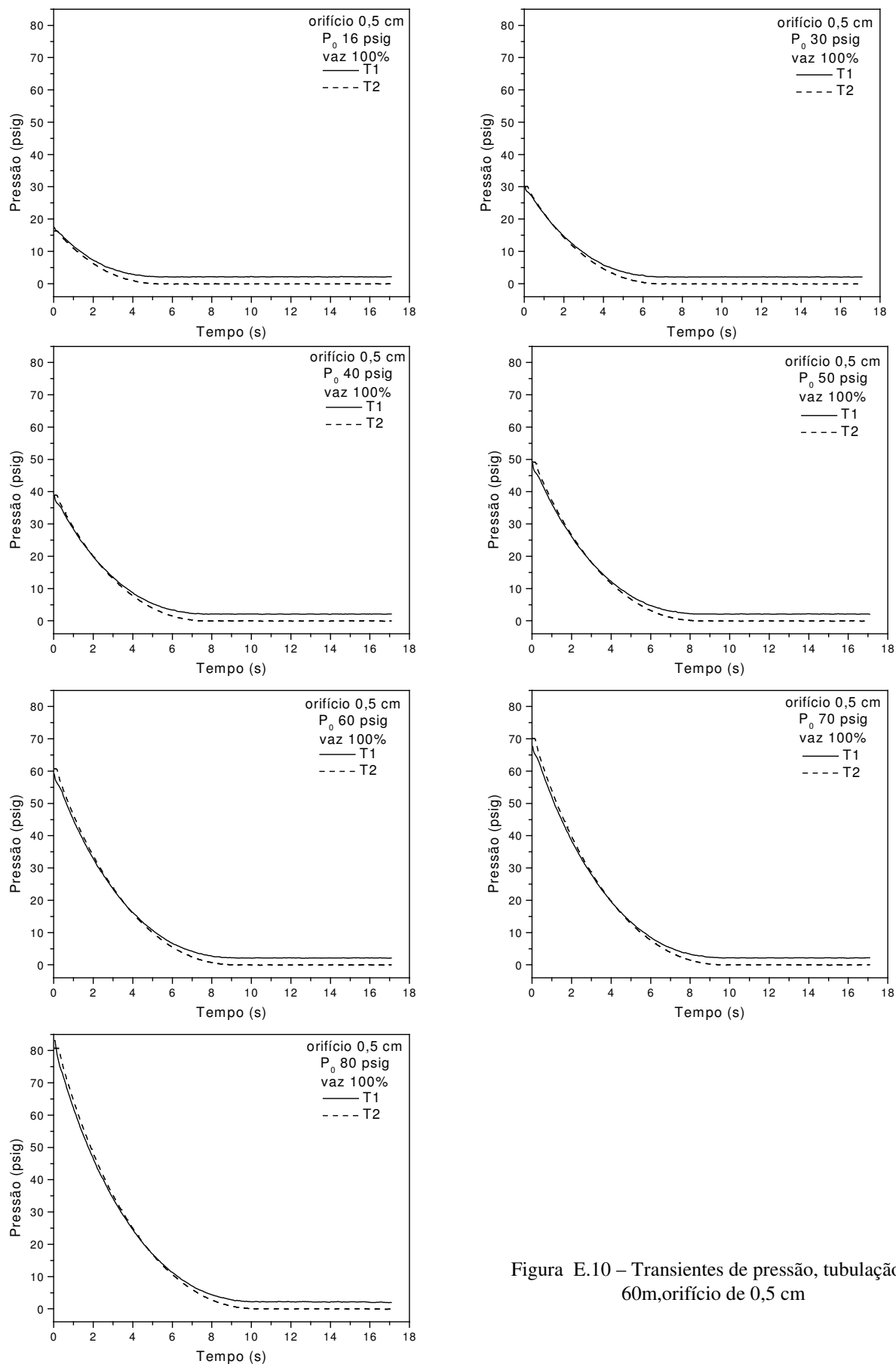


Figura E.10 – Transientes de pressão, tubulação de 60m, orifício de 0,5 cm

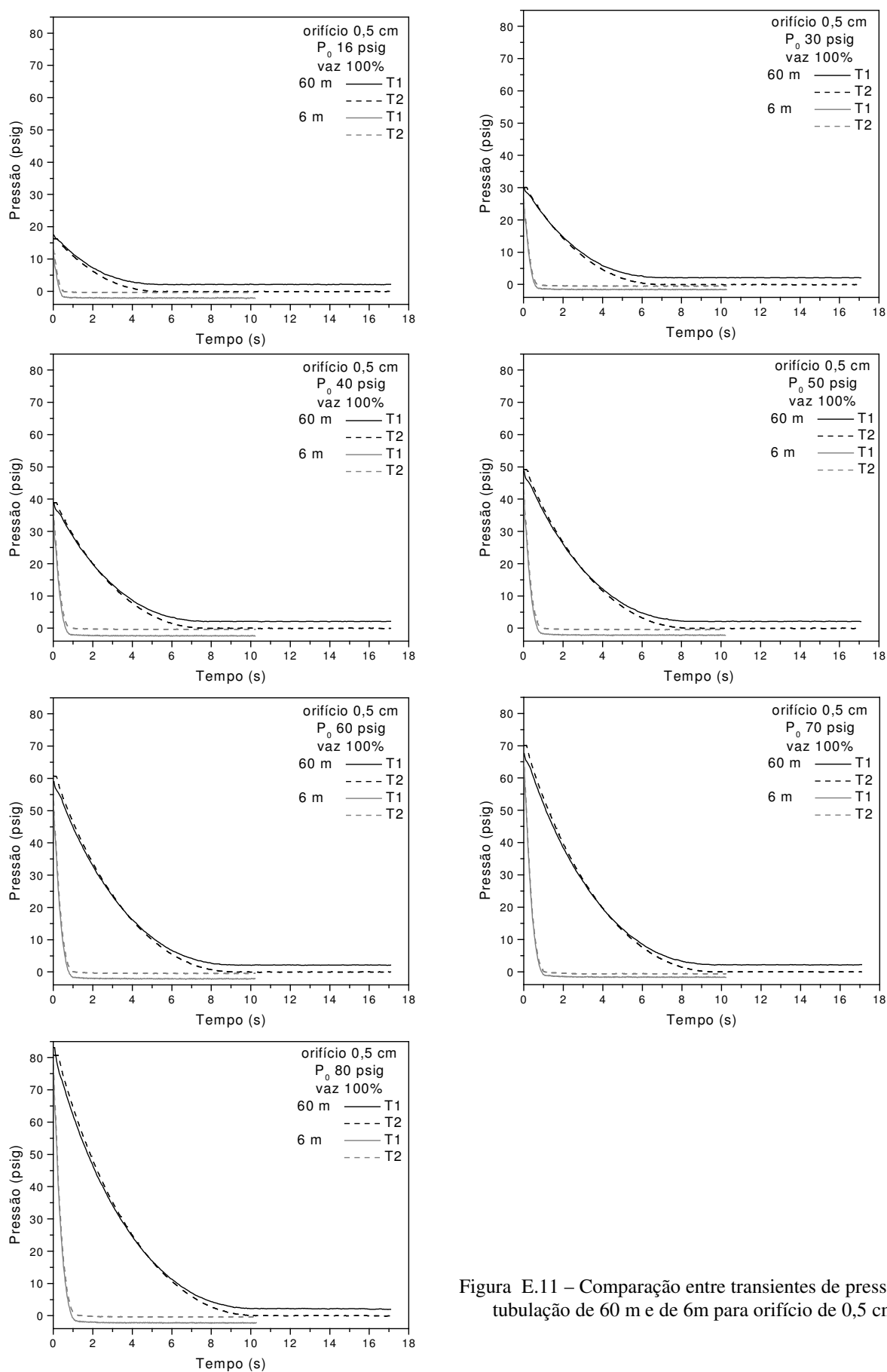


Figura E.11 – Comparação entre transientes de pressão da tubulação de 60 m e de 6 m para orifício de 0,5 cm

Apêndice F

Transientes de pressão causados por vazamento na tubulação com escoamento contínuo

Neste apêndice são apresentados os transientes de pressão causados por um vazamento em uma tubulação pressurizada de 60 metros de comprimento com escoamento contínuo de ar.

