

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM GASODUTOS COM A PRESENÇA DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO, BASEADA EM ANÁLISE ESTATÍSTICA DE
DESBALANCEAMENTOS DE INVENTÁRIO

Renan Martins Baptista

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Rio de Janeiro
Maio de 2013

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM GASODUTOS COM A PRESENÇA DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO, BASEADA EM ANÁLISE ESTATÍSTICA DE
DESBALANCEAMENTOS DE INVENTÁRIO

Renan Martins Baptista

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, PhD.

Prof. Antônio MacDowell de Figueiredo, Dr. Ing.

Prof. Alvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho, DSc.

Prof. Felipe Bastos de Freitas Rachid, DSc.

Profa. Maria Laura Martins Costa, DSc.

Dr. Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro, PhD.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MAIO DE 2013

Baptista, Renan Martins

Detecção de Vazamentos em Gasodutos com a Presença de Escoamento Bifásico, Baseada em Análise Estatística de Desbalanceamentos de Inventário/ Renan Martins Baptista – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XXVIII, 270 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Dissertação (doutoramento) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 203-217.

1. Detecção de vazamentos. 2. Gasodutos bifásicos. 3. Testes de probabilidade seqüencial. 4. Confiabilidade versus sensibilidade. I. Bodstein, Gustavo César Rachid. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Shirley e à minha filha Ana Carolina pelo apoio irrestrito e sempre presente, bem como pela compreensão pelas inúmeras ausências familiares que requereu.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a colaboração e o apoio de diversas pessoas e organizações as quais gostaria de sinceramente agradecer:

À PETROBRAS/CENPES pela oportunidade e completo apoio na execução deste trabalho;

Ao orientador Prof. Dr. Gustavo Bodstein pelo apoio e inúmeros esclarecimentos e orientações ao longo do desenvolvimento de todo o trabalho;

Ao Núcleo de Atendimento em Computação de Alto Desempenho (NACAD) da UFRJ pela disponibilização não somente de seus equipamentos de computação de alto desempenho, mas principalmente pelo apoio de seu pessoal de diferentes áreas, desde a gestão de recursos até o apoio direto nos casos rodados, no desenvolvimento deste trabalho. Especial agradecimento ao Prof. Dr. Álvaro Coutinho pelo apoio direto e oportunidade de ter participado de suas disciplinas mesmo depois de já ter fechado a grade;

À Schlumberger/SPT Group pelas licenças acadêmicas do simulador OLGA cedidas ao LabMFA para a consecução deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Felipe Rachid pelas sugestões, esclarecimentos e diversas participações proativas na consecução deste trabalho;

Aos funcionários da Secretaria Acadêmica do Programa de Engenharia Mecânica da COPPE, com especial ênfase à Vera Noronha que sempre esteve presente e disponível para resolver as diversas questões de natureza administrativo-acadêmicas que ocorreram ao longo do programa;

Aos alunos do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica (LabMFA) do Programa de Engenharia Mecânica da COPPE/UFRJ.

Aos colegas do CENPES/PDEP/TEE que de alguma forma ajudaram na consecução deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM GASODUTOS COM A PRESENÇA DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO, BASEADA EM ANÁLISE ESTATÍSTICA DE
DESBALANCEAMENTOS DE INVENTÁRIOS

Renan Martins Baptista

Maio/2013

Orientador: Gustavo César Rachid Bodstein

Programa: Engenharia Mecânica

Gasodutos que transferem a produção dos campos para tratamento primário quase sempre apresentam escoamento bifásico. Devido à preocupação ambiental há necessidade de detectar vazamentos, especialmente àqueles que se desenvolvam lentamente, em dutos com baixa pressão (cenário de pior caso). Para tanto se propõe um módulo de escoamento integrado a outro de detecção de vazamentos.

O primeiro módulo simula o escoamento bifásico quase horizontal, calculando o inventário do duto (massa total considerando ambas as fases), com base em dados de pressão e vazão adquiridos em tempo real em seus contornos. Sua formulação é bifásica, isotérmica e emprega modelo de dois fluidos com duas equações de continuidade e outras duas de quantidade de movimento (uma para cada fase).

O segundo módulo é um algoritmo de detecção capaz de determinar, dentro de uma dada probabilidade, a existência de vazamento. Emprega testes de probabilidade seqüencial aos desbalanceamentos de inventário.

A validação foi feita em dois segmentos de duto, sendo o primeiro curto (32 km, 24 in) com pouco líquido ($\alpha_L \approx 0,8\%$), e o outro longo (188 km, 16 in), com muito líquido ($\alpha_L \approx 8\%$), onde os citados módulos integrados foram testados contra vazamentos gerados por um simulador comercial (OLGA), sintonizado com dados reais adquiridos de dois gasodutos nacionais que contém tais segmentos. Foram 28 (vinte e oito) ensaios em cada segmento, em diferentes posições, para os regimes transiente e permanente. Os resultados demonstram que a solução proposta se aplica bem aos dois segmentos empregados, nos dois regimes, oferecendo diferentes desempenhos, sendo ambos dentro de limites de grande interesse da indústria.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

LEAK DETECTION FOR TWO PHASE GAS PIPELINES BASED ON STATISTICAL ANALYSIS OF INVENTORY IMBALANCES

Renan Martins Baptista

May/2013

Advisor: Gustavo César Rachid Bodstein

Department: Mechanical Engineering

Production gathering gas pipelines almost always present two phase flow. Due to environmental concerns, there's a need to detect leakages, especially the ones developing slowly, at low pressure pipelines (worst case scenario). To perform such task it is proposed a flow module integrated with a leak detection module.

The flow module simulates the near horizontal two phase flow aiming to calculate the pipeline inventory (total inner fluid mass considering both phases), based on real time data of pressure and flow acquired at the pipeline boundaries. Its formulation is based on a two fluid model, isothermal, presenting two continuity equations and two momentum equations for each phase.

The second module is a leak detection algorithm capable of infer, within a given probability, the existence of a leakage. It employs sequential probability tests applied to the material imbalances at the segments total inventory (both phases).

The validation is carried out by using two pipeline segments, being the first a short one (32 km, 24 in) carrying a small amount of liquid ($\alpha_L \approx 0,8\%$), and the other a long one (188 km, 16 in), carrying a larger amount of liquid ($\alpha_L \approx 8\%$), where the mentioned integrated modules are tested against leakages generated by a commercial two phase flow simulator (OLGA), tuned with real data coming from two existing gas pipelines. Twenty eight trials on each segment were accomplished for different positions at steady state and transient flow. Results shown that the proposed solution fits well to both employed segments, at both transient and steady state flows, returning however different performance being both of great industry interest.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xix
NOMENCLATURA	xx
Acrônimos	xx
Acrônimos em língua inglesa.....	xx
Caracteres latinos.....	xxi
Caracteres gregos.....	xxv
Glossário de termos empregados.....	xxvi
1. Introdução, histórico e objetivos.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Caracterização geral dos gasodutos bifásicos brasileiros	2
1.3 Dificuldades conhecidas	4
1.4 Principais objetivos	6
1.5 Organização dos capítulos do texto	7
2. Modelagens de escoamento bifásico.....	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Padrões de escoamento	9
2.3 Modelos existentes	10
2.3.1. Introdução	10
2.3.2. Modelo de eq. homogêneo - <i>Homogeneous Equilibrium Model</i> (HEM).....	11
2.3.3. Modelo Drift-Flux - <i>Drift-Flux Model</i> (DFM)	12
2.3.4. Modelo de dois fluidos - <i>Two-Fluid Model</i> (TFM)	13
2.4. Formulações dos modelos	15
2.4.1. Introdução	15
2.4.2. Geometria do duto e das fases.....	15
2.4.3. Frações volumétricas para as fases	16
2.4.4. Equação da massa (continuidade)	17
2.4.5. Equação de <i>momentum</i> (quantidade de movimento)	17
2.4.6. Equações de fechamento.....	18
2.4.7. Introdução às equações constitutivas.....	18
2.4.8. Equações constitutivas para os termos de pressão.....	19
2.4.9. Equações constitutivas para tensão interfacial	22
2.5. Formulação adotada	27
2.5.1. Introdução	27
2.5.2. Conceituação e hipóteses simplificadoras.....	27
2.5.3. Equação da massa (continuidade)	28
2.5.4. Equação de <i>momentum</i> (quantidade de movimento)	28
2.5.5. Termo para correção da pressão na fase líquida	28
2.5.6. Relações geométricas relevantes ao problema.....	30
2.5.7. Problemas de valor de contorno e inicial (PVC e PVI)	30
3. Métodos numéricos	32
3.1. Introdução.....	32
3.2. Formulação geral das equações	33
3.3. Métodos para sistemas conservativos	34
3.3.1. Ritchmyer	35
3.3.2. FCT (Flux Corrected Transport)	35
3.3.3. Lax-Friedrichs	36
3.3.4. FORCE (First Order Centred Scheme).....	36
3.3.5. Rusanov	37
3.3.6. TVD Lax-Friedrichs	37
3.4. Métodos para sistemas não conservativos.....	38
3.4.1. Esquema Minmod (COQUEL ET AL. ^[88]).....	39

3.4.2.	Esquema Central.....	39
3.5.	<i>Restrições nos métodos numéricos – passo de tempo</i>	40
4.	Validações das modelagens	41
4.1.	<i>Introdução</i>	41
4.2.	<i>A implementação da modelagem SPM-4</i>	41
4.2.1.	Apresentação	41
4.2.2.	Limitações.....	42
4.3.	<i>Breve descrição do simulador OLGA</i>	43
4.4.	<i>Caso de referência</i>	44
4.4.1.	Objetivo.....	44
4.4.2.	Dados de configuração	44
4.4.3.	Inclinação e altimetria.....	45
4.4.4.	Fluidos empregados.....	45
4.4.5.	Diferentes abordagens de cada simulador para propriedades PVT	46
4.4.6.	Diferentes abordagens de cada simulador para perdas de carga.....	46
4.4.7.	Diferentes abordagens de cada simulador para regime permanente...	46
4.4.8.	Descrição funcional dos casos	47
4.4.9.	Condições de contorno	47
4.4.10.	Condições temporais.....	48
4.5.	<i>O processo de benchmarking</i>	48
4.5.1.	Adequação da referência	48
4.5.2.	Consolidação das simulações da referência.....	48
4.6.	<i>Resultados e discussões</i>	49
4.6.1.	Introdução	49
4.6.2.	Diferentes métodos numéricos – Regime permanente, perfil plano....	49
4.6.3.	Diferentes métodos numéricos – Regime transitório, perfil plano	50
4.6.4.	Efeitos da altimetria, regime permanente	51
4.6.5.	Efeitos da altimetria, regime transiente.....	52
4.7.	<i>Desempenho computacional</i>	55
4.7.1.	Caso com perfil horizontal	55
4.7.2.	Caso inclinado.....	56
4.7.3.	Variações do parâmetro CFL para as simulações	57
4.8.	<i>Verificação da hiperbolicidade teórica do modelo SPM-4</i>	58
4.8.1.	Verificação das velocidades	58
5.	Arquitetura de automação e aplica-ções de tempo real em dutos.....	59
5.1.	<i>Introdução</i>	59
5.2.	<i>Histórico</i>	60
5.3.	<i>Multidisciplinariedade</i>	60
5.4.	<i>Nomenclaturas</i>	61
5.5.	<i>Arquitetura geral de automação</i>	61
5.5.1.	Introdução	61
5.5.2.	Camadas.....	62
5.5.3.	Linhas	65
5.5.4.	Protocolos de aquisição (contenção) de dados	66
5.5.5.	Descrição prática da arquitetura.....	66
5.6.	<i>Módulos de software</i>	67
5.6.1.	Módulo de aquisição de dados em tempo real	67
5.6.2.	Suavização de dados (<i>data smoothing</i>).....	70
5.6.3.	Estimador de estados (EE).....	72
5.6.4.	Sintonia do EE	72
5.6.5.	Funções específicas.....	73
5.7.	<i>Diferentes funcionalidades</i>	73
5.7.1.	Sistemas de detecção, localização e quantificação de vazamentos	73
5.7.2.	Acompanhamento, cálculo e reconciliação de inventários.....	74
5.7.3.	Programação e acompanhamento de movimentações	74

5.7.4.	Contaminação entre diferentes bateladas ou colchões	75
5.7.5.	Acompanhamentos posicionais	75
5.7.6.	Acompanhamentos pontuais (Instrumentação virtual)	76
5.7.7.	Treinamento de operadores	76
5.7.8.	Otimização do uso de energia para movimentação de fluidos	77
5.7.9.	Outros	77
5.7.10.	Funções típicas do cenário de gasodutos bifásicos	77
6.	Modelos para detecção de vazamentos em dutos	78
6.1.	<i>Introdução</i>	78
6.2.	<i>Resultados Desejados</i>	79
6.3.	<i>Estatísticas da indústria</i>	80
6.3.1.	Americanas	80
6.3.2.	Europeias	82
6.4.	<i>Caracterização fluidodinâmica de vazamentos em dutos</i>	82
6.4.1.	Nos contornos do segmento monitorado	82
6.4.2.	No ponto do vazamento	85
6.5.	<i>Caracterização termodinâmica (ou PVT) de vazamento em dutos</i>	89
6.6.	<i>Parâmetros de desempenho</i>	90
6.6.1.	Confiabilidade	91
6.6.2.	Sensibilidade	93
6.6.3.	Exatidão	94
6.6.4.	Outros parâmetros	94
6.7.	<i>Desempenho de acordo com a posição do furo no segmento monitorado</i> ..	95
6.7.1.	Introdução	95
6.7.2.	Posições de melhor detecção	95
6.7.3.	Posições de melhor localização	95
6.8.	<i>Revisão bibliográfica</i>	96
6.8.1.	Aspectos gerais	96
6.8.2.	Classificação de tecnologias	96
6.8.3.	Sistemas internos	96
6.8.4.	Sistemas externos	99
6.9.	<i>Modelos fluidodinâmicos de tempo real I – Balanços volumétricos ou materiais</i>	101
6.9.1.	Introdução	101
6.9.2.	Balanço de inventário total	102
6.9.3.	Balanço de inventário por fase	107
6.9.4.	Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130 ^[1]	108
6.9.5.	Principais virtudes	109
6.9.6.	Principais limitações	109
6.10.	<i>Modelos fluidodinâmicos de tempo real II – Análise de dispersão de pressão e vazão</i>	109
6.10.1.	Introdução	109
6.10.2.	Descrição	110
6.10.3.	Algoritmo de detecção de vazamento - ADV	111
6.10.4.	Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130 ^[1]	112
6.10.5.	Principais virtudes	113
6.10.6.	Principais limitações	113
6.11.	<i>Modelos estatísticos de tempo real</i>	113
6.11.1.	Introdução	113
6.11.2.	Descrição	113
6.11.3.	Algoritmo de detecção de vazamentos - ADV	116
6.11.4.	Múltiplas expectativas de vazamento – testes simultâneos	121
6.11.5.	Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130 ^[1]	121
6.11.6.	Principais virtudes	121
6.11.7.	Principais limitações	122