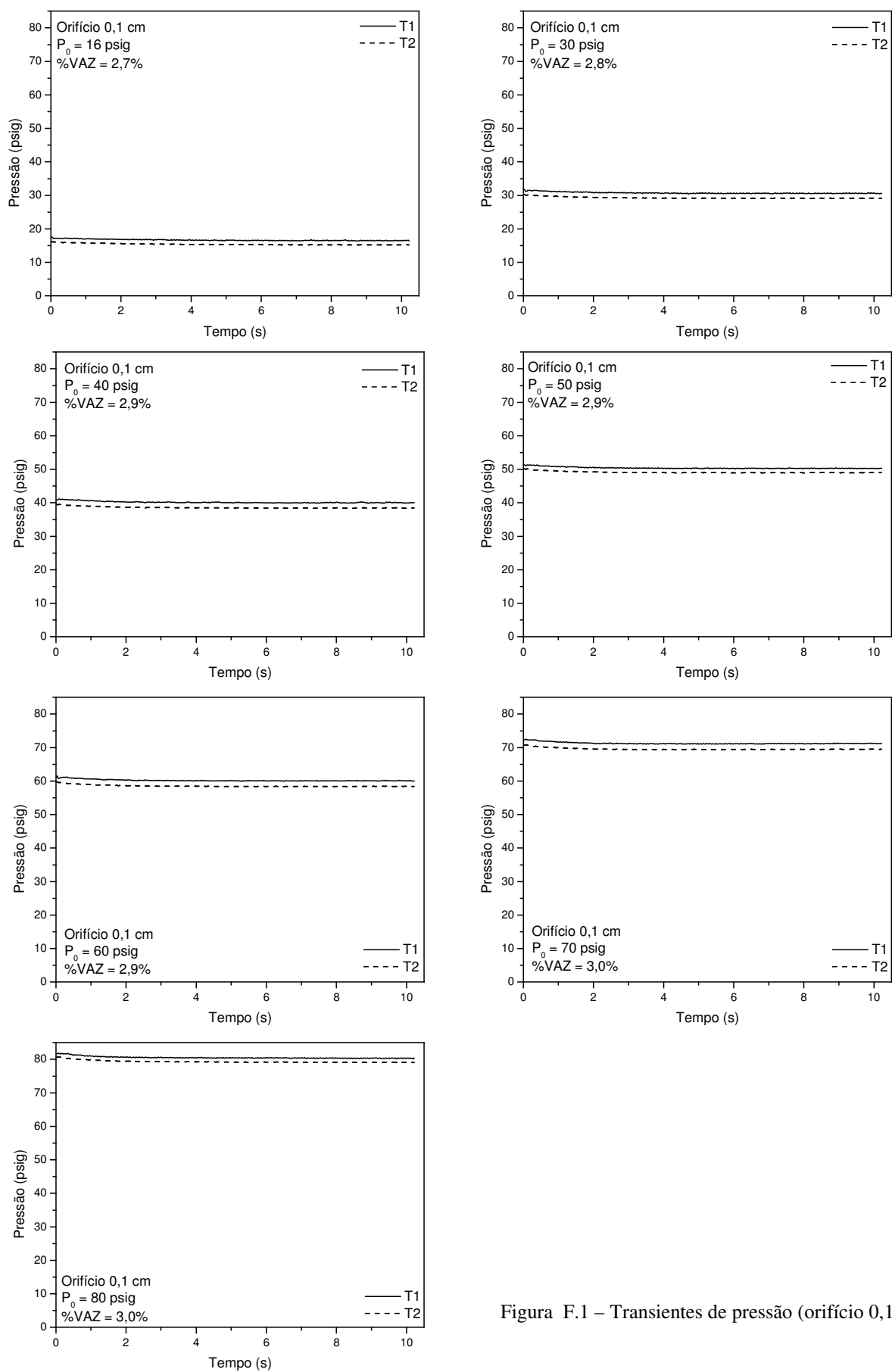


Figura F.1 – Transientes de pressão (orifício 0,1cm)

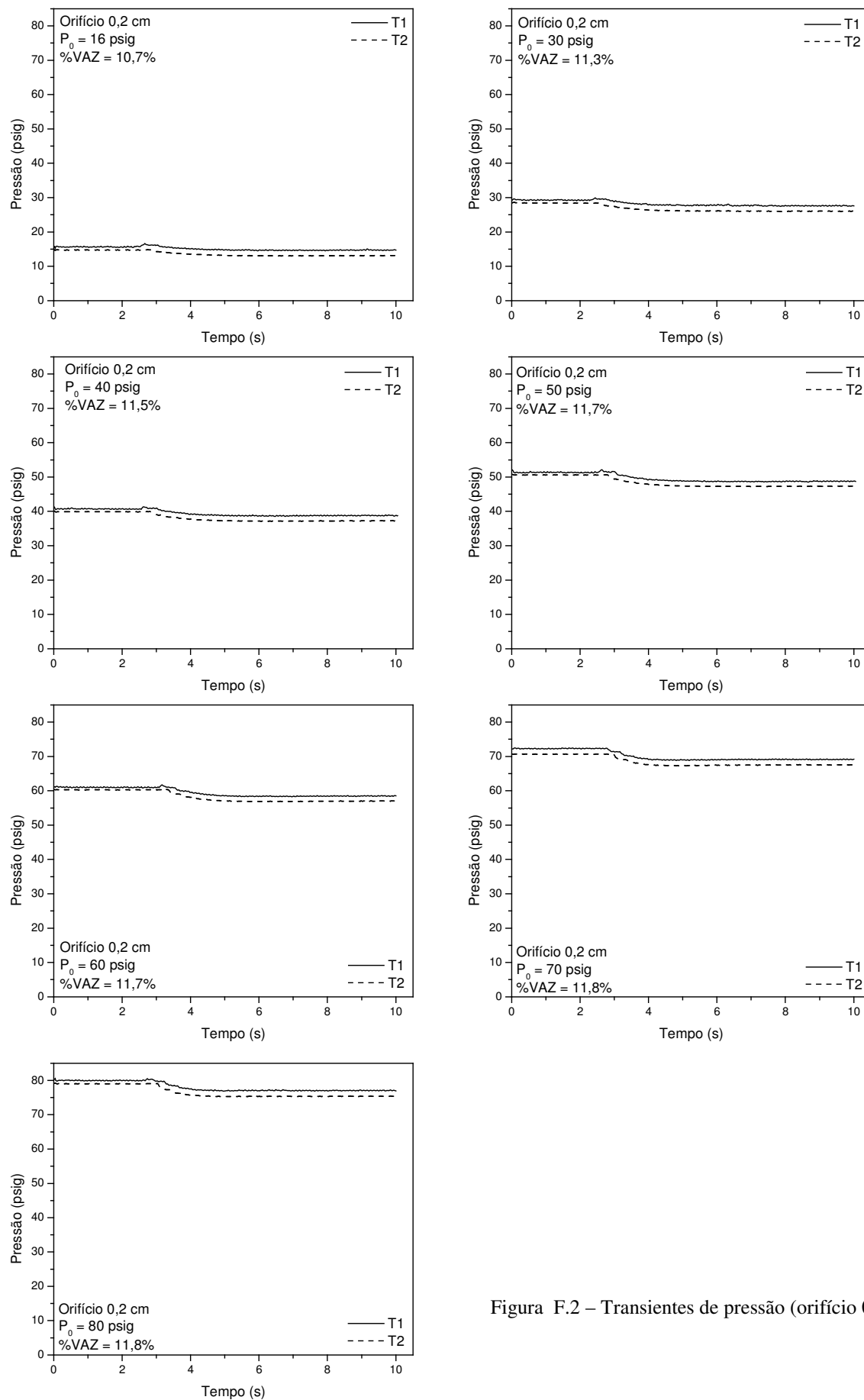


Figura F.2 – Transientes de pressão (orifício 0,2cm)