6.12.	<i>Análise de pressão de ponto em tempo real</i>	122
6.12.1.	Introdução	122
6.12.2.	Descrição	122
6.12.3.	Limiares/batentes:	124
6.12.4.	Algoritmo de detecção de vazamentos - ADV	124
6.12.5.	Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130 ^[1]	124
6.12.6.	Principais virtudes	124
6.12.7.	Principais limitações	125
6.13.	<i>Tecnologias acústicas</i>	125
6.13.1.	Introdução	125
6.13.2.	Descrição	126
6.13.3.	Algoritmo de detecção de vazamentos - ADV	128
6.13.4.	Consequências físicas do paradigma utilizado	128
6.13.5.	Equacionamento	129
6.13.6.	Categoria e nomenclatura de acordo com API 1130 ^[1]	130
6.13.7.	Principais virtudes	130
6.13.8.	Principais limitações	130
6.14.	<i>Solução escolhida e seus elementos constitutivos</i>	132
6.14.1.	Introdução	132
6.14.2.	Caso exemplo	133
6.14.3.	Vazamento de magnitude relevante	134
6.14.4.	Vazamento de magnitude pequena	138
6.14.5.	Investigando os limites da metodologia	141
7.	<i>Validação da solução proposta</i>	145
7.1.	<i>Introdução</i>	145
7.2.	<i>Dutos selecionados</i>	147
7.2.1.	Característica operacional	147
7.2.2.	Primeiro segmento de duto selecionado (duto PL):	147
7.2.3.	Segundo duto selecionado (duto ML)	150
7.2.4.	Quadro resumo dos dois dutos selecionados	152
7.3.	<i>Sintonia dos dutos selecionados no simulador comercial</i>	153
7.3.1.	Sintonia do duto PL	154
7.3.2.	Sintonia do duto ML	161
7.4.	<i>Adaptações frente às limitações da modelagem SPM-4</i>	166
7.4.1.	Introdução:	166
7.4.2.	Pigs e golfadas	166
7.4.3.	Variação de temperatura	167
7.4.4.	Variação de elevação	167
7.4.5.	Entrada do duto x entrada do segmento	167
7.4.6.	Transferência de massa entre fases	167
7.5.	<i>Parâmetros utilizados no código SPM-4</i>	167
7.5.1.	Introdução	167
7.5.2.	Condições de contorno	168
7.5.3.	Discretizações espaciais e temporais	168
7.5.4.	Vazões mássicas nos contornos	168
7.5.5.	Determinação das massas específicas	168
7.6.	<i>Incertezas inseridas nos ensaios</i>	169
7.6.1.	Introdução	169
7.6.2.	Geração da incerteza	169
7.7.	<i>Cenários testados</i>	171
7.7.1.	Introdução	171
7.7.2.	Ensaio com o duto em regime permanente	171
7.7.3.	Ensaio com o duto em regime transiente	172
7.7.4.	Estratégia para a pressão	173
7.7.5.	Estratégia para a velocidade de abertura do vazamento	173

7.8.	<i>Metodologia empregada na validação.....</i>	174
7.9.	<i>Resultados para o segmento PL</i>	176
7.9.1.	Ensaio com o segmento em regime permanente.....	176
7.9.2.	Discussões – regime permanente, segmento PL	179
7.9.3.	Ensaio com o segmento em regime transiente	180
7.9.4.	Discussões – regime transiente, segmento PL.....	186
7.10.	<i>Resultados para o duto ML</i>	188
7.10.1.	Introdução	188
7.10.2.	Ensaio com o segmento ML em regime permanente.....	189
7.10.3.	Discussões – regime permanente, segmento ML.....	191
7.10.4.	Ensaio com o segmento ML em regime transiente	192
7.10.5.	Discussões – regime transiente, segmento ML	196
8.	<i>Conclusões.....</i>	198
8.1.	<i>Introdução.....</i>	198
8.2.	<i>Modelagem SPM-4</i>	198
8.3.	<i>Método numérico FCT</i>	199
8.4.	<i>A solução para detecção de vazamentos.....</i>	199
8.5.	<i>Flexibilidade do algoritmo</i>	200
8.6.	<i>Desempenho computacional.....</i>	200
8.7.	<i>Recomendações/sugestões de continuidade do trabalho</i>	200
8.6.1.	Modelagem SPM-4.....	200
8.6.2.	Algoritmo de detecção via probabilidade sequencial	201
8.6.3.	Desempenho computacional	201
8.6.4.	Outras funcionalidades de tempo real	202
	<i>Referências bibliográficas</i>	203
	<i>Anexo I – Gráficos para o segmento PL, regime permanente.....</i>	218
	<i>Anexo II – Gráficos para o segmento PL, regime transiente</i>	229
	<i>Anexo III – Gráficos para o segmento ML, regime permanente</i>	245
	<i>Anexo IV – Gráficos para o segmento ML, regime transiente</i>	257

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema simplificado de produção <i>offshore</i> de gás.....	2
Figura 1.2 – Separação e medição na entrada do duto	3
Figura 1.3 – Separação e medição na saída do duto	4
Figura 1.4 – Elevação e fração de líquidos num gasoduto nacional ^[3]	5
Figura 1.5 – Padrões de escoamento num gasoduto nacional ^[3]	5
Figura 2.1 – Escoamento bifásico horizontal classificado por SHAHA ^[11]	10
Figura 2.2 – Seção transversal do escoamento.....	16
Figura 2.3 – Perfil lateral de escoamento estratificado	16
Figura 4.1 – Massa específica x P, para T=20 °C, fluido real.....	45
Figura 4.2 – Modelo SPM-4, diferentes métodos numéricos, reg. permanente, plano	50
Figura 4.3 – Modelo SPM-4, diferentes métodos numéricos, t = 1 h, escoamento transiente duto plano	51
Figura 4.4 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, escoamento permanente, duto inclinado 1 grau	52
Figura 4.5 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, t=1h, duto inclinado	53
Figura 4.6 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, t=6h, duto inclinado	54
Figura 4.7 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, t=15 h, duto inclinado	54
Figura 5.1 – Arquitetura geral de aquisição de dados das aplicações de tempo real ..	63
Figura 5.2 – Arquitetura geral de aquisição de dados das aplicações de tempo real em dutos.....	67
Figura 5.3 – Modularidade das funções de gestão operacional de dutos	68
Figura 5.4 – medições reais de vazões volumétricas em gasodutos offshore.....	70
Figura 5.5 – Efeito da suavização em medições de vazões volumétricas de gás	71
Figura 6.1 – PHMSA: causas de vazamentos em oleodutos estadunidenses.....	81
Figura 6.2 – EGIG: causas de vazamentos em gasodutos de transporte europeus....	82
Figura 6.3 – Esquemático da simulação de comportamento de vazamentos.....	84
Figura 6.4 – Comportamento de pressões e vazões mássicas de entrada e saída	84
Figura 6.5 – Ex. de variação de k contra P @ 20°C num gás real	86
Figura 6.6 – Pressão estagnada no ponto do vazamento.....	87
Figura 6.7 – As cinco vazões mássicas presentes num vazamento sônico	88
Figura 6.8 – Efeito Joule-Thompson para furos de 1,0 e 2,0 in no ponto do vazamento	89
Figura 6.9 – Sensibilidade hiperbólica	94
Figura 6.10 – Módulos de um LDS baseado em modelos de tempo real	102
Figura 6.11 – Operação normal de um duto monofásico de líquidos	114
Figura 6.12 – Emulação de operação com vazamento de 1% por apenas 200 s.....	115
Figura 6.13 – Operação com vazamento de 1% na escala usada pela operação.....	115
Figura 6.14 – Descrição esquemática da tecnologia acústica de LDS.....	127
Figura 6.15 – variação de velocidade sônica ao longo de um gasoduto bifásico	129
Figura 6.16 – Vazões de entrada, saída e e de vazamento para furo de 1 in	135
Figura 6.17 – Funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem o processo de suavização, furo de 1,0 in ..	135
Figura 6.18 – Alarmes para algoritmo trivial e trivial suavizado, furo de 1,0 in	136
Figura 6.19 – Ampliação do momento da detecção da Figura 6.18.....	136
Figura 6.20 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 1,0 in	137
Figura 6.21 – Ampliação do momento da detecção da Figura 6.20	137
Figura 6.22 – Vazões nos contornos do duto para o furo de 0,30 in	138
Figura 6.23 – Vazão vazada para o furo de 0,30 in	139
Figura 6.24 – Funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem suavização, furo de 0,30 in (2,4%)	139
Figura 6.25 – Alarmes para algoritmo trivial e trivial suavizado, furo de 0,30 in (2,4%)	140
Figura 6.26 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 0,30 in (2,4%)	141

Figura 6.27 – Funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem suavização, furo de 0,25 in (1,7%)	142
Figura 6.28 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 0,25 pol (1,7%)	142
Figura 6.29 – $\dot{m}_c[t]$ com e sem suavização, furo de 0,20 in (1,1%)	143
Figura 6.30 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 0,20 in (1,1%)	144
Figura 7.1 – Perfil de elevação completo do duto PL	148
Figura 7.2 – Perfil de elevação do segmento de duto PL	148
Figura 7.3 – Frações vol. de líquido de entrada e saída no enchimento do duto PL	149
Figura 7.4 – Fração mássica de gás e massas específicas de gás e líquido no duto PL em função da pressão na temperatura de 20 °C	150
Figura 7.5 – Perfil de elevação completo do duto ML	151
Figura 7.6 – Fração volumétrica de líquido típica de entrada e saída do duto ML	151
Figura 7.7 – Fração mássica de gás e massas específicas de gás e líquido no duto ML em função da pressão na temperatura de 20 °C	152
Figura 7.8 – Duto PL, primeiro conjunto: vazão de gás na entrada	154
Figura 7.9 – Duto PL, primeiro conjunto: pressões na entrada, saída do segmento e saída do duto	155
Figura 7.10 – Duto PL, primeiro conjunto: temperaturas na entrada e saída do duto	155
Figura 7.11 – Duto PL - Qualidade da sintonia $P_{ent} \times P_{sai}$ para validar $Q_{gas-ent}$	156
Figura 7.12 – Duto PL – Qualidade da sintonia $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$ para validar P_{ent}	157
Figura 7.13 – Duto PL – Qualidade da sintonia $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$ para validar P_{ent}	158
Figura 7.14 – Duto PL, segundo conjunto: pressões na entrada, saída do segmento e saída do duto	159
Figura 7.15 – Duto PL, segundo conjunto: vazão de gás na entrada e volume acumulado (<i>in situ</i>) de líquido na saída	160
Figura 7.16 – Duto PL, segundo conjunto: temperaturas na entrada, saída do segmento e saída do duto	160
Figura 7.17 – Duto ML: vazões de gás na entrada e saída do duto	161
Figura 7.18 – Duto ML: vazões de líquido na entrada e saída do duto	162
Figura 7.19 – Duto ML: pressões na entrada e saída do duto	163
Figura 7.20 – Duto ML: Temperatura do gás na entrada	164
Figura 7.21 – Duto ML - Qualidade da sintonia $P_{ent} \times P_{sai}$ para validar $Q_{gas-ent}$ (duto)	164
Figura 7.22 – Duto ML – Qualidade da sintonia $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$ para validar P_{ent} (duto)	165
Figura 7.23 – Duto PL – Qualidade da sintonia $Q_{gas-sai} \times P_{ent}$ para validar P_{sai} (duto)	166
Figura 7.24 – Metodologia de validação do modelo da solução proposta	175
Figura 7.25 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	178
Figura 7.26 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_c[t] \times dm_{total}/dt$	179
Figura 7.27 – Resultado de sensibilidade, segmento PL, regime permanente para o batente de 3,61%	180
Figura 7.28 – Transientes induzidos no segmento PL	181
Figura 7.29 – Comportamento de $\dot{m}_c[t]$ e de dm_{total}/dt durante o regime transiente	182
Figura 7.30 – Comportamento dos batentes de $\dot{m}_{vaz}$ durante o regime transiente	182
Figura 7.31 – Segmento PL, 1,0 in, meio, vazão de referência nominal, valores da função $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	185
Figura 7.32 – Segmento PL, 1,0 in, meio, empacotamento, vazão de referência momentânea, valores da função $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	185
Figura 7.33 – Segmento PL, 1,0 in, entrada, empacotamento, $\dot{m}_c[t] \times dm_{total}/dt$	186

Figura 7.34 – Sensibilidade, seg. PL, regime transiente, batente de 3,61%, $\dot{m}_{vaz}$ com ambas bases $\dot{m}_{nom.}$ e $\dot{m}_{ent.}$	188
Figura 7.35 – Sensibilidade para o batente de 3,61%.....	192
Figura 7.36 – Transientes induzidos no segmento ML.....	193
Figura 7.37 – Comportamento de $\dot{m}_C$ e dm_{total}/dt durante o regime transiente induzido	194
Figura 7.38 – Comportamento dos batentes de $\dot{m}_{vaz}$ durante o regime transiente....	194
Figura 7.39 – Sensibilidade, seg. ML, regime transiente, batente de 3,61%, $\dot{m}_{vaz}$ com ambas bases $\dot{m}_{nom.}$ e $\dot{m}_{ent.}$	197
Figura I.1 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	218
Figura I.2 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	218
Figura I.3 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	219
Figura I.4 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	219
Figura I.5 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	220
Figura I.6 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	220
Figura I.7 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	221
Figura I.8 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	221
Figura I.9 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	222
Figura I.10 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	222
Figura I.11 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	223
Figura I.12 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	223
Figura I.13 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	224
Figura I.14 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	224
Figura I.15 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	225
Figura I.16 – Segmento PL, furo de 0,50 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	225
Figura I.17 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	226
Figura I.18 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	226
Figura I.19 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	227
Figura I.20 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	227
Figura I.21 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	228
Figura I.22 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	228

Figura II.1 – Segmento PL, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	229
Figura II.2 – Segmento PL, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	229
Figura II.3 – Segmento PL, 0,50 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	230
Figura II.4 – Segmento PL, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	231
Figura II.5 – Segmento PL, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	231
Figura II.6 – Segmento PL, 1,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	232
Figura II.7 – Segmento PL, 2,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	233
Figura II.8 – Segmento PL, 2,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	233
Figura II.9 – Segmento PL, 2,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	234
Figura II.10 – Segmento PL, 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	235
Figura II.11 – Segmento PL, 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	235
Figura II.12 – Segmento PL, 3,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	236
Figura II.13 – Segmento PL, 0,50 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	237
Figura II.14 – Segmento PL, 0,50 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	237
Figura II.15 – Segmento PL, 0,50 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	238
Figura II.16 – Segmento PL, furo de 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	239
Figura II.17 – Segmento PL, furo de 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	239
Figura II.18 – Segmento PL, 1,0 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	240
Figura II.19 – Segmento PL, 2,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	241
Figura II.20 – Segmento PL, 2,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	241
Figura II.21 – Segmento PL, 2,0 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	242
Figura II.22 – Segmento PL, furo de 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	243
Figura II.23 – Segmento PL, furo de 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	243
Figura II.24 – Segmento PL, furo de 3,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total} / dt$	244
Figura III.1 – Segmento ML, 0,3 in, entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	245

Figura III.2 – Segmento ML, 0,3 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	245
Figura III.3 – Segmento ML, 0,5 in, entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	246
Figura III.4 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	246
Figura III.5 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	247
Figura III.6 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	247
Figura III.7 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	248
Figura III.8 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	248
Figura III.9 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	249
Figura III.10 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	249
Figura III.11 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	250
Figura III.12 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	250
Figura III.13 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	251
Figura III.14 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	251
Figura III.15 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	252
Figura III.16 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	252
Figura III.17 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	253
Figura III.18 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	253
Figura III.19 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	254
Figura III.20 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	254
Figura III.21 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	255
Figura III.22 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	255
Figura III.23 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	256
Figura III.24 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times \partial m_{total}/\partial t$	256
Figura IV.1 – Segmento ML, 0,30 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	257
Figura IV.2 – Segmento ML, 0,30 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	257
Figura IV.3 – Segmento ML, 0,30 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	258
Figura IV.4 – Segmento ML, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	259
Figura IV.5 – Segmento ML, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	259

Figura IV.6 – Segmento ML, 0,50 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	260
Figura IV.7 – Segmento ML, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	261
Figura IV.8 – Segmento ML, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	261
Figura IV.9 – Segmento ML, 1,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	262
Figura IV.10 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	263
Figura IV.11 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	263
Figura IV.12 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	264
Figura IV.13 – Segmento ML, 0,5 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	265
Figura IV.14 – Segmento ML, 0,5 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	265
Figura IV.15 – Segmento ML, 0,5 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$..	266
Figura IV.16 – Segmento ML, 1,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	267
Figura IV.17 – Segmento ML, 1,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	267
Figura IV.18 – Segmento ML, 1,0 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$..	268
Figura IV.19 – Segmento ML, 1,5 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	269
Figura IV.20 – Segmento ML, 1,5 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$	269
Figura IV.21 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$	270

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Correlações de pressão na interface	19
Tabela 2.2 – Pressões de interface	21
Tabela 2.3 - Diferentes parcelas da força de atrito interfacial	22
Tabela 2.4 – Valores de κ	24
Tabela 2.5 – Valores e correlações para c_{vm}	25
Tabela 2.6 – Correlações para f_i	26
Tabela 2.7 - Constantes para a Eq. (2.38).....	27
Tabela 4.1 – Dados de configuração do duto de referência.....	44
Tabela 4.2 – Correlação de fricção utilizadas.	46
Tabela 4.3 – Condições de contorno dos ensaios.	48
Tabela 4.4 – Condições temporais dos ensaios planos.	48
Tabela 4.5 – Desvios para diferentes métodos numéricos, plano	49
Tabela 4.6 – Condições de contorno do cenário inclinado.....	51
Tabela 4.7 – Condições temporais do teste com duto inclinado.	52
Tabela 4.8 – Tempo de CPU para métodos numéricos, caso horizontal.....	55
Tabela 4.9 – Tempo de CPU para métodos numéricos, perfil inclinado.....	56
Tabela 4.10 – Valores de CFL para exatidão próxima ao caso referência (OLGA).....	57
Tabela 4.11 – Desvios em relação ao caso de referência, duto horizontal	57
Tabela 4.12 – u_r de entrada/saída, regime permanente perfil plano	58
Tabela 6.1 – Tipo de liberação (PHMSA ^[130])	81
Tabela 6.2 – Tipo de vazamento (PHMSA ^[130])	81
Tabela 6.3 – Coeficientes de diferenças finitas regressivas	105
Tabela 7.1 – Resumo dos principais dados dos dutos/segmentos selecionados	153
Tabela 7.2 – Parâmetros da sintonia de $Q_{gas-ent}$	157
Tabela 7.3 – Parâmetros da sintonia de P_{ent}	157
Tabela 7.4 – Parâmetros da sintonia de P_{sai}	158
Tabela 7.5 – Duto ML, parâmetros estatísticos da sintonia de $Q_{gas-ent}$	164
Tabela 7.6 – Duto ML, parâmetros estatísticos da sintonia de P_{ent}	165
Tabela 7.7 – Duto ML, parâmetros da sintonia de P_{sai}	166
Tabela 7.8 – Incertezas inseridas nas variáveis de processo	169
Tabela 7.9 – Incertezas inseridas nas variáveis de processo	169
Tabela 7.10 – Posições e diâmetros de falha a serem testados em RP	172
Tabela 7.11 – Posições, diâmetros e transiências sob teste no regime transiente ...	173
Tabela 7.12 – Descrição do número de casos testados	173
Tabela 7.13 – Posições e vazões testadas em regime permanente, segmento PL ..	176
Tabela 7.14 – Dados de conf. do algoritmo, regime permanente, segmento PL	177
Tabela 7.15 – Duto PL, segmento em regime permanente.....	177
Tabela 7.16 – Dados de config. do algoritmo, seg. em regime trans. ascendente	183
Tabela 7.17 – Dados de config. do algoritmo – seg. em regime trans. descendente	183
Tabela 7.18 – Resultados, segmento PL, regime trans., $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{nom.}$	183
Tabela 7.19 – Resultados, segmento PL, regime trans., $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{ent}$	184
Tabela 7.20 – Relação entre as fases do inventário do segmento ML	188
Tabela 7.21 – Posições e vazões testadas em regime permanente	189
Tabela 7.22 – Dados de configuração do algoritmo - duto em regime permanente ..	190
Tabela 7.23 – Resultados, vazamentos com o segmento em regime permanente ...	190
Tabela 7.24 – Dados de config. do algoritmo, seg. ML, empacot. (ascendente).....	195
Tabela 7.25 – Dados de config. do algoritmo, seg. ML, desempacot.(descendente)	195
Tabela 7.26 – Resultados, segmento ML, regime trans., $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{nom.}$...	196
Tabela 7.27 – Resultados, segmento ML, regime trans., $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{ent}$	196

NOMENCLATURA

Acrônimos

ADV	Algoritmo de Detecção de Vazamentos;
ALD	Algoritmo de Localização de Vazamentos;
AQV	Algoritmo de Quantificação de Vazamentos;
SGBD	Sistema Gerenciador de Bancos/Bases de Dados
CLP	Controlador Lógico Programável;
EE	Estimador de Estados;
FAGOD	Função Avançada de Gestão Operacional de Dutos;
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis;
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial;
PVT	Condição de estado relacionada à pressão, volume e temperatura;
RAO	Razão Água-Óleo, usualmente expressa em Pm^3/Pm^3 ou Sm^3/Sm^3 ;
RGL	Razão Gás-Líquido, usualmente expressa em Pm^3/Pm^3 ou Sm^3/Sm^3 ;
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído;
TR	Tempo Real.

Acrônimos em língua inglesa

API	American Petroleum Institute;
ARX-MIMO	Auto-Regressive eXogenous Multi Input Mult Output (observer model);
BWRS	Benedict, Webb, Rubin e Starling (Equation of State);
CFD	Computational Fluid Dynamics;
CPM	Computational Pipeline Monitoring;
CSA	Canadian Standard Association;
DAS	Distributed Acoustic Sensing;
DCS	Distributed Control System;
DFM	Drift Flux Model;
DOT	US Department of Transportation;
DT	Density Transmitter;
DTS	Distributed Temperature Sensing;
EPA	US Environmental Protection Agency;
FCT	Flux Correction Transport;

FORCE	First Order Centred Scheme;
FT	Flow Transmitter;
GPS	Geographical Positioning System;
HEM	Homogeneous Equilibrium Model;
LDS	Leak Detection System;
MILP	Mixed Integer Linear Programming;
MIMO	Multi Input Multi Output (observer model);
MODBUS	Protocolo de comunicação de dados para processos;
OLE	Object Link Embedded (Microsoft protocol);
OLGA	Norwegian acronym for Oil, Liquid and Gas Analyser;
OPC	OLE for Process Control;
OPS	Office of Pipeline Safety;
PHMSA	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration;
PLC	Programmable Logic Controller;
PPA	Pressure Point Analysis;
PT	Pressure Transmitter;
RTM	Real Time Model;
RTTM	Real Time Transient Model;
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition;
SPM-4	Single Pressure Model – 4 Equations;
SPRT	Sequential Probability Ratio Test;
SRK	Soave-Redlich-Kwong, equation of state;
SVM	Support Vector Machine;
TFM	Two Fluid Model;
TFM-2	Transient Multiphase Flow Project, phase 2;
TT	Temperature Transmitter;
TVD	Total Variation Diminishing.

Caracteres latinos

c_1, c_2	Constantes para determinação do fator de atrito da fase líquida [adm];
f_G	Fator de atrito de Moody da fase gás [adm];
f_I	Fator de atrito de Moody da interface gás/líquido [adm];
f_L	Fator de atrito de Moody da fase líquido [adm];
g	Aceleração da gravidade [m/s ²];
h_L	Altura de líquido [m];

k	Índice caracterizador de fase ($k = G, L$);
$\dot{m}_{TOTAL(ent)}$	Massa total da corrente bifásica no contorno de entrada do duto [kg];
$\dot{m}_{TOTAL(sai)}$	Massa total da corrente bifásica no contorno de saída do duto [kg];
$\dot{m}_{ent}$	Vazão mássica total na entrada do gasoduto, i. e., a soma das vazões mássicas de gás e líquido respectivamente [kg/s];
$\dot{m}_{ent(calc)}$	Vazão mássica total na calculada na entrada do gasoduto, i. e., a soma das vazões mássicas de gás e líquido respectivamente [kg/s];
$\dot{m}_{ent(med)}$	Vazão mássica total medida na entrada do gasoduto, i. e., a soma das vazões mássicas medidas de gás e líquido respectivamente [kg/s];
$\dot{m}_L$	Vazão mássica de líquido ou condensado (líquido) [kg/s];
$\dot{m}_G$	Vazão mássica de gás, genericamente referenciada [kg/s];
$\dot{m}_{sai}$	Vazão mássica total na saída do gasoduto, i. e., a soma das vazões mássicas de gás e líquido respectivamente [kg/s];
$\dot{m}_{sai(calc)}$	Vazão mássica total calculada na saída do gasoduto, i. e., a soma das vazões mássicas calculadas de gás e líquido respectivamente [kg/s];
$\dot{m}_{sai(med)}$	Vazão mássica total medida na saída do gasoduto, i. e., a soma das vazões mássicas medidas de gás e líquido respectivamente [kg/s];
$\dot{m}_{Total}$	Massa total de um segmento de gasoduto [kg/s];
q	calor trocado entre o duto e meio externo devido ao vazamento [J];
r_B	Raio médio da bolha [m];
t	Tempo, genericamente referenciado [s];
x	Coordenada cartesiana longitudinal [m];
u_k	Velocidade na fase k [m/s];
u_G	Velocidade na fase gás [m/s];
u_L	Velocidade na fase líquida [m/s];
u_r	Diferença entre as velocidades das fases gás e líquida ($u_G - u_L$) [m/s];
$\bar{u}_r$	Diferença média entre as velocidades das fases gás e líquida baseada no modelo de “Drift flux” [m/s];

A	Área da seção transversal do duto genericamente referenciada [m^2];
A_G	Área da seção transversal do duto ocupada pela fase gás [m^2];
A_L	Área da seção transversal do duto ocupada pela fase líquida [m^2];
C_D	Coeficiente de descarga [adm];
$C_{P,L}$	Calor específico (de ensaio isobárico) do fluido da fase líquida [J/kg/K];
$C_{P,G}$	Calor específico (de ensaio isobárico) do fluido da fase gás [J/kg/K];
D_i	Diâmetro interno genericamente referenciado [m];
D_B	Diâmetro de bolha [m];
D_{hG}	Diâmetro hidráulico equivalente para a fase gás [m];
D_{hk}	Diâmetro hidráulico equivalente para a fase k [m];
D_{hL}	Diâmetro hidráulico equivalente para a fase líquida [m];
F	Função de campo que contém os termos não conservativos da formulação numérica empregada [N/m];
H	Entalpia genericamente referenciada [J];
I	Inventário mássico do segmento de duto monitorado [kg ou Sm^3];
I_k	Inventário mássico da fase k, no segmento de duto monitorado [kg ou Sm^3];
I_G	Inventário mássico da fase gás no segmento de duto monitorado [kg ou Sm^3];
I_L	Inventário mássico da fase líquida no segmento de duto monitorado [kg ou Sm^3];
J_G	Velocidade superficial da fase gás [m/s];
J_L	Velocidade superficial da fase líquida [m/s];
M_{AGi}	Parcela de fluxo de momento linear referente à força de atrito interfacial, na fase gás [N/m^3];
M_{AGw}	Parcela de fluxo de momento linear referente à força de atrito na parede, por unidade de comprimento, da fase gás [N/m^3];
M_{Aki}	Parcela de fluxo de momento linear referente à força de atrito interfacial, na fase k [N/m^3];
M_{ALi}	Parcela de fluxo de momento linear referente à força de atrito interfacial, na fase líquida [N/m^3];
M_{Aki}^D	Parcela de fluxo de momento linear referente ao atrito interfacial de arraste, por unidade de comprimento, na fase k [N/m^3];

M_{Aki}^B	Parcela de fluxo de momento linear referente ao atrito interfacial de Basset, por unidade de comprimento, na fase k [N/m ³];
M_{Aki}^C	Parcela de fluxo de momento linear referente ao atrito interfacial de colisões, por unidade de comprimento, na fase k [N/m ³];
M_{Aki}^L	Parcela de fluxo de momento linear referente ao atrito interfacial de elevação, por unidade de comprimento, na fase k [N/m ³];
$\overline{M}_{Agi}$	Parcela de fluxo de momento linear referente ao atrito interfacial médio, por unidade de comprimento, na fase gás [N/m ³];
M_{Aki}^V	Parcela de fluxo de momento linear referente ao atrito interfacial de excesso (massas virtuais), por unidade de comprimento, na fase k [N/m ³];
P	Pressão genericamente referenciada [Pa];
P_C	Termo de correção da pressão da fase líquida [Pa];
P_D	Probabilidade de detectar o vazamento [adm];
P_{FA}	Probabilidade de emissão de falsos alarmes [adm];
P_{Gi}	Pressão na interface no lado da fase gás [Pa];
P_I	Pressão na interface gás/líquido genericamente referenciada [Pa];
P_{ki}	Pressão na interface no lado da fase k [Pa];
P_{Li}	Pressão na interface no lado da fase líquida [Pa];
Q	Vazão volumétrica corrigida para condição padrão [Pm ³ /s];
$Q(t)$	Função campo de velocidades (em função do tempo) relacionada com as vazões de gás e líquido de entrada [m/s];
Re_G	Número de Reynolds da fase gás [adm];
Re_k	Número de Reynolds da fase k [adm];
Re_L	Número de Reynolds da fase líquida [adm];
S	Vetor que contém os termos algébricos fonte das transferências de massa e quantidade de movimento na interface e parede [m/s];
S_G	Perímetro molhado da fase gás [m];
S_I	Perímetro molhado da interface gás/líquido [m];
S_k	Perímetro molhado da fase k [m];
S_L	Perímetro molhado da fase líquida [m];
T	Temperatura genericamente referenciada [°C].