Apêndice F

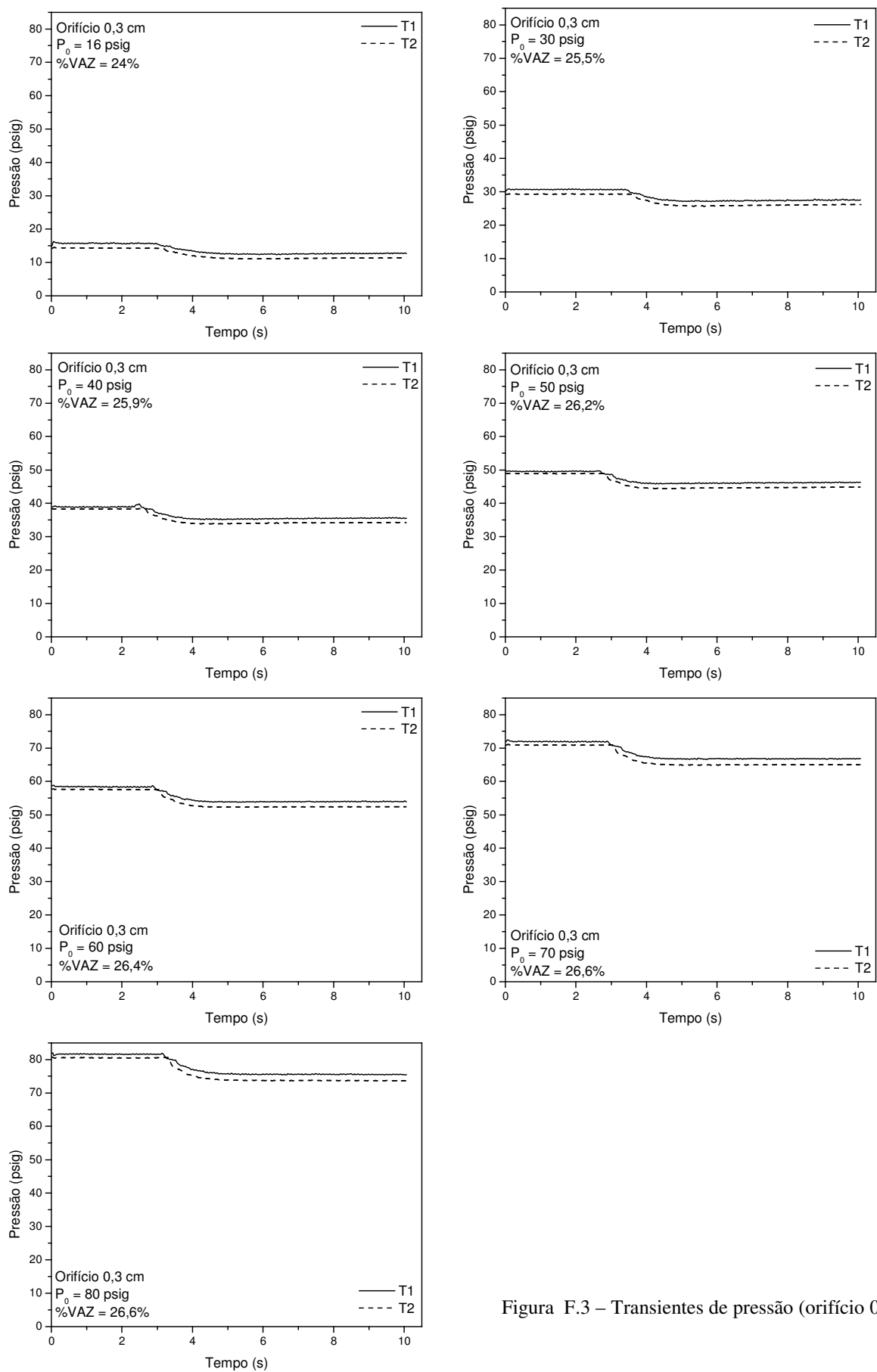


Figura F.3 – Transientes de pressão (orifício 0,3cm)

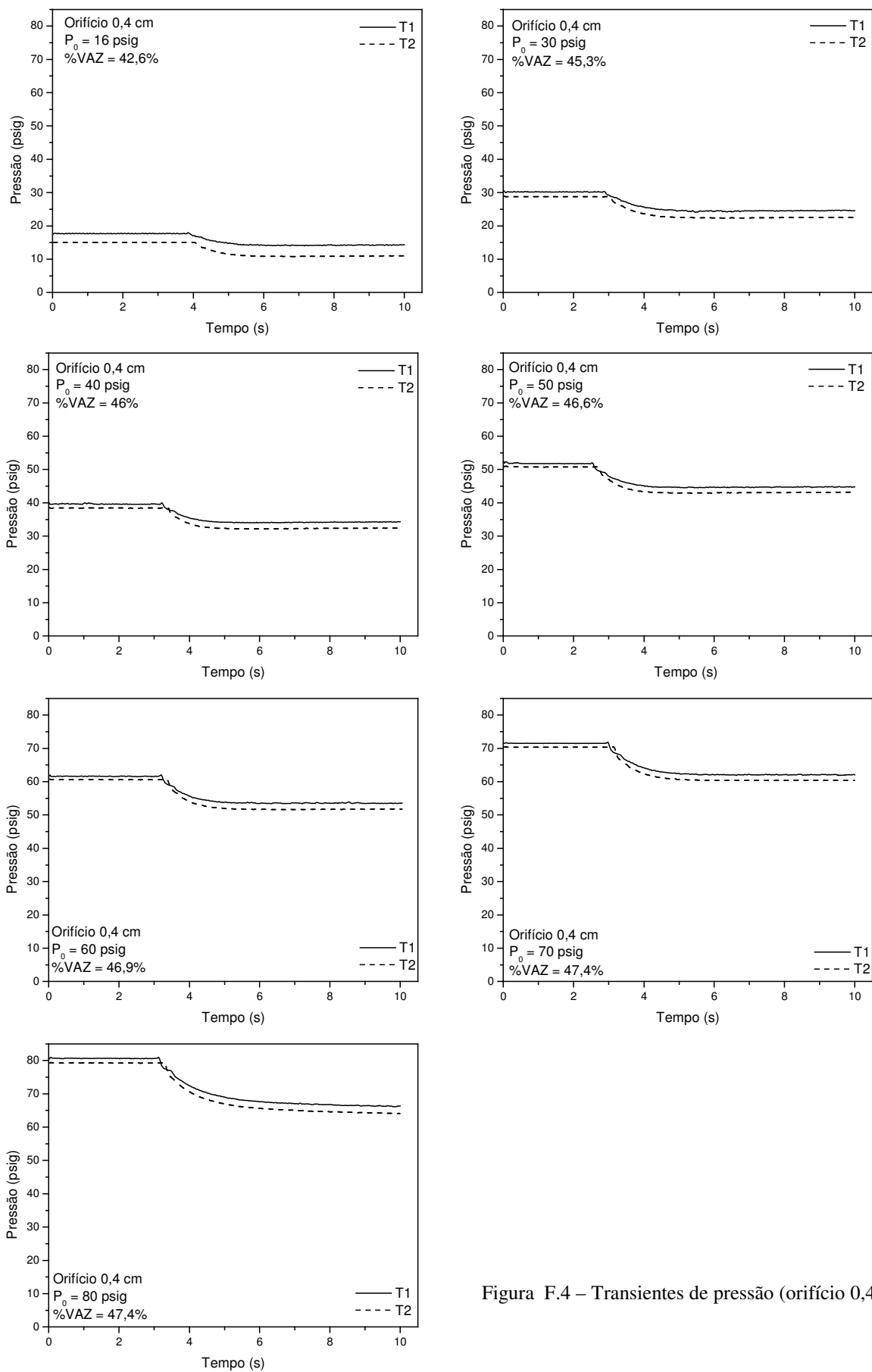


Figura F.4 – Transientes de pressão (orifício 0,4cm)

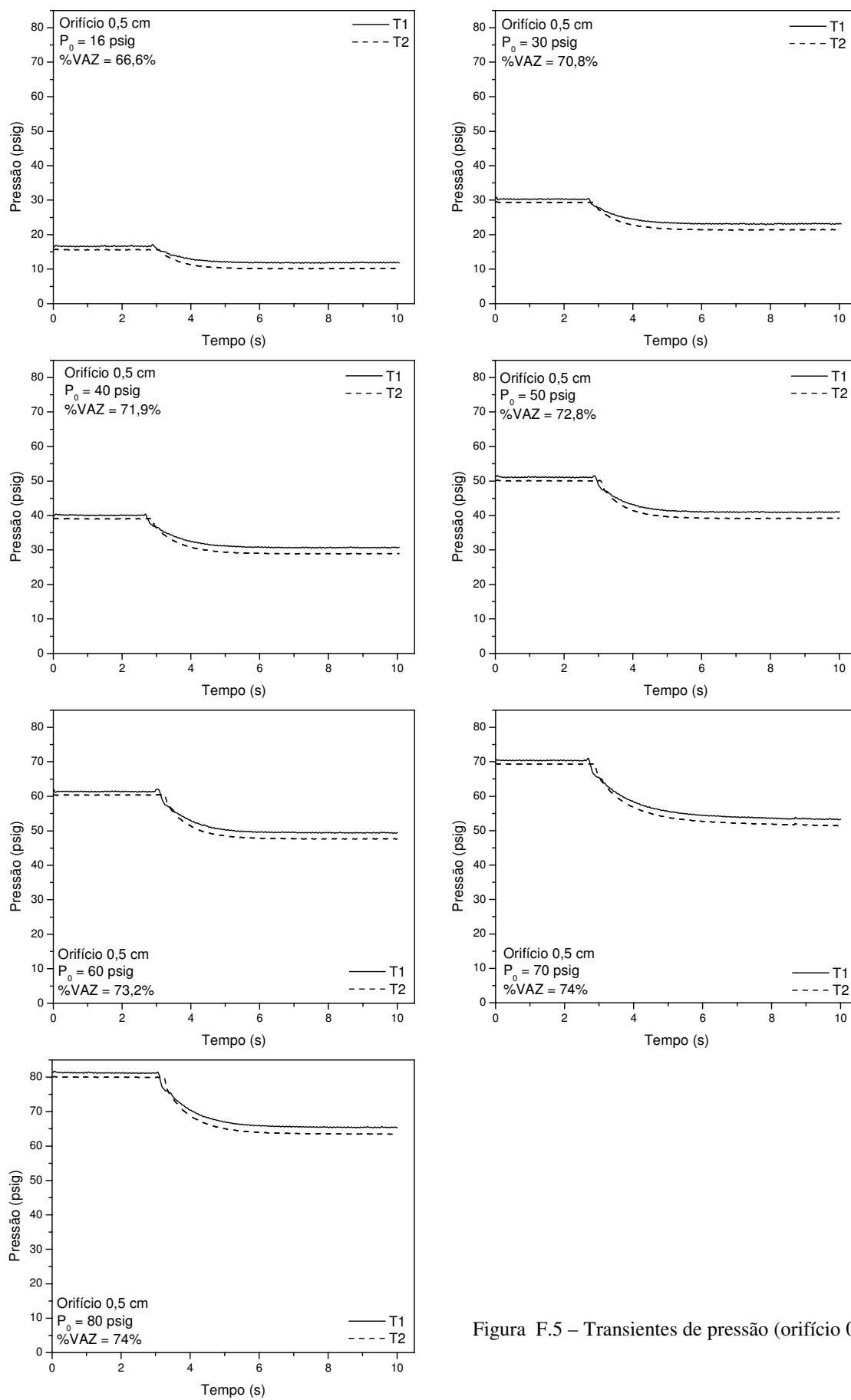


Figura F.5 – Transientes de pressão (orifício 0,5cm)