V_G	Volume ocupado pela fase líquida no domínio em consideração [m ³];
V_L	Volume ocupado pela fase líquida no domínio em consideração [m ³];
W_S	Trabalho de eixo [J].

Caracteres gregos

α_d	Fração volumétrica da fase descontínua [adm];
α_G	Fração volumétrica da fase gás [adm];
α_k	Fração volumétrica genericamente referenciada [adm];
α_L	Fração volumétrica da fase líquida [adm];
β	Inclinação do duto em relação à horizontal [graus];
ε	Batente ou limiar da tecnologia de balanço material total [%];
ε_k	Batente ou limiar da tecnologia de balanço material por fase [%];
γ	ângulo do perímetro molhado [graus];
ρ	Massa específica genericamente referenciada [kg/m ³];
ρ_k	Massa específica da fase k [kg/m ³];
ρ_L	Massa específica da fase líquida [kg/m ³];
ρ_G	Massa específica da fase gás [kg/m ³];
σ	Tensão superficial na interface [N/m ²];
μ_k	Viscosidade absoluta [kg/(m·s)];
τ	Tensão genericamente referenciada [N/m ²];
τ_L	Tensão de cisalhamento na parede da fase líquida [N/m ²];
τ_{ki}	Tensão de cisalhamento na interface para a fase k [N/m ²];
τ_k^{Re}	Tensão viscosa de Reynolds para a fase k [N/m ²];
τ_k	Tensão de cisalhamento na parede da fase k [N/m ²];
τ_i	Tensão de cisalhamento na interface gás/líquido [N/m ²];
τ_{Gi}	Tensão de cisalhamento na interface para a fase gás [N/m ²];
τ_G	Tensão de cisalhamento na parede da fase gás [N/m ²];

ξ	Coeficiente ajustável usado para garantir que modelo de dois fluidos se mantém hiperbólico durante a simulação numérica;
Δx	Variação de distância genericamente referenciada [m];
Δt	Variação de tempo genericamente referenciada [s];
ΔP_k	Variação entre a pressão termodinâmica da fase k e a pressão na sua interface calculada diretamente por correlações [Pa];
ΔP_{ki}	Variação entre a pressão termodinâmica da fase k e a pressão na sua interface calculada através da Eq. 3.10a [Pa];
$\Delta \rho$	Diferença de massa específica entre as fases líquida e gás ($\rho_L - \rho_G$) [kg/m ³];
Ω	Fluxo de calor radial entre o interior do duto e o meio externo a este [J/m ² /s].
Γ_k	Taxa temporal de transferência de massa entre as fases [kg/(m ³ .s)];

Glossário de termos empregados

Batente	O mesmo que “Limiar”, versão em língua portuguesa do anglicismo “threshold”, que significa um limite máximo de referência;
Carimbo de Tempo	Tempo no qual o dado é lido no campo, antes da transmissão;
Condição padrão	É a referência de pressão e temperatura para correção de variáveis volumétricas tais como volume, vazão, densidade e módulo de elasticidade. No Brasil, essa referência é 1 (uma) atm para pressão e 20 (vinte) °C (graus Celsius) para temperatura;
Inventário	É a massa de fluido contida num segmento ou conjunto de segmentos. Opcionalmente pode ser o volume padrão contido num segmento ou conjunto de segmentos. O volume padrão é sempre compensado ou corrigido para a condição padrão;

Montante de um pt.	Ponto imediatamente anterior ao ponto de referência, normalmente algum locus de relevância fluidodinâmica, tal como uma válvula ou acidente;
Pig	Equipamento introduzido no duto que se movimenta pelo ação do fluido que tem diversas finalidades, dentre elas limpeza;
Jusante de um ponto	Ponto imediatamente posterior ao ponto de referência, normalmente algum locus de relevância fluidodinâmica, tal como uma válvula ou acidente fluidodinâmico;
Sm ³	Medida volumétrica tomada na condição padrão americana, i. e., 60°F e 1 atm;
Segmento de duto	Trecho de duto compreendido usualmente entre duas tomadas de medição de vazão;
Sist. de tempo real	É o sistema que depende de dados de tempo real de seu processo, para, a partir do processamento destes, entre uma varredura e outra de dados, gerarem algum resultado importante ao processo;
Taxa de varredura	É o intervalo de tempo, entre uma varredura e outra, imediatamente anterior;
Varredura	Aquisição de dados, de uma única vez (daí o vocábulo “varredura”) de todos os transmissores localizados em pontos geograficamente distribuídos na rede de automação, relevantes ao processo de movimentação dutoviária.

1. Introdução, histórico e objetivos

1.1 Apresentação

A maior parte da produção brasileira de gás natural vem de campos *offshore* tais como Golfinho na Bacia do Espírito Santo ou Mexilhão na Bacia de Santos. Tais dutos escoam mistura multifásica de gás (fase predominante), condensados e uma menor parte de água.

As preocupações ambientais têm se desdobrado em ações por partes das companhias operadoras no sentido de monitorar tais dutos contra vazamentos ao longo de seu comprimento. Embora a detecção de vazamentos não evite o vazamento em si, permite iniciar antecipadamente uma série de ações mitigadoras de tal evento, de sorte que há benefício ao se detectar o menor vazamento no menor intervalo de tempo que a tecnologia dispuser (i. e., com grande sensibilidade), sempre dentro da maior confiabilidade possível (i. e., na ausência de falsos positivos). E esse é o critério mais importante: confiabilidade, referido nas principais referências API 1130^[1], CSA Z662^[2], mesmo que para tanto se sacrifique um pouco a sensibilidade.

Assim, um sistema automatizado que possa retornar alguma métrica fortemente vinculada ao parâmetro de desempenho confiabilidade é algo que introduz um ganho maior nos sistemas de detecção de vazamentos em gasodutos, uma vez que quantifica o principal parâmetro de desempenho. Duas métricas são possíveis: (i) a probabilidade de vazamento e (ii) a probabilidade de um alarme de vazamento ser falso. Para o específico domínio deste trabalho, qualquer uma das duas pode ser usada, bastando que, no evento de um alarme de vazamento, a primeira tenda a unidade (ou 100%) ou a segundo tenda a zero.

Há uma diversidade de propostas para sistemas de detecção de vazamentos em dutos para diferentes cenários, onde diferentes fluidos são transportados, as quais serão abordadas no **capítulo 6**.

Este trabalho propõe um sistema baseado na análise estatística em tempo real dos desbalanceamentos de inventário mássico total considerando ambas as fases, frente às vazões mássicas que entram e deixam o duto em cada fase. Seus principais benefícios são a informação da existência de um vazamento num tempo inversamente proporcional à magnitude de sua vazão, associado a uma probabilidade de sua existência, ou do alarme que o identificou ser falso.

1.2 Caracterização geral dos gasodutos bifásicos brasileiros

Os campos citados escoam suas produções através de gasodutos bifásicos do tipo *subsea-topside-shore*, que seguem basicamente a filosofia de projeto, descrita adiante, conforme o esquema da **Figura 1.1**.

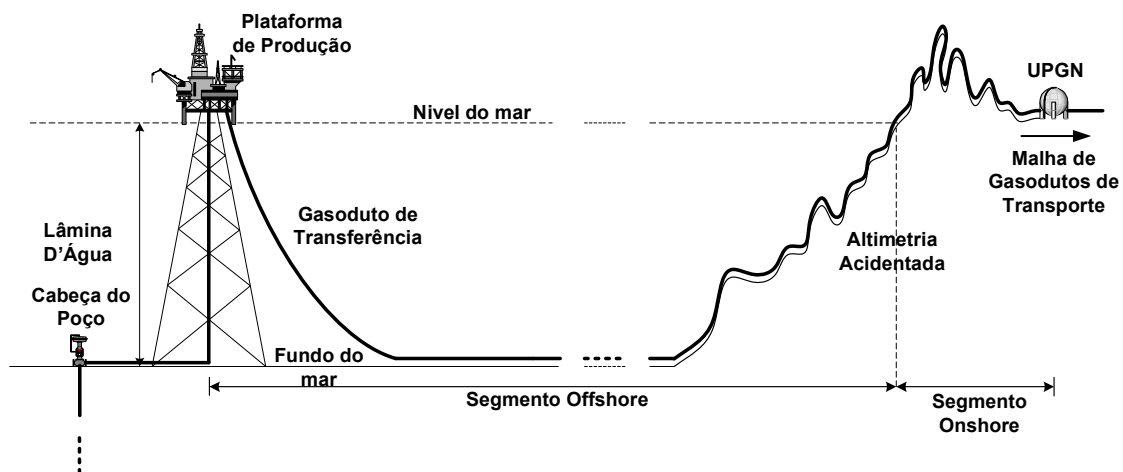


Figura 1.1 – Esquema simplificado de produção *offshore* de gás

Numa descrição sumária, a produção de cada poço é direcionada a partir de sua cabeça no fundo do mar a uma plataforma de produção adequadamente posicionada (a qual usualmente leva o nome do campo). Na plataforma acontece o tratamento primário, onde, de forma bastante resumida, a corrente de gás é separada da corrente líquida e cada fase é então medida. A partir daí as correntes separadas de gás e líquido têm suas pressões equalizadas e são alinhadas para um mesmo gasoduto, o qual transportará essa mistura bifásica até o continente. A **Figura 1.2** mostra um esquema bastante simplificado do tratamento primário na entrada do duto, i. e., na plataforma.

Na realidade, na maior parte dos sistemas de produção de gás nacionais têm-se diversos poços chegando à mesma plataforma, e há tão somente um único separador na plataforma, que é usado apenas para testar a contribuição de cada poço, cada um de uma vez. Os outros poços são diretamente alinhados a um coletor, havendo para

tanto apenas a equalização das pressões. A partir desse coletor a produção integral dos outros poços (i. e., à exceção daquele que eventualmente se encontre em teste) passa por um medidor que determina a vazão de gás através de medição multifásica (e. g., medidor V-Cone), e é então direcionada ao gasoduto bifásico.

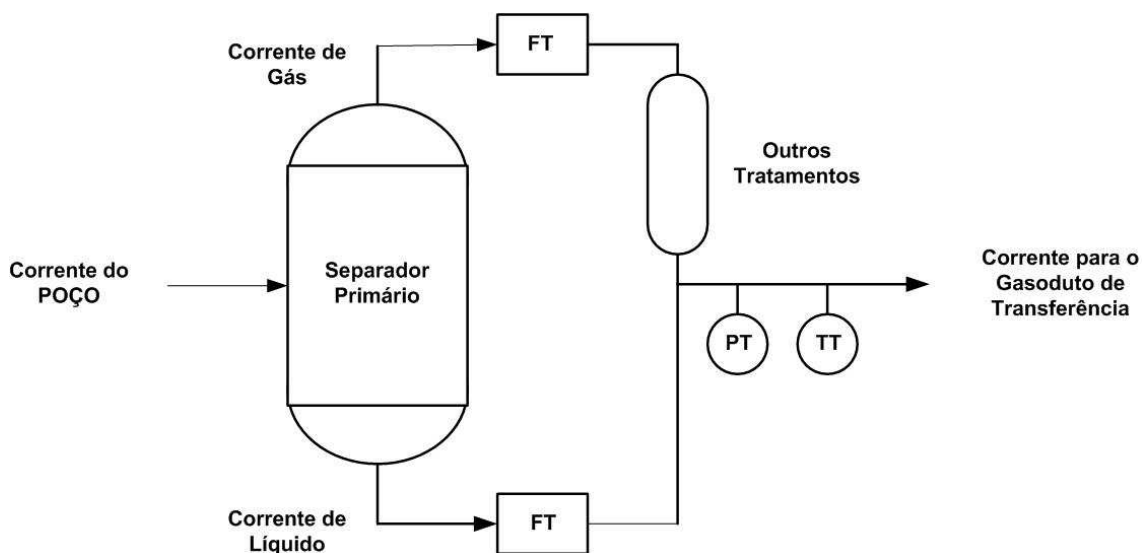


Figura 1.2 – Separação e medição na entrada do duto

Diversos outros tratamentos são realizados na corrente de gás, e. g., introdução de inibidores de corrosão e de formação de hidratos. A vazão de líquido é inferida através de correlações *PVT*, obtidas com as medições históricas feitas no separador, onde foram determinadas as razões gás/líquido (RGL), e água/óleo (RAO). Seja qual for a abordagem, é possível realizar medições das vazões de cada fase na entrada do duto, embora com incertezas variáveis.

A chegada do gasoduto em terra (i. e., sua saída) ocorre a montante de uma unidade de processamento de gás natural (UPGN) a qual separará de novo o líquido do gás, sendo este último incorporado à malha nacional de gasodutos de transporte, em terra. A **Figura 1.3** mostra um esquema simplificado do tratamento efetuado na saída do duto, i. e., na UPGN.

O separador existente em tal planta próxima à saída do duto é chamado de coletor de golfadas (*slug catcher*). Os gasodutos citados, todos construídos ao longo das duas últimas décadas, apresentam diâmetros que variam de 16 a 34 in. (0,4046 a 0,8636 m), bem como comprimentos entre 50 e 250 km.

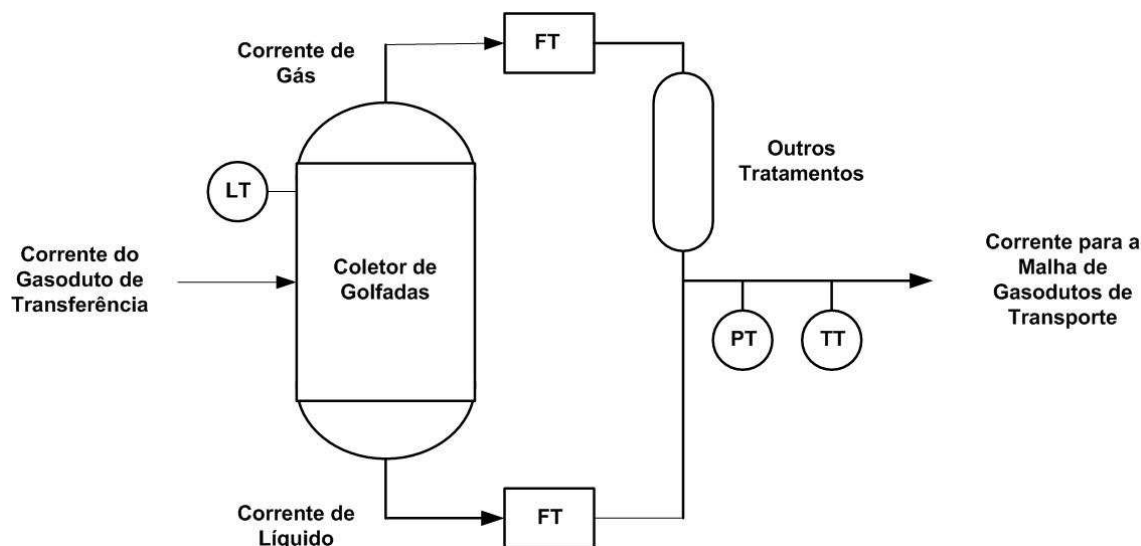


Figura 1.3 – Separação e medição na saída do duto

A operação desses gasodutos exige a passagem periódica de pigs para remoção de líquidos. A periodicidade é função da maior ou menor presença de líquidos na linha, i. e., depende da composição e do equilíbrio de fases dos fluidos no reservatório, variando desde alguns pigs por dia, até um pig por semana, a depender do campo. A decorrência da passagem de pigs está na formação de uma grande golfada de líquidos à medida que o pig se aproxima da saída do duto, uma vez que sua seção transversal se enche de líquido. Algumas consequências se derivam de tal prática, dentre elas a ausência de vazão de gás por algum tempo (de alguns minutos a algumas horas), a partir do enchimento da seção transversal com líquido, até a retirada do pig da linha, em sua saída.

1.3 Dificuldades conhecidas

Em se tratando de tecnologias de detecção de vazamentos em dutos, este é o cenário onde estão os maiores desafios, uma vez que:

- (i) são duas fases, e usualmente dois ou mais padrões de escoamento, que podem se formar em diferentes pontos do duto devido a sua altimetria. A **Figura 1.4** ilustra o aspecto acidentado do perfil de elevação e sua consequência na fração de líquidos, bem como a **Figura 1.5** ilustra tais padrões (BAPTISTA[3]), os quais são típicos de gasodutos, i. e., estratificado no segmento offshore, onde há suave variação de elevação, e predominantemente de golfadas no segmento onshore onde o perfil de elevação apresenta variação grande;

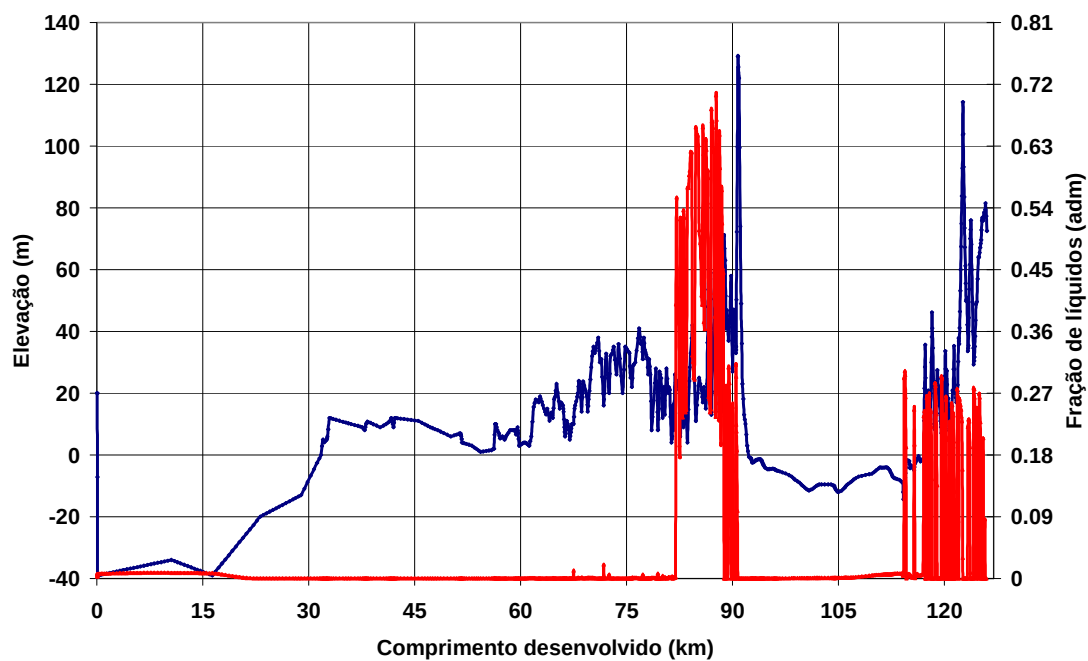


Figura 1.4 – Elevação e fração de líquidos num gasoduto nacional^[3]

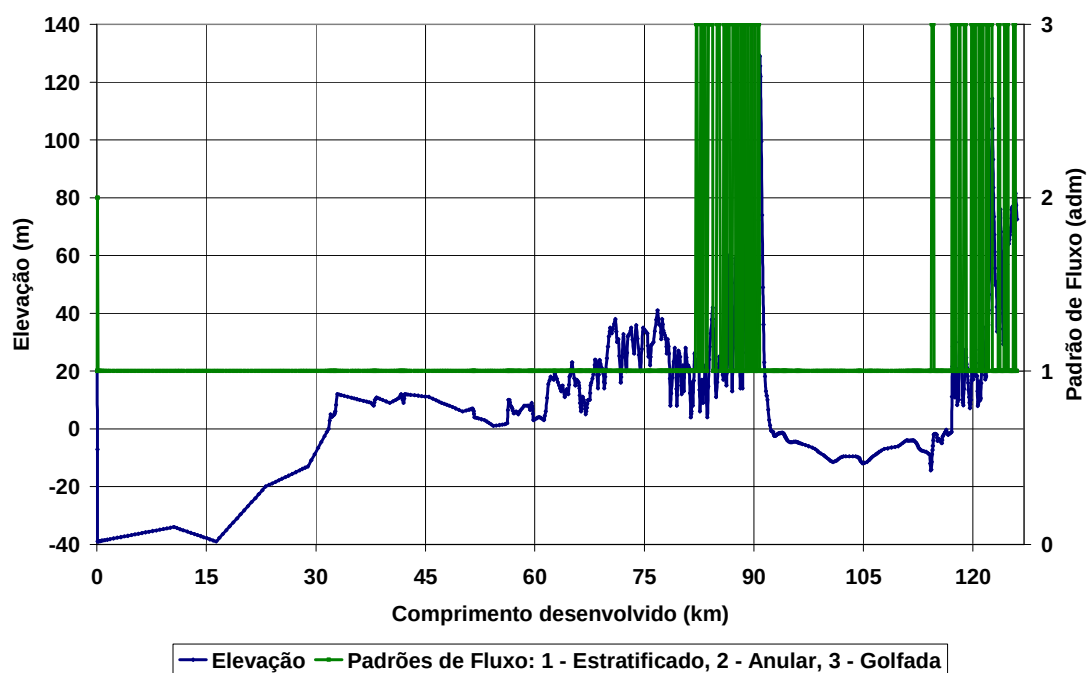


Figura 1.5 – Padrões de escoamento num gasoduto nacional^[3]

- (ii) em praticamente todos os casos somente é possível realizar medições na entrada e saída do duto, independentemente de quais sejam estas medições;

- (iii) a natureza da operação destes dutos impõe dificuldades adicionais, como a citada passagem de pigs;
- (iv) o espaçamento entre tomadas de medição pode ser grande o suficiente para fazer com que os eventos somente sejam sentidos na velocidade dos eventos transientes em gasodutos, os quais são reconhecidamente lentos, devido a alta compressibilidade do gás.

1.4 Principais objetivos

Em face de tais desafios, propõe-se neste trabalho uma metodologia de detecção de vazamentos capaz de atuar no domínio de gasodutos bifásicos, com diferentes espaçamentos entre tomadas de medição em padrão de escoamento estratificado.

Dentre as diferentes tecnologias de detecção de vazamentos a serem apresentadas e comentadas no **capítulo 6**, pretende-se usar um algoritmo baseado na análise estatística de testes de probabilidade seqüencial, tendo como estimador de estados em seus contornos um simulador de escoamentos em gasodutos bifásicos. Assim, são seguintes os objetivos deste trabalho:

- (i) Prover modelagem, incluindo métodos numéricos, encapsulada em código, de um estimador de estados caracterizado por um simulador de escoamento bifásico em gasodutos para regime estratificado;
- (ii) Prover algoritmo de detecção de vazamentos baseado em análise estatística de desbalanceamentos mássicos, fazendo uso de testes de probabilidade seqüencial aplicado a escoamento bifásico em gasodutos;
- (iii) Analisar o desempenho de uso combinado dos itens (i) e (ii) como metodologia de detecção de vazamentos em gasodutos bifásicos de acordo com características diversas dos dutos alvo: geométricas (comprimento, diâmetro); de natureza do escoamento bifásico (pouca ou muita formação de líquidos no interior do duto) e de desafio tecnológico (vazamentos que se desenvolvam lentamente em escoamento de pressão relativamente baixa). Para tanto, dois segmentos de gasodutos bifásicos nacionais foram selecionados procurando abranger uma faixa representativa das características citadas.

Para o objetivo (i), usou-se o trabalho de OMGBA-ESSAMA^[4], como ponto de partida. Inserções e modificações nesta modelagem foram identificadas e integram parte do trabalho de desenvolvimento adicional.

É importante destacar que muito já foi realizado neste sentido para os dutos puramente monofásicos, mas que o estado da arte é ainda inicial para os dutos bifásicos.

Assim, a principal contribuição deste trabalho é a disponibilização de um algoritmo de detecção de vazamentos em gasodutos bifásicos, focado na confiabilidade, apoiado por uma metodologia estatística. Há pouco desenvolvimento neste sentido devido à complexidade do escoamento em si, associado às incertezas tanto da caracterização do escoamento, quanto de suas medições.

Busca-se adicionalmente atuar num cenário onde as tecnologias ou produtos comerciais existentes não apresentam desempenho satisfatório, quais sejam: (i) vazamentos que se desenvolvam lentamente (*creeping leaks*); (ii) duto operando a baixa pressão (abaixo de 20 bar no ponto onde o vazamento ocorre).

1.5 Organização dos capítulos do texto

Este primeiro capítulo objetiva apresentar o problema a ser abordado, citar os principais conceitos envolvidos bem como descrever a organização do trabalho.

O **capítulo 2** traz uma revisão da literatura e descrição das formulações dos modelos de escoamento bifásico adequados ao problema, i. e., o escoamento de gás e líquidos (condensados e água) confinados em gasodutos.

O **capítulo 3** mostra um apanhado dos principais métodos numéricos a serem empregados em conjunto com as formulações apresentadas no **capítulo 2** de sorte a prover uma solução ao problema proposto de escoamento.

As simulações numéricas que verificaram o modelo proposto são descritas e comentadas no **capítulo 4**, onde a verificação é feita contra o simulador comercial de escoamento multifásico OLGA^[5], cuja formulação é integralmente descrita em BENDIKSEN ET AL.^[6] e SCANDPOWER^[7].

O **capítulo 5** apresenta o estado da arte das funções avançadas de gestão operacional de dutos, i. e., os sistemas de gestão e acompanhamento de tempo real criados para facilitar e, por muitas vezes, tornar possível a operação de dutos.

O **capítulo 6** se dedica a uma dessas funções, qual seja, o sistema de detecção de vazamentos em dutos, apresentando seu estado da arte, sua adequação e

aplicação para o cenário objeto deste trabalho, procurando descrever as principais tecnologias e apontar uma escolha, e as razões que a suportam, e um exemplo de aplicação.

O **capítulo 7** aplica a solução proposta a dois segmentos de dutos da malha dutoviária nacional, sendo o primeiro curto (32 km), de diâmetro nominal relativamente grande (24 in ou 0,6090 m) e com pouca presença de líquidos (α_L média em torno de 1%); e o segundo longo (188 km), com diâmetro nominal inferior ao primeiro (16 in ou 0,4064 m) e com uma relevante formação de líquidos (α_L média em torno de 8%).

2. Modelagens de escoamento bifásico

2.1. Introdução

O escoamento bifásico confinado em gasodutos pode ser classificado de muitas formas, a depender do critério de cada autor. Os fenômenos físicos, tais como padrões de escoamento, interações entre as fases (i. e., a caracterização da interface entre elas) e a modelagem matemática são avaliados conforme a visão e a priorização específicas de cada autor. As principais diferenças são abordadas neste capítulo e se baseiam nos trabalhos de FIGUEIREDO^[8] e OMGBA-ESSAMA^[4].

As seções que seguem trazem a revisão bibliográfica referente aos principais conceitos relacionados às modelagens de escoamento bifásico.

2.2. Padrões de escoamento

Cada padrão de escoamento é definido pelos fluidos que caracterizam cada fase escoando simultaneamente em um duto e pela geometria de suas interfaces. O escoamento bifásico de óleo e gás pode ser classificado conforme os padrões descritos em OMGBA-ESSAMA^[4] e ISHII & IBIKI^[9], para citar apenas duas dentre várias referências.

Para dutos “próximos a horizontalidade” i. e., onde o duto tem uma inclinação formando um pequeno ângulo com a horizontal (distinção necessária a evitar a formulação de escoamentos verticais), tem-se a classificação descrita em OMGBA-ESSAMA^[4] a qual define quatro padrões principais: bolhas, golfadas, estratificado e anular. Os outros padrões são aqui encarados como variações ou detalhamentos destes principais, citados em artigos clássicos como TAITEL & DUCKLER^[10]. A título de exemplo, a **Figura 2.1**, ilustra os padrões particularizados para “próximos à horizontalidade” (SHAHA^[11]).

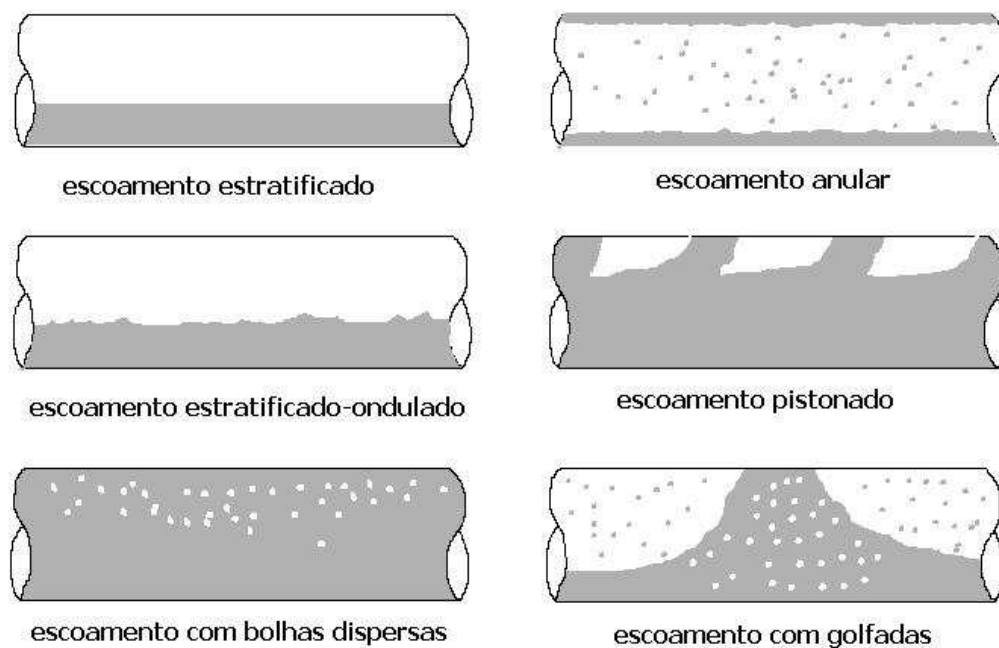


Figura 2.1 – Escoamento bifásico horizontal classificado por SHAHA^[11].