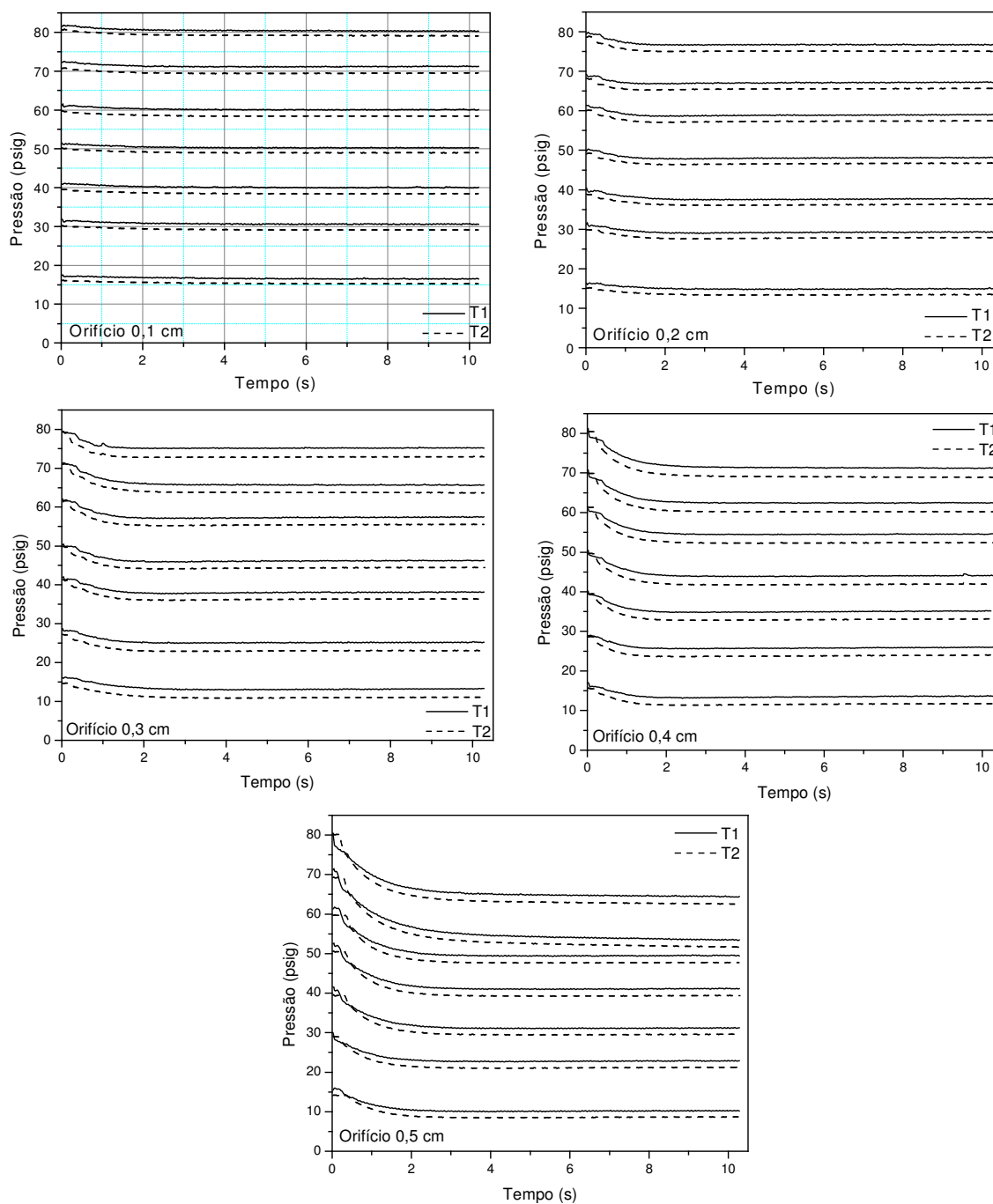


Figura F.6 – Comparação dos transientes de pressão para o mesmo orifício (vazamento provocado no instante 0).

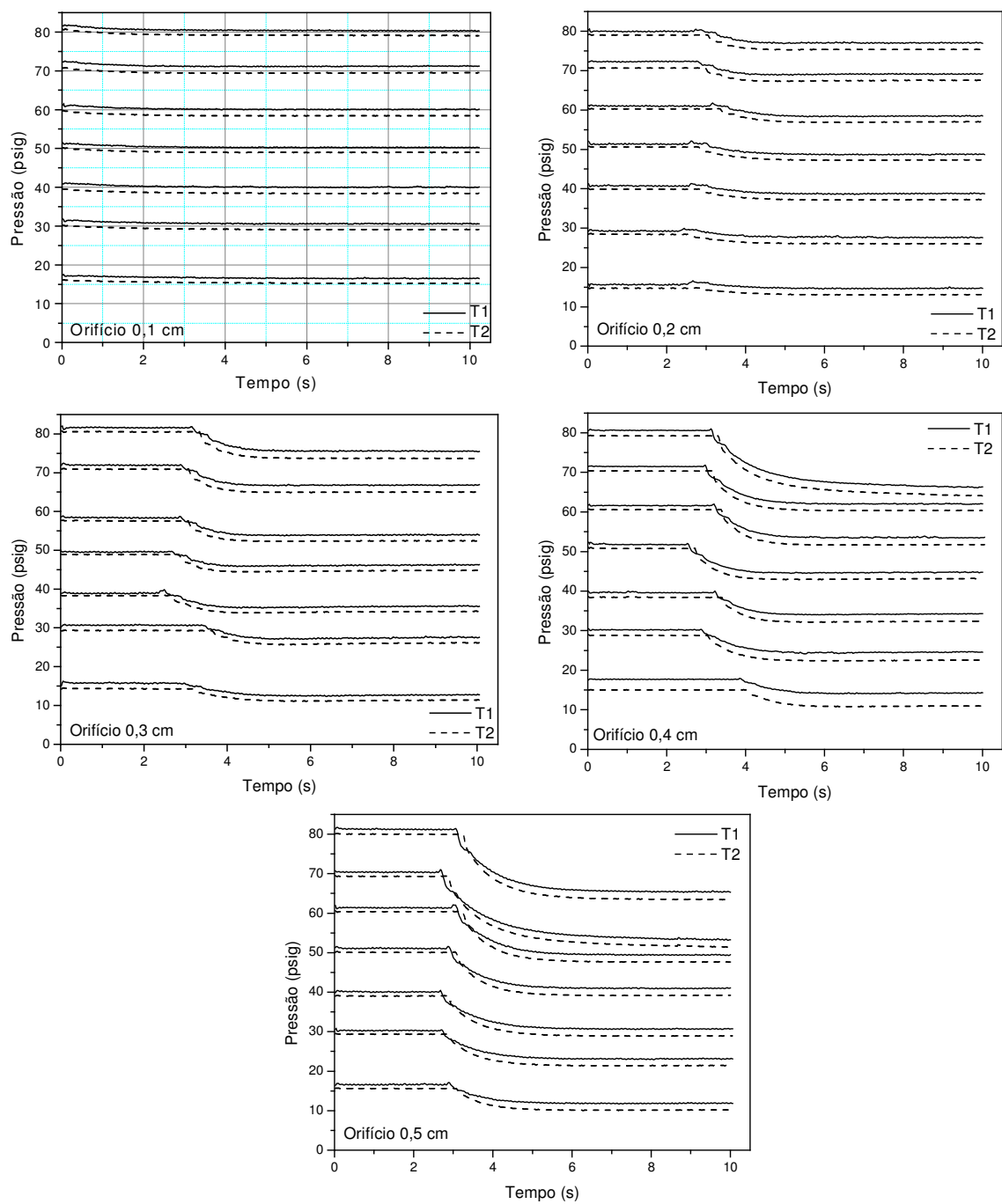


Figura F.7 – Comparação dos transientes de pressão para o mesmo orifício.

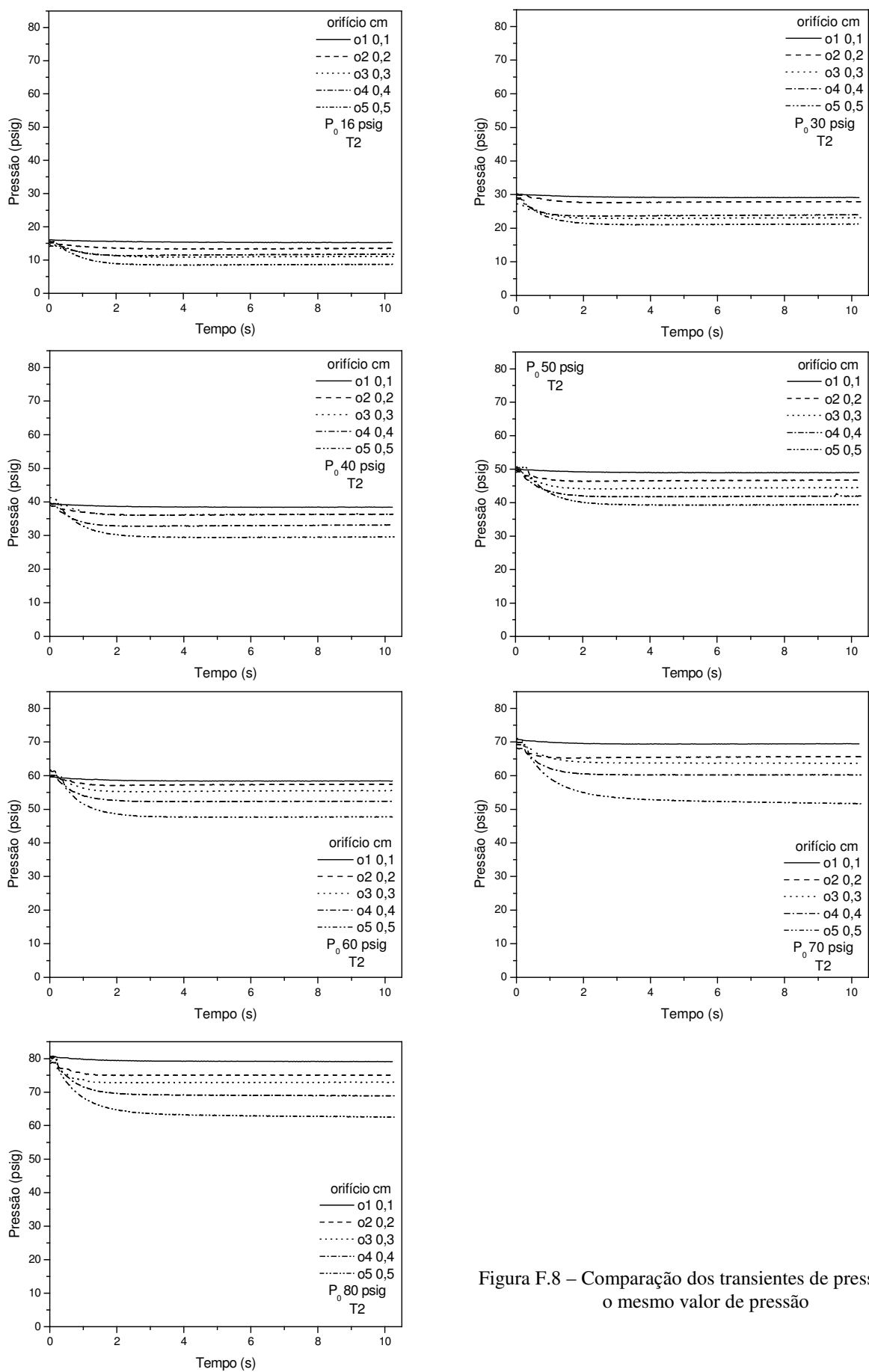


Figura F.8 – Comparação dos transientes de pressão para o mesmo valor de pressão

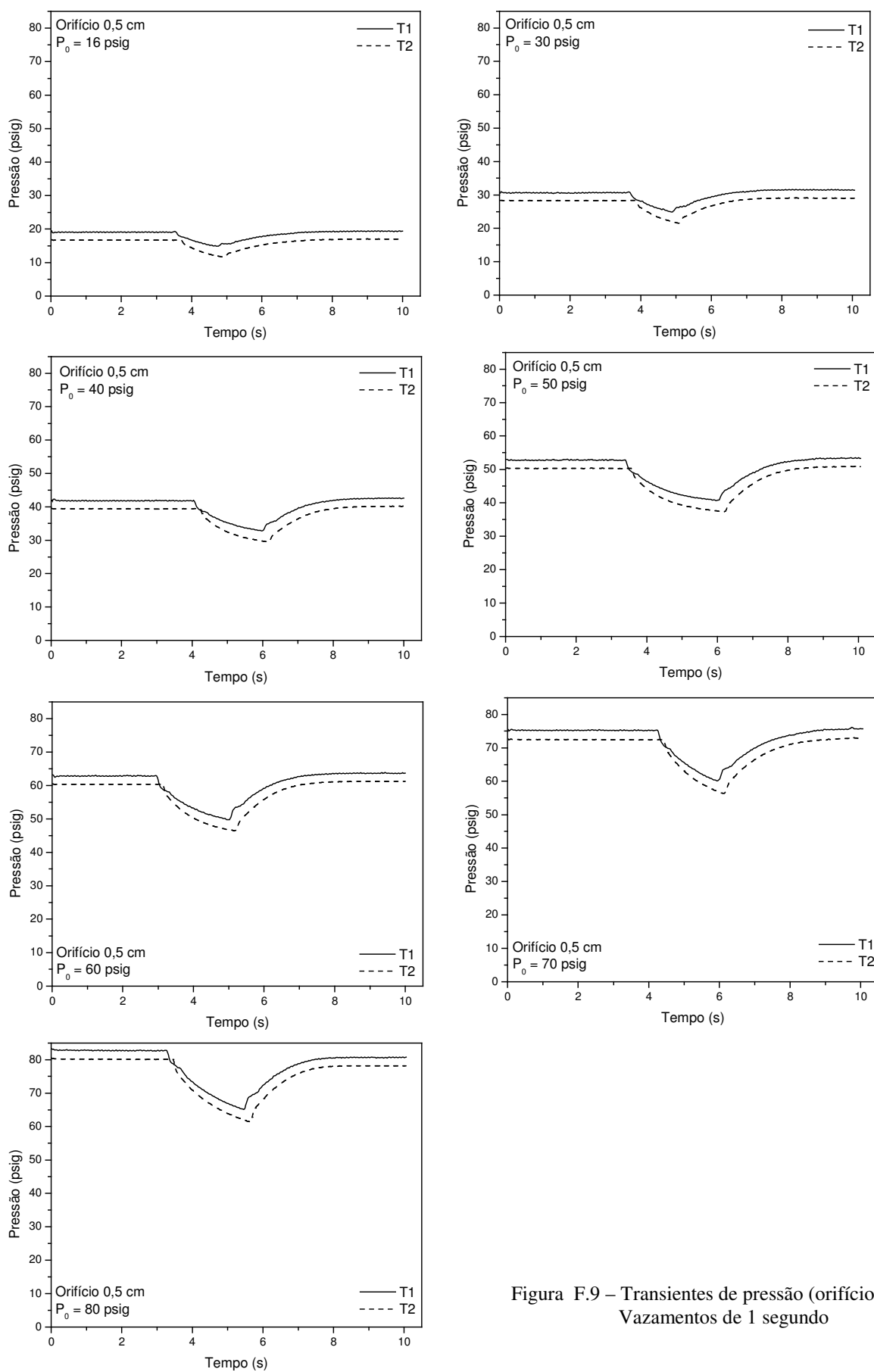


Figura F.9 – Transientes de pressão (orifício 0,5cm)
Vazamentos de 1 segundo

Apêndice G

Programa para Simulação do Vazamento em uma Tubulação com Escoamento

O programa de simulação do vazamento em uma tubulação com escoamento foi desenvolvido em Linguagem C. As tarefas executadas pelo programa assim como os resultados da simulação, encontram-se no **Apêndice D**.

As equações utilizadas para calcular o transiente de pressão causado pelo vazamento estão no **Capítulo 3**.