Outra classificação, presente em ISHII & IBIKI^[9], divide o escoamento em três classes principais, chamadas de escoamento separado, escoamento de mistura ou transitório e escoamento disperso. As classes são subdivididas em padrões, representando as diferentes geometrias de interfaces entre as fases. A mudança na geometria da interface de cada fase acontece de forma gradual, pois na classe transitória percebe-se que há influência das outras duas classes nos seus padrões de escoamento. Desta forma a classificação se torna abrangente, com praticamente todos os casos pertencendo a um padrão específico.

2.3. Modelos existentes

2.3.1. Introdução

A modelagem para escoamento bifásico confinado em dutos pode ser aplicada em diferentes domínios do conhecimento. Assim, sua modelagem implica em abordagens específicas por aplicação. Há duas formas, a exemplo das modelagens monofásicas, de descrição de seu domínio.

A primeira, “Euleriana”, tem seu foco em pontos fixos do espaço, acompanhando a variação das grandezas físicas do escoamento de ponto para ponto no domínio espacial.

A segunda, “Lagrangiana”, apresenta uma referência de observação móvel, tendo como foco uma partícula de fluido no escoamento. Essa modelagem não é utilizada em geral para escoamentos de fluidos devido à dificuldade de se acompanhar todas as partículas de fluido.

A modelagem “Euleriana” do escoamento bifásico em dutos pode ser encontrada na literatura em diferentes modelagens/formulações. Usando a classificação sugerida por FABRE ET AL.^[12], existem três modelos disponíveis:

- Modelo do Equilíbrio Homogêneo / *Homogeneous Equilibrium Model* (HEM);
- Modelo Drift-Flux / *Drift-Flux Model* (DFM);
- Modelo de Dois Fluidos / *Two-Fluid Model* (TFM).

2.3.2. Modelo de equilíbrio homogêneo - *Homogeneous Equilibrium Model* (HEM)

O modelo de equilíbrio homogêneo apresenta a mais simples das formulações para escoamento bifásico. Sua principal característica é supor que a velocidade, a pressão e a temperatura das duas fases e da interface são iguais. Esta hipótese se baseia na suposição de que as diferenças dessas variáveis entre as fases promovem a troca de massa, quantidade de movimento e energia rápidos o suficiente para que o equilíbrio termodinâmico seja atingido.

OMGBA-ESSAMA^[4] cita uma das aplicações deste modelo: o caso no qual o atrito entre as fases é um fator importante do escoamento. Nestes escoamentos, as fases estão acopladas e, portanto, suas velocidades estão muito próximas, podendo ser consideradas iguais. Podem-se citar como exemplo os casos em que uma fase encontra-se finamente dispersa em outra, como no escoamento de bolhas de ar (ou vapor) em água, ou com óleo saturado de gás, numa condição termodinâmica próxima ao início da formação das primeiras bolhas de gás.

A formulação obedece a uma modelagem monofásica para as equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia, considerando ambas as fases como uma mistura (daí ser também chamado de “Modelo de mistura”). Neste caso, as propriedades físicas serão muito próximas as da fase predominante, pois considera uma pequena contribuição da outra fase. Além disso, o modelo de equilíbrio homogêneo utiliza, quando necessário, um termo fonte correspondente. As propriedades desta mistura são determinadas através das equações de estado tais como PENG ROBINSON^[13], SOAVE^[14] ou STARLING^[15], as quais podem descrever como ambas as fases estão presentes na formulação (i. e., conseguem descrever o

comportamento de líquido, gás e seu equilíbrio líquido-vapor). O termo fonte pode ser adotado de acordo com CORRADINI^[16].

Há ainda o modelo de Equilíbrio Homogêneo modificado, onde sua formulação é desenvolvida tal como no modelo *drift-flux* (por ser ainda descrito em 2.2.3). Em tal modelo há apenas uma equação de quantidade de movimento, mas deve-se incluir um termo para expressar a diferença entre as velocidades.

Trata-se do modelo mais simples que apresenta imprecisões características tais como a estimativa das propriedades de transporte massa específica, viscosidade e condutividade térmica. Simplificações são encontradas na literatura tais como usar os dados de viscosidade e condutividade térmica da fase predominante, e computar média ponderada para a massa específica, desconsiderando a existência de propriedade residual (OMGBA-ESSAMA^[4]).

Dentre as várias aplicações de engenharia, o modelo HEM pode ser classificado de várias formas. Uma delas é o modelo para escoamento isotérmico, cuja característica principal é cada fase ter sua equação da continuidade e uma equação de quantidade de movimento para a mistura. Para essa discussão, o trabalho recente de GARG ET AL.^[17], bem como os trabalhos clássicos de MORI ET AL.^[18] e SHARMA ET AL.^[19] podem ser citados. Críticas a esses dois últimos são encontradas em MANNINEN & TAIVASSALO^[20]. Conforme dito, este é um modelo limitado e, cujo uso requer validação através de experimentação (i. e., medições de campo).

2.3.3. Modelo Drift-Flux - *Drift-Flux Model* (DFM)

Como no modelo de equilíbrio homogêneo, o modelo *drift-flux* utiliza a mesma pressão e temperatura para as duas fases e para a interface, mas as velocidades são distintas para cada fase. O principal fator responsável pela diferença de velocidade entre as fases se deve às forças de corpo, como a força da gravidade e as forças centrífuga e centrípeta. O equilíbrio termodinâmico continua sendo estabelecido através de processos suficientemente rápidos, já comentados no modelo homogêneo. A relaxação da hipótese de velocidades iguais entre as fases, utilizada no modelo de equilíbrio homogêneo, se torna mais importante (uma vez que torna o modelo menos realista) quando a diferença entre as massas específicas de cada fase é muito grande na presença de campos gravitacionais e gradientes de pressão não desprezíveis. Dada uma diferença de massa específica, efeitos de empuxo tendem a induzir uma diferença de velocidade da fase dispersa em relação à fase contínua.

Nesta formulação, é necessária apenas uma equação de quantidade de movimento, que deve conter um termo para representar a diferença de velocidade das fases. Várias nomenclaturas são utilizadas na literatura, tais como “*drift-flux model*”, de MASELA ET AL.^[21], e “*local-equilibrium model*” (Modelo de equilíbrio local), de JOHANSEN ET AL.^[22]. Este modelo também tem suas limitações, e é sempre importante verificar sua validade para o caso a ser estudado. É necessário também validar a hipótese de equilíbrio termodinâmico preferencialmente através de medições ou numa abordagem teórica consolidada. A formulação do modelo *drift-flux* foi explorada em trabalhos como PAUCHON ET AL.^[23], MASELA ET AL.^[21] e FAILLE & HEITZE^[24].

Em tal modelagem as velocidades de cada fase são determinadas através de equações constitutivas correspondentes ao caso a ser estudado. As fases devem estar acopladas de forma que a mistura formada pelo escoamento contenha partículas de líquido e não partículas de gás (caso mais bem resolvido através do modelo de equilíbrio homogêneo).

Para o caso específico de escoamento isotérmico, os modelos de equilíbrio homogêneo e *drift-flux* possuem formulações similares, mas com pequenas diferenças. Como no modelo *drift-flux* as velocidades para cada fase são diferentes, têm-se duas equações de balanço de massa. Comparado com o modelo de equilíbrio homogêneo, o modelo *drift-flux* é mais complexo, ou seja, as velocidades relativas das fases são calculadas através de uma formulação de balanço de forças para a fase dispersa, ou através de uma correlação algébrica.

2.3.4. Modelo de dois fluidos - Two-Fluid Model (TFM)

Esta é a forma mais complexa de formular um problema de escoamento bifásico, uma vez que as fases são identificadas e tratadas de forma totalmente independente. Cada fase tem sua equação de balanço de massa, quantidade de movimento e energia. Assim, as variáveis velocidade, pressão e temperatura são distintas (pressão e temperatura não são distintas nos dois modelos anteriores). À semelhança do modelo *drift-flux*, as velocidades são determinadas através da relação entre as massas específicas de cada fase.

O tempo de transferência de calor entre as fases na interface, necessário para atingir o equilíbrio termodinâmico, é o que determina as temperaturas de cada fase. O conhecimento desse tempo é importante para que se percebam as variações de vazão devidas a mudanças de área de seção transversal (diâmetro), tanto em regime permanente como transiente. O trabalho de CORRADINI^[16] calculou esse tempo

considerando as condições de vazão prescritas, necessárias para se determinar um número de Fourier característico para o sistema. Para o modelo bifásico, quando uma equação de energia para cada fase é utilizada, pode-se determinar a temperatura relativa entre as fases onde o caso de desequilíbrio termodinâmico for detectado.

Para o estado de desequilíbrio termodinâmico, a formulação do modelo para a pressão é mais complexa (e. g., o modelo sugerido por ISHII & IBIKI^[9]). Na maioria das aplicações de engenharia, a variação de pressão em uma interface é diretamente proporcional à tensão superficial e inversamente proporcional ao raio de curvatura da interface. Este fator é em geral pequeno, à exceção de escoamentos de gotas em gás ou bolhas em líquido. A diferença de pressão entre as fases pode também ocorrer por motivos relacionados a efeitos dinâmicos, onde a pressão relativa em uma fase é alta, por exemplo. É possível também se detectar uma diferença de pressão relativa entre as fases quando há um grande fluxo de massa na interface devido à mudança de fase (evaporação ou condensação). Esses são os principais métodos para determinar as diferenças de pressão nas fases.

Na maioria das aplicações do modelo de dois fluidos, o desequilíbrio termodinâmico só é considerado quando ocorrem em uma escala de tempo semelhante às escalas de tempo associadas às taxas de mudança de fase e às oscilações de pressão. Para casos onde a velocidade do escoamento excede ou iguala a velocidade do som, o desequilíbrio é importante para determinar a diferença de pressão entre as fases.

As formulações dos modelos bifásicos são constituídas no mínimo por equações de balanço de massa e quantidade de movimento para cada uma das fases separadamente, e também por relações constitutivas. Essa formulação considera as interações entre as fases ao utilizar um campo de velocidade e uma equação de quantidade de movimento independente para cada fase. Esse modelo requer dados experimentais confiáveis para formular detalhadamente as interações interfaciais, mas é vantajoso por definir rigorosamente o real processo de transporte.

O modelo deverá ser aplicado em casos onde as fases estão pouco acopladas, isto é, as ondas de pressão se propagam com velocidades relativamente diferentes entre as fases. Neste caso, as equações de quantidade de movimento das fases quantificam as instabilidades e a dinâmica das interfaces, e esses são os principais fatores que determinam os padrões de escoamento.

Assim, conclui-se que para os casos de fenômenos ondulatórios e para definir padrões de escoamento, esse modelo é o mais indicado, pois os outros dois (modelo de equilíbrio homogêneo e *drift-flux*) são considerados mais simples.

2.4. Formulações dos modelos

2.4.1. Introdução

Os modelos de escoamento para dois fluidos são usualmente desenvolvidos a partir de diferentes metodologias de definições de propriedades médias de elementos do escoamento. Essas metodologias serão aqui chamadas de “promediações”, as quais podem se dar no tempo, no espaço assim como através do uso de médias amostrais.

As formulações obtidas a partir das “promediações” levam a um conjunto completo de equações tridimensionais, tais como as constantes nos trabalhos de BITTENCOURT^[25], ROSA^[26] e ISHII & IBIKI^[9]. No entanto, em muitas aplicações de engenharia, a geometria do sistema é suficientemente bem representada por uma abordagem unidimensional, cenário deste trabalho, i. e., escoamento em gasodutos bifásicos. Desta forma, a abordagem empregada para desenvolver uma modelagem matemática prática consiste em integrar estas equações de movimento tridimensionais no domínio da seção transversal do escoamento e, assim, obter uma modelagem unidimensional de dois fluidos, caracterizada por um conjunto de equações “promediadas” por área.

Diferentes referências demonstram as “promediações” tais como ISHII & IBIKI^[9], YADIGAROGLOU & LAHEY^[27], DREW^[28], LAHEY JR & DREW^[29], DREW & PASSMAN^[30] e FABRE ET AL.^[12].

2.4.2. Geometria do duto e das fases

Considere um duto de seção transversal circular de diâmetro D_i , inclinado de um ângulo β (entre a geratriz do duto e a horizontal), conforme mostram a Figura 2.2 bem como a Figura 2.3.

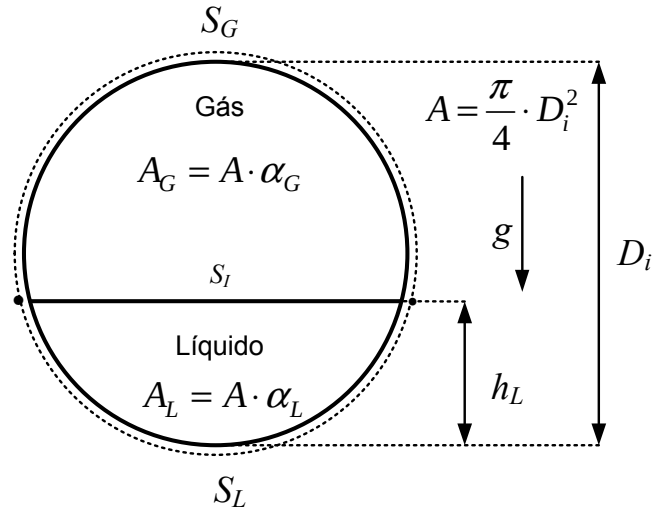


Figura 2.2 – Seção transversal do escoamento

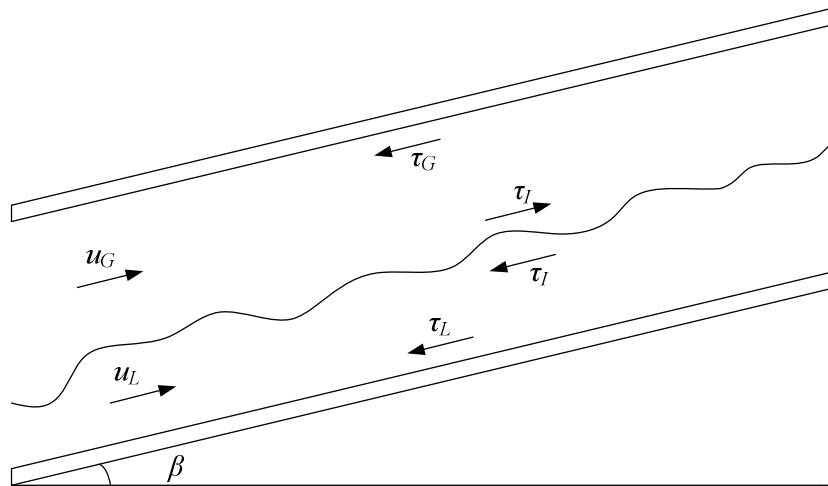


Figura 2.3 – Perfil lateral de escoamento estratificado

2.4.3. Frações volumétricas para as fases

Considere as definições das frações volumétricas de líquido (também chamada “*holdup*”) e de gás através do conjunto de equações (2.1):

$$\alpha_L = \frac{V_L}{V_L + V_G} \quad (2.1a)$$

$$\alpha_G = \frac{V_G}{V_L + V_G} \quad (2.1b)$$

onde V_L e V_G são respectivamente os volumes ocupados pelas fases gás e líquida. Assim, tem-se:

$$\alpha_G + \alpha_L = 1 \quad (2.2)$$

Para tornar genérica a referência às fases, define-se o subscrito k , onde k pode assumir os valores L ou G . Observa-se por oportuno que em algumas referências, tipicamente de indústria, esta fração leva o nome de “*holdup*”. Se a referência for genérica, i. e., não amarrar a fase e citar apenas genericamente o termo “*holdup*”, a referência é sempre para a fase líquida. A fração de gás também é conhecida na indústria como fração de vazios.