GA Sarq_dp3P.C

```

/*****
/*-----*/
/*      TRANSIENTE CAUSADO PELA RUPTURA DE UMA TUBULACAO TRANSPORTANDO GAS
      Tub 60m - 2 transdutores (um antes do vazamento e outro na saída)
      condicoes de contorno:   montante:reservatorio   jusante:orifício
*/
/*-----*/
/*****

#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
void fator_de_atrito();
void impress ();

/*-----*/
/*                                /* PROGRAMA PRINCIPAL */
/*-----*/

main()
{
    FILE *arq1;
    char escol,esco2,arq[20];
    int i,j,k,nn,nt,n[2],np,cont_imp,inc_imp,imp,sim,end;
    float xl,L,a,d,ar,f,v0,q0,qor,dorm,dor,pre,pres,Vv,por,tmax;
    float ca,cf,cr,cn,t,dt,ro,mi,re,rr,ds,pj,patm;
    float l[2],q[2][100],v[2][100],p[2][100],qr[2][100],pr[2][100],y[4];
/*-----*/
/*                                /* DADOS */
/*-----*/

    printf("\nPosicao do vazamento: x/L= " );
    scanf("%f" , &xl);

```

Apêndice G

```
n[0]=xl*100; n[1]=100-n[0]; nt= n[0]+ n[1];
printf("\nPressao no reservatorio: Pres (psig)= ");
scanf("%f",&pre); pres=(pre+14.7)*6894.757;
printf("\nVazao de ar: Q0 (L/min)= ");
scanf("%f",&Vv);
printf("\nOrificio do vazamento (mm): dor= ");
scanf("%f",&dorm); dor=dorm/1000;
np=2;
L=68.5; l[0]= xl*L; l[1]= L-(xl*L);
d=0.0127;
ar=0.7854*d*d;
fator_de_atrito(d,q0,ar,dt,pres,y); a=y[1]; ro=y[2];
q0=ro*Vv/(1000*60);
v0=q0/(ar*ro);
mi=1.86e-05; re=ro*v0*d/mi;
inc_imp=10; imp=inc_imp*12;
fator_de_atrito(d,q0,ar,dt,pres,y); f=y[0];
/*-----*/
/* OPCAO DE ARQUIVO */
/*-----*/

printf(" \n\n\n Deseja arquivar dados (S/N)?");
escol = tolower(getche());
sim=0;
if(escol == 's')
{
    sim=1;
    do
    {
        printf("\n\n De o nome do arquivo de dados:");
        scanf("%s",&arq);
        if((arq1=fopen(arq,"rt"))!=NULL)
        {
            printf("\n\n Arquivo ja existente. Deseja reescrever(S/N) ? ");
            esco2=tolower(getche());
        }
        else esco2= 's';
    } while (esco2 == 'n');
    arq1=fopen(arq,"wt");
}
/*-----*/
/* ARQUIVO DE DADOS */
/*-----*/

if(sim==1)
{
    fprintf(arq1,"L = %7.2f m\nD = %7.2f cm\n ",L,d*100.0);
    fprintf(arq1,"Q0 = %4.5f Kg/s \nQ0= %8.2f L/min\n ", q0,q0*(1000*60/ro));
    fprintf(arq1,"Pres = %4.2g psia\n",pres/6894.757);
    fprintf(arq1,"Re = %7.0f \nx/l = %3.2f \n",re,xl);
    fprintf(arq1,"ro = %7.5f \nvelocidade onda = %7.5f\n",ro,a);
    fprintf(arq1," fator de atrito = %7.5f \nvelocidade = %7.5f \n",f,v0);
    fprintf(arq1,"\nTempo \t T1\t T2\n ");
}
/*-----*/
/* IMPRESSAO DE DADOS */
/*-----*/

printf("\n\n Dados\n\n");
printf(" L = %7.2f m\n D = %7.2f cm\n ",L,d*100.0);
printf(" Q0 = %8.3f Kg/s\n Pres = %4.2g psig\n\n",q0,pres/6894.757);
printf("*****\n\n");
printf(" Resultados do transiente para um vazamento a %4.2f de L\n\n",xl);
printf("*****\n\n");
printf("TEMPO\nx/l 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5.....1 \n");
```

```

printf("*****\n");
printf("Pressao em PSIG e Vazao em Kg/h \n");
printf("*****\n");
/*-----*/
/* ESTADO ESTACIONARIO */
/*-----*/

t=0.0; tmax=10.00; dt=L/(a*nt);

for(i=0;i<np;i++)
{
nn=n[i]+1;
for(j=0;j<nn;j++) {p[i][j]=pres; q[i][j]=q0;}
p[i+1][0]=p[i][nn-1];
}
/*-----*/
/*ARQUIVO - ESTADO ESTACIONARIO*/
/*-----*/

if(sim==1)
{
fprintf(arq1,"\n%5.3f\t",t);
nn=n[0]; j=nn;
fprintf(arq1," %3.4f\t",((p[0][j]/6894.757)-14.7));
nn=n[1]; j=nn;
fprintf(arq1," %3.4f\t",((p[1][j]/6894.757)-14.7));
printf("\n");
}
/*-----*/
/* IMPRESSAO */
/*-----*/

impress(np,inc_imp,n,ar,t,q,p);

/*-----*/
/* ESTADO TRANSIENTE */
/*-----*/

ca = ar/a;
nn = n[0];
cont_imp = 0;
patm=101352.93;

while(t<=tmax)
{
t= t+dt;
/*-----*/
/* PONTOS INTERNOS */
/*-----*/

for (i=0;i<np;i++)
{
nn=n[i];
for(j=1;j<nn;j++)
{
fator_de_atrito(d,q[i][j+1],ar,dt,p[i][j+1],y); cf = y[3];
cn = q[i][j+1] - ca*p[i][j+1] - cf*q[i][j+1]*fabs(q[i][j+1]);
fator_de_atrito(d,q[i][j-1],ar,dt,p[i][j-1],y); cf = y[3];
cr = q[i][j-1] + ca*p[i][j-1] - cf*q[i][j-1]*fabs(q[i][j-1]);
qr[i][j] = 0.5*(cr+cn);
pr[i][j] = (cr - qr[i][j])/ca;
}
}
}
/*-----*/
/* CONDICAOES DE CONTORNO A MONTANTE */

```

```

/*-----*/

    fator_de_atrito(d,q[0][1],ar,dt,p[0][1],y); cf = y[3];
    cn = q[0][1] - ca*p[0][1] - cf*q[0][1]*fabs(q[0][1]);
    pr[0][0] = pres;
    qr[0][0] = cn + ca*pres;
/*-----*/
/* CONDICOES DE CONTORNO NO VAZAMENTO */
/*-----*/

    nn = n[0];
    fator_de_atrito(d,q[0][nn-1],ar,dt,p[0][nn-1],y); cf = y[3]; ro =y[2];
    cr = q[0][nn-1] + ca*p[0][nn-1] - cf*q[0][nn-1]*fabs(q[0][nn-1]);
    fator_de_atrito(d,q[np-1][1],ar,dt,p[np-1][1],y); cf = y[3];
    cn = q[np-1][1] - ca*p[np-1][1] - cf*q[np-1][1]*fabs(q[np-1][1]);

    por=fabs(p[0][nn]-patm);
    qor=ro*0.75*0.72*(0.7854*dor*dor)*sqrt(2*por/ro);
    pr[0][nn] = (cr-qor-cn)/(2*ca);
    pr[np-1][0] = pr[0][nn];
    qr[0][nn] = cr -ca*pr[0][nn];
    qr[np-1][0] = cn + ca*pr[np-1][0];
/*-----*/
/* CONDICOES DE CONTORNO A JUSANTE */
/*-----*/

    nn = n[np-1];
    ds=0.001; /*diâmetro de saída 1mm*/
    pj=fabs(p[np-1][nn]-patm); if (pj<0){ pj=0;}
    fator_de_atrito(d,q[np-1][nn],ar,dt,p[np-1][nn-1],y); cf = y[3];ro=y[2];
    qr[np-1][nn] =ro*0.75*0.72*(0.7854*ds*ds)*sqrt(2*pj/ro);
    cr = q[np-1][nn-1] + ca*p[np-1][nn-1] - cf*q[np-1][nn-1]*fabs(q[np-1][nn-1]);
    pr[np-1][nn] = (cr - qr[np-1][nn])/ca;
/*-----*/
/*MUDANCA DAS VARIABEIS*/
/*-----*/

    for(i=0;i<np;i++)
    {
        nn=n[i]+1;
        for(j=0;j<nn;j++) {q[i][j]=qr[i][j]; p[i][j]=pr[i][j];}
    }
/*-----*/
/* IMPRESSAO - RESULTADOS DO ESTADO TRANSIENTE */
/*-----*/

    cont_imp=cont_imp+1;
    if (cont_imp==imp)
    {

printf("=====\n");
impress(np,inc_imp,n,ar,t,q,p);
/*-----*/
/* ARQUIVO - ESTADO TRANSIENTE */
/*-----*/

        if(sim==1)
        {
            fprintf(arq1,"\n%5.3f\t",t);
            nn=n[0]; j=nn;
            fprintf(arq1," %3.4f\t",((p[0][j]/6894.757)-14.7));
            nn=n[1]; j=nn;
            fprintf(arq1," %3.4f\t",((p[1][j]/6894.757)-14.7));
            printf("\n");
        }
    }

```

```

/*-----*/
    cont_imp=0;
}
}

printf("=====\n")
;
fclose(arq1);
printf("Aperte qualquer tecla para finalizar..... ");
getch();
printf ("\n");
}
/*-----*/
/* CALCULO DO FATOR DE ATRITO E DA MASSA ESPECIFICA*/
/*-----*/

void fator_de_atrito(d,q,ar,dt,p,y)
float d,q,ar,dt,p,y[2];
{
    float mi,rr,y1,y2,y3,y4,f,cf,mw,temp,R,z,a,ro;
    mi=1.86e-05;    rr=0.012;
    y1=fabs(q*d/(ar*mi));
    y2=pow(7.0/y1,0.9)+ (0.27*rr);
    y3=pow(37530.0/y1,16.0);
    y4=pow(-2.457*log(y2),16.0);
    f=8.0*pow(pow(8.0/y1,12.0) + 1.0/(pow(y3+y4,1.5)),1.0/12.0);

    mw=0.028964;    temp=298;    R=8.3144;    z=0.9973;
    a=sqrt(z*R*temp/mw);
    ro=fabs(p*mw/(z*R*temp));

    cf=f*dt/(2*d*ar*ro);

    y[0]=f;    y[1]=a;    y[2]=ro;    y[3]=cf;
}
/*-----*/
/* IMPRESSAO */
/*-----*/

void impress(np,in,n,ar,t,q,p)
int np,in,n[2];
float ar,t,q[2][100],p[2][100];
{
    int i,j,k,nn;    float v[2][100],ro,c[2];
    printf("\n\nP=");
    for(i=0;i<np;i++)
    {
        k=in*i/2;    nn=n[i]+1;
        for(j=k;j<nn;j=j+in)    printf(" %3.2f",((p[i][j]/6894.757)-14.7));
    }
    printf("\n\nQ=");
    for(i=0;i<np;i++)
    {
        k=in*i/2;    nn=n[i]+1;
        for(j=k;j<nn;j=j+in)    printf(" %3.2f",q[i][j]*3600);
    }
    printf("\n");
}

/*****/

```


Apêndice H

Programa de Aquisição de Dados

O programa de aquisição de dados foi desenvolvido em Linguagem C. As tarefas executadas pelo programa estão relacionadas no **Capítulo 4**.

A listagem a seguir é referente à aquisição de dados no trecho fechado de tubulação, o programa de aquisição de dados na tubulação com escoamento é idêntico só não possui a etapa de leitura do estado estacionário.

IVP2T.C

```
/* ----- */
/*          /*  PROGRAMA PARA AQUISICAO DE DADOS          */
/*          /*  ESTE PROGRAMA FAZ A AQUISICAO COM 1500 PONTOS  */
/* ----- */

/* ----- */
/*          ESTE PROGRAMA FAZ A AQUISICAO DE DADOS UTILIZANDO-SE DE          */
/*          DOIS TRANSDUTORES DE PRESSAO LOCALIZADOS, UM NO INÍCIO          */
/*          DA TUBULAÇÃO, ANTES DO VAZAMENTO E OUTRO NO FINAL          */
/* ----- */

#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
#include "bios.h"
#include "time.h"

#define ADLSB    0    /* Porta de leitura do lsb do conv ad */
#define ADMSB    1    /* Porta de leitura do msb do conv ad */
#define ADOFF    2    /* Porta para ajuste de offset */
#define ADSTS    4    /* Porta de controle do modo de operacao */
#define DAMSB    6    /* Porta de escrita do msb do conversor da */
#define DALSB    7    /* Porta de escrita do lsb do conversor da */
#define CTL      8    /* Porta de controle do mux de E/S e do sh */
#define base     0x220
#define IODIG    10   /* Entrada e saida digital */
#define TIMER0   12   /* Timer 0 do 8253 */
#define TIMER1   13   /* Timer 1 do 8253 */
#define TIMER2   14   /* Timer 2 do 8253 */
#define TIMCTL   15   /* Porta de controle do 8253 */
#define TRUE     1
#define FALSE    0

/* ----- */
```

Apêndice H

```
/* DEFINICAO DOS BITS DE IMPORTANCIA*/
/* ----- */
#define BSHEAN 0x10 /* Bit de controle sample-hold entanl(1=sample)*/
#define BSHA 0x08 /* Bit de controle sample-holds saidas(1=sample)*/
#define MASC0_5 0x00 /* Mascara no modo de operacao 0-5V */
#define MASC1_5 0x29 /* Mascara no modo de operacao 1-5V */
#define MASC0_4 0x08 /* Mascara no modo de operacao 1-4V */
#define MASCBIP 0x23 /* Mascara no modo de operacao BIPOLAR */
#define TIME_OUT 25 /* Tempo de espera do fim da conversao A/D */

/* ----- */
/* DECLARACAO DAS VARIAVEIS GLOBAIS E SUBROTINAS */
/* ----- */

extern char erro;
unsigned char modoper;
unsigned int read_anl(),adj_offset();
unsigned char offset;
int get_key();
void leitura();
void grafico();
void eixos();
void arquivo();
void selchda();
void write_dig();

/* ----- */
/* PROGRAMA PRINCIPAL */
/* ----- */

void main()
{
    clock_t clock();
    int i,tempo1,tempo2;
    char loop,loop1,loop2,inicio,input;
    float alfa1,valu,volt_estac[1600],volt_trans[1600];
    int graphdriver = DETECT,graphmode;
    offset = adj_offset();

    inicio:

    clrscr();
    printf("\n\n Aquisicao de dados experimentais ");
    printf("\n\n Tecle <ENTER> para iniciar aquisicao de dados ");
    getch();
    clrscr();
    initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\tc2");/* inic.do mod.grafico */
    tempo1= clock();
    leitura(volt_estac);
    tempo2= clock();
    cleardevice();
    eixos(tempo1,tempo2);/* construcao dos eixos x e y do grafico */
    tempo1 = 0;
    tempo2 = 0;
    outtextxy(300,460,"ESTADO ESTACIONARIO");
    grafico(volt_estac);/*construcao do grafico para os dados filtrados*/
    outtextxy(350,10,"Para continuar aperte uma tecla");
    getch();
    cleardevice();
    outtextxy(300,80,"Processo em regime estacionario - Aperte uma tecla");
    outtextxy(300,90,"para iniciar regime transiente");
    cleardevice();
    outtextxy(300,90,"Esperando a abertura da valvula");
    alfa1=0;
    valu=2500;
```

```

loop1:
alfal = read_anl(6,offset);
if ( read_anl(6,offset) > valv ) goto loop2;
goto loop1;

loop2:
cleardevice();
printf("state = %.6f",alfal);
tempol = clock();
leitura(volt_trans);/*leitura dos dados no estado transiente*/
tempo2 = clock();
eixos(tempol,tempo2);
outtextxy(300,460,"ESTADO TRANSIENTE");
grafico(volt_trans);
outtextxy(350,20,"Para continuar aperte uma tecla");
printf("\nTemporizacao = %.6f", (tempo2-tempol)/CLK_TCK);
getch();

opcao:
cleardevice();
outtextxy(320,80,"1 - INICIO DO PROCESSO");
outtextxy(320,90," 2 - ARQUIVO DE RESULTADOS");
outtextxy(320,100," 3 - RETORNO AO PROGRAMA");

loop:
input = get_key();/* selecao da tecla acionada */
switch(input)
{
    case '1':
        goto inicio;
    case '2':
        arquivo(volt_trans,tempol,tempo2);
        goto opcao;
    case '3':
        goto final;
}
if((input != 1) & (input != 2) & (input != 3))
{
    outtextxy(320,110,"-----");
    outtextxy(320,120,"Entre de novo com a opcao");
    goto loop;
}

final:
closegraph();/* finalizacao do modulo grafico */
}

/* ----- */
/*          /* SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DE DADOS */          */
/* ----- */

void leitura(float y[1600])
{
    int i,j,np;
    float alfa,soma0,soma1,soma2,soma3;
    alfa = 0.5;

/*  LEITURA DOS DADOS  */

    for(i=0;i<1500;i=i+3)
    {
        soma0 = 0.0; soma1 = 0.0; soma2 = 0.0; soma3 = 0.0;
        np=150;

```

```
for(j=0;j<np;j++)
{
    soma0 = read_anl(4,offset); /* transdutor - T */
    soma0 = read_anl(4,offset);
    soma1 = soma1 + read_anl(4,offset);

    soma0 = read_anl(5,offset); /* transdutor - T */
    soma0 = read_anl(5,offset);
    soma2 = soma2 + read_anl(5,offset);

    soma0 = read_anl(6,offset); /* valvula */
    soma0 = read_anl(6,offset);
    soma3 = soma3 + read_anl(6,offset);
}

y[i]      = 300.0*((soma1/np)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
y[i+1]    = 100.0*((soma2/np)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
y[i+2]    = 100.0*((soma3/np)-1012.0)/(4095.0-1012.0);

/* FILTRAGEM DOS DADOS */

if(i > 7)
{
    y[i] = alfa*alfa*y[i] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-3]-
          (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-6];
    y[i+1] = alfa*alfa*y[i+1] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-2]-
            (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-5];
    y[i+2] = alfa*alfa*y[i+2] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-1]-
            (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-4];
}
}
/* ----- */
/* SUBROTINA DE CONSTRUCAO DO GRAFICO */
/* ----- */
void grafico(float y[1600])
{
    int i,ix,ponto[1600];
    float dP;

    for(i=0;i<1500;i=i+6)
    {
        ix = (i/3) + 80; /* coordenada x */
        dP = y[i];
        ponto[ix] = 340.0 - 3.0*dP; /* coordenada y */
        putpixel(ix,ponto[ix],10); /* introducao do ponto */

        ix = (i/3) + 80; /* coordenada x */
        dP = y[i+1];
        ponto[ix] = 340.0 - 3.0*dP; /* coordenada y */
        putpixel(ix,ponto[ix],11);

        ix = (i/3) + 80; /* coordenada x */
        dP = y[i+2];
        ponto[ix] = 340.0 - 3.0*dP; /* coordenada y */
        putpixel(ix,ponto[ix],12);
    }
}
/* ----- */
/* CONSTRUCAO DOS EIXOS X E Y */
/* ----- */

void eixos(int tempo1,int tempo2)
{