2.4.4. Equação da massa (continuidade)

Numa modelagem unidimensional transiente bifásica tem-se a equação de continuidade, representada pela Eq. (2.3):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_k \alpha_k u_k) = \Gamma_k \quad (2.3)$$

onde k define a fase considerada, α_k a fração volumétrica da fase k no domínio considerado, u_k a velocidade da fase k , e Γ_k a taxa temporal de transferência de massa entre as fases.

2.4.5. Equação de *momentum* (quantidade de movimento)

Analogamente, tem-se a seguinte equação de quantidade de movimento que descreve o modelo, representado pela Eq. (2.4):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k u_k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_k \alpha_k u_k^2) = -\alpha_k \frac{\partial P_k}{\partial x} - \Delta P_{ki} \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}[\alpha_k (\tau_k + \tau_k^{\text{Re}})] + M_{kw} + M_{ki} + \Gamma_k u_{ki} - \rho_k \alpha_k g \sin \beta \quad (2.4)$$

onde M_{kw} é contribuição de quantidade de movimento linear referente ao atrito entre cada fase e a parede do duto; M_{ki} , a contribuição devido ao atrito entre as fases; o produto $\Gamma_{ki} u_{ki}$ descreve a troca de quantidade de movimento entre as fases e a última parcela da Eq. (2.4) considera a componente de força devido à gravidade. A pressão em cada fase é denotada por P_k , ao passo que a grandeza ΔP_{ki} descreve a variação da diferença de pressão entre a pressão na fase P_k , e a pressão na interface entre as fases, P_{ki} . Observa-se por oportuno que, numa modelagem mais rigorosa, onde se considera os efeitos de tensão superficial, podem-se ter diferentes pressões

interfaciais por fase. As tensões τ_k e τ_k^{Re} referem-se às tensões viscosas e às tensões turbulentas de Reynolds na fase k , respectivamente.

2.4.6. Equações de fechamento

Considere as equações de fechamento para o modelo postulado, caracterizadas pelo conjunto de Eqs. (2.5):

$$\sum_k \alpha_k = 1 \quad (2.5a)$$

$$\sum_k \Gamma_k = 0 \quad (2.5b)$$

$$\sum_k M_{ki} + \Gamma_k u_{ki} = 0 \quad (2.5c)$$

onde na primeira equação, o somatório das frações volumétricas de cada fase é unitário. Nas duas equações seguintes, tem-se termos de transferência para massa e quantidade de movimento respectivamente, entre fases. Tal modelo é composto por 22 (vinte e duas) variáveis e apenas 7 (sete) equações.

Considerando que os efeitos de difusão viscosa molecular e turbulenta são desprezíveis, e que não há transferência de massa entre as fases, pode-se desprezar as grandezas τ_k , τ_k^{Re} , Γ_k .

O modelo simplificado passa então a apresentar 14 (catorze) variáveis e 6 (seis) equações. As 14 (catorze) variáveis são: ρ_L , ρ_G , α_L , α_G , u_L , u_G , P_L , P_G , ΔP_{Li} , ΔP_{Gi} , M_{Lw} , M_{Gw} , M_{Li} , M_{Gi} .

2.4.7. Introdução às equações constitutivas

A referência completa para as equações constitutivas e de fechamento para o padrão de escoamento estratificado é o trabalho de ULLMANN & BRAUNER^[36]. Outros trabalhos que incluem um apanhado completo de opções para as equações de fechamento, bem como equações constitutivas para este e outros padrões de escoamento são LIVESCU ET AL.^[37], BONIZZI ET AL.^[38], e ISHII & MISHIMA^[39]. Os equacionamentos clássicos serão descritos na seqüência, e todos constam nessas referências.

2.4.8. Equações constitutivas para os termos de pressão

2.4.8.1. Hipótese de fluido barotrópico

Por simplicidade no desenvolvimento dos modelos, supõe-se que o escoamento é isotérmico. Essa é uma restrição a ser analisada quando da comparação com dados de campo uma vez que a temperatura é uma componente importante do problema. Assim, numa primeira abordagem, a única fase modelada como compressível, a fase gasosa, fica sujeita à hipótese de fluido barotrópico, ou seja, a massa específica do gás e a pressão assumem uma relação de dependência direta, biunívoca, de acordo com:

$$\rho_G = \rho_G(P) \Leftrightarrow P = P(\rho_G) \quad (2.6)$$

2.4.8.2. Variação de pressão entre a fase k e a interface (ΔP_{ki})

Considere as definições das variações de pressão entre a fase e a interface, caracterizadas pelo conjunto de Eqs. (2.7):

$$\Delta P_{ki} \equiv P_k - P_{ki}, \quad k \in \{L, G\} \quad (2.7a)$$

$$\Rightarrow \Delta P_{Li} \equiv P_L - P_{Li} \quad (2.7b)$$

$$\Rightarrow \Delta P_{Gi} \equiv P_G - P_{Gi} \quad (2.7c)$$

2.4.8.3. Pressões interfaciais

Essa modelagem supõe que a pressão é igual em ambas as fases. Quando essa hipótese se prova inadequada em algum cenário onde claramente não se atinja o equilíbrio termodinâmico (e. g., propagação de ondas de choque na fase gás) então uma equação constitutiva local deve ser empregada para considerar as diferenças de pressão devido a efeitos dinâmicos e de interface. Considere a **Tabela 2.1** onde correlações para tais pressões encontradas na literatura são descritas:

Tabela 2.1 – Correlações de pressão na interface

Padrão de fluxo	Equação	Referência	Número	Obs.
Estratificado	$P_{Gi} - P_{Li} = \sigma \frac{\partial h_L^2}{\partial x^2}$	TAITEL & BARNEA ^[40]	(2.8a)	
Bolhas	$P_{Gi} - P_{Li} = \frac{2\sigma}{r_B}$	DREW & PASSMAN ^[30]	(2.8b)	(1)

(1) r_B é o raio médio da bolha, e σ é a tensão superficial na interface.

Ao se desprezar os efeitos da tensão superficial, i. e., fazendo-se $\sigma = 0$, tem-se:

$$P_{Gi} = P_{Li} = P_I \quad (2.9)$$

Alternativas para o termo de correção de pressão, $\Delta P_{ki} = P_k - P_{ki}$, seguem na **Tabela 2.2** com as respectivas referências bibliográficas.

Tabela 2.2 – Pressões de interface

Padrão de fluxo	Equação	Referência	Número	Observação
Estratificado	$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_L \Delta P_{Li}) = \alpha_L \rho_L g \cos \beta \frac{\partial h_L}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_G \Delta P_{Gi}) = \alpha_G \rho_G g \cos \beta \frac{\partial h_L}{\partial x} \end{cases}$	TAITEL & BARNEA ^[40]	(2.10)	
	$\Delta P_{Li} = \Delta P_{Gi} = \alpha_L \alpha_G (\rho_L - \rho_G) D g$	BESTION ^[41]	(2.11)	
	$\begin{cases} \Delta P_{Li} = \rho_L g \cos \beta \left[-\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \frac{1}{3\pi\alpha_L} \sin^3\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right] \\ \Delta P_{Gi} = \rho_G g \cos \beta \left[-\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \frac{1}{3\pi\alpha_G} \sin^3\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right] \end{cases}$	LAHEY JR & DREW ^[29]	(2.12)	$\alpha_L = \frac{\gamma - \sin \gamma}{2\pi}$ $\alpha_G = 1 - \alpha_L$
Bolhas (diluido)	$\begin{cases} P_L - P_{Li} = \xi (Re_L, \alpha_L) \rho_L (u_G - u_L)^2 \\ P_G - P_{Gi} = 0 \end{cases}$	DREW & PASSMAN ^[30]	(2.13a)	$\xi = \frac{1}{4}$
Bolhas (Baixo Reynolds)	$\begin{cases} P_G - P_{Gi} = 0 \\ P_L - P_{Li} = \xi (Re_L, \alpha_L) \rho_L (u_G - u_L)^2 \end{cases}$	DREW & PASSMAN ^[30]	(2.13b)	$\xi = -\frac{9}{32}$
Bolhas (geral)	$\Delta P_{Li} = \Delta P_{Gi} = \delta (u_G - u_L)^2$	TOUMI ^[42]	(2.14)	$\delta = \xi \rho_L \alpha_G$
	$\Delta P_{Li} = \Delta P_{Gi} = \delta (u_G - u_L)^2$	BESTION ^[41]	(2.15)	$\delta = \frac{\rho_G \rho_L \alpha_G \alpha_L}{\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L}$

Onde: γ é ângulo subentendido pelo perímetro molhado de líquido;

ξ é um coeficiente ajustável usado para garantir que o modelo de dois fluidos se mantenha hiperbólico.

2.4.9. Equações constitutivas para tensão interfacial

A força de atrito interfacial representa o esforço realizado na interface entre as fases para manter a curvatura na interface, sendo dimensionalmente equivalente à força por unidade de comprimento. O modelo mais aceito na literatura vem de ISHII M.^[43], sendo descrito como uma soma de forças com diferentes interpretações físicas, de acordo com a Eq. (2.16):

$$M_{ki} = M_{ki}^D + M_{ki}^V + M_{ki}^B + M_{ki}^L + M_{ki}^C \quad (2.16)$$

Considere a **Tabela 2.3** para uma breve apresentação de cada força.

Tabela 2.3 - Diferentes parcelas da força de atrito interfacial

	Significado	Comentário	Referência
B	“Basset”	Força devida à aceleração da velocidade relativa entre as fases	CHENG ET AL. ^[44]
C	“Collision”	Força de colisão entre fases	ISHII & MISHIMA ^[39]
D	“Drag”	Força de arrasto	ISHII & MISHIMA ^[39]
L	“Lift”	Força de sustentação	ISHII & MISHIMA ^[39]
V	“Virtual mass”	Força de “massa virtual”	WATANABE T. ET AL. ^[45]

Tais forças podem ser formalmente conceituadas e interpretadas fisicamente com respaldo na literatura. Entretanto, CHENG ET AL.^[44] sugerem que a força de Basset é desprezível em sistemas bifásicos gás/líquido, bem como ISHII & MISHIMA^[39] declaram o mesmo para as parcelas de colisão (“collision”) e sustentação (“lift”), além de afirmar que seus mecanismos de atuação não são bem dominados. WATANABE T. ET AL.^[45] observam que a parcela de massa virtual é irrelevante para a computação da parcela de quantidade de movimento em cada fase, mas é principalmente usada em várias modelações bifásicas porque promove a estabilidade numérica do modelo, uma vez que pode alterar a estrutura convectiva das equações que descrevem este fenômeno. Desta forma apenas a força de arrasto apresenta relevância no domínio do escoamento bifásico de fluidos. ISHII & MISHIMA^[39] sugerem então modelá-la como uma composição de duas parcelas, conforme a Eq. (2.17) abaixo:

$$M_{ki}^D = \langle -\tau_{ki} \nabla \alpha_k \rangle_x + \overline{M}_{ki} \quad (2.17)$$

A parcela $\overline{M}_{ki}$ corresponde ao arrasto médio de uma partícula, o qual é relevante para o padrão de escoamento de bolhas dispersas, e a notação $\langle X \rangle_x$ caracteriza a média espacial de X na seção reta, segundo ISHII & IBIKI^[9]. Já a segunda parcela descreve o efeito do cisalhamento interfacial bem como gradiente de vazios, e é

particularmente importante para os padrões de escoamento que caracterizam escoamento separado (usualmente estratificado e anular).

2.4.9.1. Componente de arrasto no padrão de escoamento estratificado

ISHII & MISHIMA^[39] propõem a seguinte expressão para a estimativa da força interfacial de arrasto, considerando que tal força é predominantemente composta de efeitos de cisalhamento interfacial e da presença de um gradiente de vazios:

$$M_{ki}^D \cong -\tau_{Gi} \frac{S_i}{A} \quad (2.18)$$

onde, à semelhança de outras equações neste texto, A é a área da seção transversal ao escoamento, e S_i é o perímetro molhado da interface. A relação constitutiva para a tensão cisalhante da fase gás, τ_{Gi} , é dada em termos de um fator de atrito padrão, no caso para a interface, definido como:

$$\tau_{Gi} = \tau_I = \frac{1}{2} f_I \rho_G (u_G - u_L) |u_G - u_L| \quad (2.19)$$

A **seção 2.4.9.3** deste texto aborda as correlações existentes na literatura para a estimativa do fator de atrito interfacial f_I . Assim, neste texto, o termo de força interfacial M_{ki} presente na Eq. (2.4) se baseia nas correlações dadas pelas Eqs. (2.18) e (2.19) para escoamento estratificado.

2.4.9.2. Componente de arrasto no padrão de escoamento em bolhas

A força de arrasto média em uma partícula, gota, ou bolha é a força sentida por esta partícula quando se move através do fluido que a circunda. Considere a Eq. (2.20) abaixo para seu cálculo:

$$\bar{M}_{Gi} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_L \alpha_G C_D}{D_B} \bar{u}_r |\bar{u}_r| \quad (2.20)$$

Na Eq. (2.20), C_D é o coeficiente de arrasto, que é uma função da fração volumétrica de gás α_G , do diâmetro da bolha D_B , da velocidade relativa média $\bar{u}_r$, bem como da viscosidade do líquido. A dependência do C_D com tais parâmetros é encontrada em diferentes correlações tais como CLIFT ET AL.^[46] e no artigo referência de ISHII & ZUBER^[47]. O trabalho de ABBASPOUR ET AL.^[48], sugere a seguinte correlação para C_D :

$$Re_{GL} = \frac{\rho_G(u_G - u_L)D_B}{\mu_G} \quad (2.21)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_{GL}} \left(1 + 0,15 Re_{GL}^{0,687}\right) + \frac{0,42}{(1 + 42500 Re_{GL}^{-1,16})} \quad (2.22)$$

É importante observar que a velocidade relativa média $\bar{u}_r$ não é a diferença entre as velocidades médias das fases ($\bar{u}_r \neq u_r \equiv u_G - u_L$), e deve ser estimada com base na formulação *drift-flux* proposta por ISHII & MISHIMA^[39]. A diferença entre essas duas velocidades relativas pode ser grande. Os trabalhos de ZUBER & FINDLAY^[49] e ISHII M.^[50] discorrem a respeito. O termo de força de massa virtual é representado por:

$$M_{li}^V = c_{vm} \rho_L \alpha_G \left\{ \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_l \frac{\partial u_G}{\partial x} - u_G \frac{\partial u_L}{\partial x} + (\kappa - 1) u_r \frac{\partial u_r}{\partial x} \right\} \quad (2.23)$$

O parâmetro κ assume os seguintes valores, de acordo com a **Tabela 2.4**:

Tabela 2.4 – Valores de κ

Condição	κ	Referência
$\alpha_G \rightarrow 0$	2	ISHII M. ^[50]
$\alpha_G \rightarrow 1$	0	ISHII M. ^[50]
Não há	1	TISELJ & PETELIN ^[51]

TOUMI & KUMBARO^[52] sugerem a expressão abaixo Eq. (2.24) para o termo de força de massa virtual:

$$M_{li}^V = c_{vm} \rho_M \alpha_L \alpha_G \left[\left(\frac{\partial u_G}{\partial t} + u_L \frac{\partial u_G}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial u_L}{\partial t} + u_G \frac{\partial u_L}{\partial x} \right) \right] \quad (2.24)$$

onde, $\rho_M = \rho_L \alpha_L + \rho_G \alpha_G$.