```

```

char buf;
int ix,iy;
double ticx,ticy;
float i;
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
line(80,40,80,340); /* linha vertical*/
line(80,400,640,400); /* linha horizontal */
for(i=0.0;i<=561.00;i=i+50.909090) /*divisoões do eixo x*/
{
    ix = i + 80;
    line(ix,400,ix,406);
    ticx = (((tempo2-tempo1)/CLK_TCK)/500)*i;
    gcvt(ticx,3,&buf);
    outtextxy(ix+2,420,&buf);
}
ticy = 105.0;
for(i=15;i<=315;i=i+15)/*divisoões do eixo y*/
{
    iy = i + 25;
    line(75,iy,80,iy);
    ticy = ticy - 5.0;
    gcvt(ticy,3,&buf);
    outtextxy(50,iy+4,&buf);
}
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
outtextxy(540,450,"tempo(s)");/* titulo do eixo X */
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(15,150,"alt.manometrica(PSI)");/* titulo do eixo Y */
settextstyle(0,0,1);
}

/* ----- */
/*          /* SUBROTINA DE SELECAO DO ACIONAMENTO DE TECLAS */
/* ----- */

int get_key(void)
{
    int key,lo,hi;
    key = bioskey(0);
    lo = key & 0X00FF;
    hi = (key & 0XFF00) >> 8;
    return((lo == 0) ? hi + 256 : lo);
}

/* ----- */
/*          /* ARQUIVO DE RESULTADOS */
/* ----- */

void arquivo(float y[1600],int tempo1, int tempo2)
{
    FILE *arq1;
    char arq[15];
    int i;
    float P1,P2,P3;
    cleardevice();
    printf("\n      De o nome do arquivo de dados   :  ");
    scanf("%s",&arq);
    arq1 = fopen(arq,"wt");
    clrscr();
    for(i=0;i<500;i++)
    {
        P1=y[i*3];
        P2=y[i*3+1];
    }

```

```
P3=y[i*3+2];
fprintf(arq1,"%f      ",(((tempo2-tempo1)/CLK_TCK)/500)*(i+1));
fprintf(arq1,"%f      ",P1);
fprintf(arq1,"%f      ",P2);
fprintf(arq1,"%f \n",P3);
}
fclose(arq1);
}

/* ----- */
/*          /* INICIO DAS ROTINAS DE TRATAMENTO DA  AD/DA */
/* ----- */
/*          /* SELECAO DO CANAL DO MUX DA ENTRADA E DA SAMPLE NA ENTRADA */
/* ----- */

selchad(unsigned char canal)
{
    unsigned char chad;
    chad = canal << 5;                /*Posiciona o end do mux (badchan)*/
    chad &= 0xe0;                    /*Isola somente badchan0-2 */
    outportb(base + CTL,chad);       /*Seleciona o canal */
    modoper |=BSHEAN;                /*Introduz bit de sample */
    outportb(base + ADSTS,modoper);  /*Sample-hold da inanl em sample*/
    modoper &= ~BSHEAN;              /*Retira bit de sample */
    outportb(base + ADSTS,modoper);  /*Sample-hold da inanl em hold*/
    return(canal);
}

/* ----- */
/*          /* SELECIONA O CANAL DO MUX DE SAIDA E DA SAMPLE NA SAIDA */
/* ----- */

void selchda(unsigned char canal)
{
    unsigned char chda;
    canal &= 0x07;                   /* Isola */
    chda = (canal << 5); /* Posiciona o end do mux (badchan0-2) */
    chda |= canal;                   /* Soma c/ o mux do sample-hold (badchan0-2)*/
                                   /* Seleciona o canal+sample-hold corresp */
    chda |=BSHSA;                    /* Introduz o bit de sample */
    outportb(base + CTL,chda); /*Coloca o sample-hold do canal em sample*/
}

/* ----- */
/*          /* ROTINA DE ESPERA DO FIM DA CONVERSAO */
/* ----- */

wait_eoc()
{
    unsigned register int ciclos,status;
    for (ciclos = TIME_OUT;ciclos;ciclos --)
        return;
}

/* ----- */
/*          /* ROTINA DE LEITURA DO CONVERSOR */
/*          /* Parametro de entrada: numero do canal
/*          /* Parametro de saida:  retorna o valor da conversao
/*          /* se ocorrer erro retorna -1 */
/* ----- */

unsigned int read_anl(unsigned char canal, unsigned char offset)
{
    unsigned int dadols,dadoms;
    unsigned int dado;
```

```

    selchad(canal);
    outportb(base+ADOFF,offset); /* Normalisa o valor do offset */
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Envia o start ao ad */
    wait_eoc(); /* Delay para conversao */
    dadoms = inportb(base+ADMSB); /* Le os 4 bits mais significativos*/
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Le os 8 bits menos significativos */
    dado = (dadoms << 8) + dadols;
    return(dado);
}

/* ----- */
/* ESCREVE O VALOR DE DADO NA SAIDA ANALOGICA DE 'canal' */
/* ----- */

void write_anl(unsigned int dado,unsigned char canal)
{
    unsigned char dadols,dadoms;
    dadols = dado; /* Inicia o deslocamento do dado*/
    dadoms = dado >> 8; /* Desloca os 2 bits mais signific.*
    outportb(base + DALSB,dadols); /* Escreve byte menos significativo*/
    outportb(base + DAMSB,dadoms); /* Escreve byte mais significativo*/
    selchda(canal); /* Trans. para o canal de s. desejado*/
    return;
}
/* ----- */
/* ESCREVE NAS ENTRADAS DIGITAIS */
/* ----- */

void write_dig(char dado)
{
    outportb(base + IODIG,dado);
}

/* ----- */
/* ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMATICO DE OFFSET */
/* ----- */

/* Retorna os seguintes valores:
    100h -> Se nao existe o sinal de referencia de 3.500V na
           entrada analogica 7
    200h -> Se em 4 tentativas de ajustar o offset isto nao
           for conseguido
    Num -> De 0h a 0FFh que e o valor p/ zerar o offset */
/* ----- */
unsigned int adj_offset()
{
    unsigned int in1,in2,i,inatual,trigger = 0x800;
    unsigned char flag = 0,delay;
    if(modoper & 0x01)/* modo 1 a 5V? */
        trigger = 0xa00; /* sim, armazene a00h como valor de comparacao*/
    else
        trigger = 0xb33;
    inatual = read_anl(7,140);/*le a entrada de refer centrando o offset*/
    if(inatual < (trigger - 0x100))/* existe a referencia de (3500mV)? */
        return(0x100); /* nao, retorne uma condicao de erro */
    for(i=0;flag==0;++i) /* inicio do integ. p/ busca do ponto otimo */
    {
        inatual = read_anl(7,(i&0xff));/* tente com i valor de offset */
        for(delay=0;delay<50;++delay) /* rotina para atraso */
            if(inatual == trigger) /* erro de leitura =zero? */
            {
                flag = 1; /* termine a execucao pto encontrado */
                if(i == 0x400) /* feita o scan 4 vezes sem sucesso? */
                    return(0x200); /* termine e retorne condicao de erro */
            }
    }
    return(i-1); /* termine e retorne o valor ajustado */
}

```

```
/* ----- */

/* ROTINA PARA SELECAO AUTOMATICA DO MODO DE OPERACAO
   ACEITA OS SEGUINTEs PARAMETROS: */

/* n = 0 -> 0-5V (modo default)
   n = 1 -> 1-5V
   n = 2 -> 0-4V
   n = 3 -> bipolar

   OBS: modo de leitura do conversor: pooling */

/*----- */

modo_oper(char n)
{
    unsigned char masc;
    masc=MASC0_5; /* default operacao de 0-5V */
    switch(n) /* scan do modo de operacao alternativo */
    {
        case 1:
            masc = MASC1_5;
            break;
        case 2:
            masc = MASC0_4;
            break;
        case 3:
            masc = MASCBIP;
            break;
    }
    modoper = masc; /* armazena o modo de operacao setado */
    outportb(base+ADSTS,masc); /* envia a placa */
    return;
}

/* ----- */
```