O valor da constante c_{vm} pode ser calculado para cada padrão de escoamento de acordo com a **Tabela 2.5**.

Tabela 2.5 – Valores e correlações para c_{vm}

Padrão de fluxo	Equação	Referência	Número	Obs.
Estratificado	$c_{vm} \rightarrow 0$	DREW & PASSMAN ^[30]	(2.25a)	
Bolhas	$c_{vm} = 0,5$	DREW & PASSMAN ^[30]	(2.25b)	
Golfadas	$3,3 < c_{vm} < 5$	ISHII & MISHIMA ^[39]	(2.25c)	(1)
Agitado Turbulento	$c_{vm} > 0,5$	ISHII & MISHIMA ^[39]	(2.25d)	
Qualquer padrão disperso	$c_{vm} = \frac{1}{2} \left(\frac{1+2\alpha_d}{1-\alpha_d} \right)$	ZUBER ^[53]	(2.26)	(2)
Qualquer padrão disperso	$c_{vm} \geq \sqrt{4c(1-c)}$	TOUMI & KUMBARO ^[52]	(2.27)	(3)

1. Depende da forma da golfada;
2. α_d é a fração de volume da fase descontínua;

3.
$$C = \frac{\rho_G \alpha_G}{\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L}$$

Para garantir a hiperbolicidade do código PDE-2, definido em TISELJ & PETELIN^[51], pode-se introduzir uma pequena modificação do coeficiente de massa virtual $c_{vm-RELAP5}$ (eqs. 2.28a e 2.28b) para a forma corrigida $c_{vm-PDE-2}$, (eqs. 2.29a e 2.29b) ambos definidos na mesma referência:

$$c_{vm-RELAP5} = \frac{1-2\alpha_G}{2-2\alpha_G}, \quad \alpha_G < 0,5 \quad (2.28a)$$

$$c_{vm-RELAP5} = \frac{3-2\alpha_G}{2}, \quad \alpha_G \geq 0,5 \quad (2.28b)$$

$$c_{vm-PDE2} = \frac{1-2\alpha_G}{2-2\alpha_G}, \quad \alpha_G < 0,5 \quad (2.29a)$$

$$c_{vm-PDE2} = \sqrt{\left[\frac{3-2\alpha_G}{2} \right]^2 - \frac{(\alpha_G-1)(2\alpha_G-1)}{(1+\alpha_G\rho_G/\rho_L-\alpha_G)^2}}, \quad \alpha_G \geq 0,5 \quad (2.29b)$$

2.4.9.3. Fator de atrito interfacial

As dissertações de ESPEDAL^[54] e SHAHA^[11] trazem uma completa revisão das correlações existentes na literatura para fatores de atrito interfaciais. As duas mais usadas são descritas nas próximas seções. A **Tabela 2.6** traz um resumo das correlações presentes em tais textos:

Tabela 2.6 – Correlações para f_l

Equação	Referência	Núm.	Obs.
$f_l = f_G$	TAITEL & DUCKLER ^[55]	(2.30)	
$f_l = f_G$	ANDRITSOS & HANRATTY ^[56]	(2.31)	$J_G < 5 \text{ m/s}$
$f_l = f_G \left[1 + 15 \left(\frac{J_G}{5} - 1 \right) \sqrt{\left(\frac{h_L}{D} \right)} \right]$	ANDRITSOS & HANRATTY ^[56]	(2.32)	$J_G \geq 5 \text{ m/s}$

onde J_G é a velocidade superficial do gás, definida como (Eq. 2.33):

$$J_G = \alpha_G \cdot u_G \quad (2.33)$$

2.4.9.4. Tensão cisalhante na parede

O termo de tensão cisalhante na parede representa a força de atrito por unidade de área exercida pela fase sobre a parede, por unidade de comprimento. Uma compilação das equações constitutivas para esta força pode ser encontrada em LEVY^[57]. Uma expressão para o cálculo desta força, baseada na hipótese de escoamento plenamente desenvolvido em regime estacionário, é (Eq. 2.34):

$$M_{kw} = -\frac{\tau_k S_k}{A} \quad (2.34)$$

onde S_k é o perímetro molhado pela fase k e τ_k é a tensão cisalhante na parede de contato da fase k , sendo normalmente expressa pela seguinte expressão constitutiva, em função do fator de atrito de Moody para a fase k , f_k (Eq. 2.35):

$$\tau_k = \frac{1}{2} f_k \rho_k u_k |u_k| \quad (2.35)$$

2.4.9.5. Fatores de atrito na parede

Existem diversas correlações para fator de atrito na parede para escoamento monofásico de gás ou líquido presentes na literatura, e. g., ZIGRANG & SYLVESTER^[58]. É comum modelar o fator de atrito de escoamento bifásico usando as correlações monofásicas. Uma das propostas encontradas explicitamente para escoamento bifásico é a modificação da correlação de Blasius, proposta por TAITEL & DUCKLER^[55], que pode ser descrita na forma:

$$f_k = \max \left[\frac{16}{Re_k}, \frac{0,046}{Re_k^{0,2}} \right] \quad (2.36)$$

onde Re_k é o número de Reynolds para a fase k , definido como (Eq. 2.37a):

$$Re_k = \frac{\rho_k D_{hk} |u_k|}{\mu_k} \quad (2.37a)$$

A grandeza D_{hk} representa o diâmetro hidráulico equivalente para o escoamento na fase k .

$$D_{hk} = 2 \left(\frac{A \alpha_k}{\pi} \right)^{1/2} = D_i \sqrt{\alpha_k} \quad (2.37b)$$

No caso de escoamento de líquidos, duas correlações adicionais para o fator de atrito de Moody foram testadas e podem ser citadas, quais sejam, HAND^[59], e SRICHA^[60], onde ambas podem ser expressas na forma d Eq. (2.38):

$$f_L = c_1 \left(R_L^2 Re_L \frac{D_i}{D_{hL}} \right)^{c_2} \quad (2.38)$$

As constantes c_1 e c_2 para a correlação da Eq. (2.38) podem ser encontradas na **Tabela 2.7**.

Tabela 2.7 - Constantes para a Eq. (2.38)

Referência	c_1	c_2
HAND ^[59]	0,0262	- 0,139
SRICHA ^[60]	0,762	- 0,562

2.5. Formulação adotada

2.5.1. Introdução

O modelo SPM-4, sugerido na tese de doutorado de OMGBA-ESSAMA^[4] será empregado neste trabalho. Tal modelo parte das equações de conservação 2.3 e 2.4 e de fechamento 2.5 a 2.8, todas descritas na seção 2.4. Emprega em adição um conjunto de equações constitutivas descritas nas seções 2.4.8 e 2.4.9 e assume que apenas a fase gás é compressível, embora se tenha a noção que a fase líquida também o é, especialmente para o condensado presente em escoamentos confinados bifásicos de fase predominante gás. A compressibilidade da fase gás é determinada através do uso de uma equação de estado.

2.5.2. Conceituação e hipóteses simplificadoras

Face ao exposto na seção anterior fez-se necessária uma modelagem de dois fluidos mais genérica, usando quatro equações diferenciais. O nome dado a esse modelo, *Single Pressure Model* (SPM-4), ou simplesmente modelo SPM-4, pressupõe

a existência de uma única pressão na interface para as fases gás e líquida, ausência de transferência de massa entre as fases, e a solução de quatro equações de balanço, uma de massa e outra de quantidade de movimento para cada fase.

2.5.3. Equação da massa (continuidade)

Considerando o novo conjunto de hipóteses, a equação de conservação de massa pode mais uma vez ser escrita como a soma das equações da massa para as fases líquida e gás (conjunto de eqs. 2.39):

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G u_G)}{\partial x} = 0 \quad (2.39a)$$

$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_L \alpha_L u_L)}{\partial x} = 0 \quad (2.39b)$$

2.5.4. Equação de *momentum* (quantidade de movimento)

O mesmo pode ser feito para o balanço de quantidade de movimento, agora com o aparecimento de novos termos (conjunto de eqs. 2.40):

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G u_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G u_G^2)}{\partial x} = -\alpha_G \frac{\partial P}{\partial x} + B_{fG} + T_I + T_{Gw} \quad (2.40a)$$

$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L u_L)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_L \alpha_L u_L^2)}{\partial x} = -\alpha_L \frac{\partial P}{\partial x} - P_c \frac{\partial \alpha_L}{\partial x} + B_{fL} - T_I + T_{Lw} \quad (2.40b)$$

onde B_{fk} diz respeito às forças de corpo para a fase k ($k = G, L$), definidas por:

$$B_{fk} = -\rho_k \alpha_k g \sin \beta \quad (2.41)$$

2.5.5. Termo para correção da pressão na fase líquida

A grandeza P_c é uma correção na pressão incluída nas equações de quantidade de movimento, Eq. (2.40). Por comparação com a equação mais genérica de quantidade de movimento, Eq. (2.4), tem-se que:

$$P_c = \Delta P_{ki} \quad (2.42a)$$

Entretanto, a modelagem de OMGBA-ESSAMA^[4] a usa para corrigir distorções de pressão devidas à propagação de ondas de pressão em escoamento estratificado, além do efeito da pressão hidrostática. A correção proposta em BONIZZI ET AL.^[38], pode ser escrita como:

$$P_c = \rho_L \alpha_L g \cos \beta \frac{\partial h_L}{\partial \alpha_L} \Rightarrow P_c \frac{\partial \alpha_L}{\partial x} = \rho_L \alpha_L g \cos \beta \frac{\partial h_L}{\partial x} \quad (2.42b)$$

A proposta deste trabalho é uma abordagem isotérmica. No entanto, apenas a título de completude a abordagem pode ser generalizada para o escoamento com troca térmica através da inclusão de uma terceira equação de balanço, qual seja, a equação da energia para a mistura bifásica, da seguinte forma (ABBASPOUR ET AL.^[48]):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial x} (\alpha_G \rho_G C_{P,G} u_G + \alpha_L \rho_L C_{P,L} u_L) + \frac{\partial T}{\partial t} (\alpha_G \rho_G C_{P,G} + \alpha_L \rho_L C_{P,L}) + \\ & \frac{\partial P}{\partial x} \left[\alpha_G u_G \left\{ \frac{T}{\rho_G} \left(\frac{\partial \rho_G}{\partial T} \right)_P \right\} + \alpha_L u_L \left\{ \frac{T}{\rho_L} \left(\frac{\partial \rho_L}{\partial T} \right)_P \right\} \right] + \\ & \frac{\partial P}{\partial t} \left[\alpha_G \left\{ \frac{T}{\rho_G} \left(\frac{\partial \rho_G}{\partial T} \right)_P \right\} + \alpha_L \left\{ \frac{T}{\rho_L} \left(\frac{\partial \rho_L}{\partial T} \right)_P \right\} - 1 \right] + \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial u_G}{\partial x} (\alpha_G \rho_G u_G^2) + \frac{\partial u_G}{\partial t} (\alpha_G \rho_G u_G) + \frac{\partial u_L}{\partial x} (\alpha_L \rho_L u_L^2) + \frac{\partial u_L}{\partial t} (\alpha_L \rho_L u_L) =$$

$$\frac{\Omega}{A} - (\alpha_G \rho_G u_G + \alpha_L \rho_L u_L) g \sin \beta - \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_G \rho_G) + \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_G \rho_G u_G) \right] \left(h_G - h_L + \frac{u_G^2}{2} - \frac{u_L^2}{2} \right)$$

onde T é a temperatura absoluta, $C_{P,G}$ e $C_{P,L}$ são respectivamente os calores específicos de ensaios isobáricos do gás e do líquido, h_G e h_L as entalpias específicas e Ω o fluxo de calor radial entre a tubulação e sua circunvizinhança (CHACZYKOWSKI^[61]). A variação da massa específica tanto para a fase gás quanto para a fase líquida se dá por:

$$\left(\frac{\partial \rho_k}{\partial T} \right)_P = - \frac{\rho_k}{T} \left[1 + \frac{T}{Z_k} \left(\frac{\partial Z_k}{\partial T} \right)_P \right] \quad (2.44)$$

onde Z_k é o fator de compressibilidade, seja da fase gás ou da fase líquida. Tanto Z_k , quanto sua derivada parcial em relação à temperatura, fixada a pressão, são obtidos através de uma equação de estados, tal como PENG ROBINSON^[13], SOAVE^[14] ou equação considerada mais acurada pela indústria, a BWRS STARLING^[15]. No específico caso de se considerar a fase líquida incompressível, seu fator de

compressibilidade será unitário, e a derivada da massa específica para esta fase será nula.

2.5.6. Relações geométricas relevantes ao problema

Para nomenclatura e ilustrações referentes às relações geométricas aqui definidas, vide Figura 2.2 e 2.3.

2.5.6.1. *Fração de líquido em função do nível de líquido e do diâmetro do duto*

$$\alpha_L = \left(\frac{1}{\pi} \right) \left\{ \pi - \cos^{-1}[X] + X \sqrt{1 - X^2} \right\} \quad (2.45)$$

$$X = 2 \frac{h_L}{D_i} - 1 \quad (2.46)$$

2.5.6.2. *Perímetro molhado em função do nível de líquido e do diâmetro do duto*

$$S_L = D_i \left[\pi - \cos^{-1} \left(2 \frac{h_L}{D_i} - 1 \right) \right] \quad (2.47)$$

$$S_G = \pi D_i - S_L \quad (2.48)$$

2.5.6.3. *Perímetro de interface em função do nível de líquido e do diâmetro do duto*

$$S_I = D_i \sqrt{1 - \left(2 \frac{h_L}{D_i} - 1 \right)^2} \quad (2.49)$$

2.5.7. Problemas de valor de contorno e inicial (PVC e PVI – Eqs. governantes)

O conjunto de Eqs. (2.50) resume o problema de valor de contorno a ser resolvido como solução para o escoamento dentro do gasoduto, numa abordagem isotérmica, i. e., desconsiderando a equação da energia:

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G u_G)}{\partial x} = 0 \quad (2.50a)$$

$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_L \alpha_L u_L)}{\partial x} = 0 \quad (2.50b)$$

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G u_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G u_G^2)}{\partial x} = -\alpha_G \frac{\partial P}{\partial x} + B_{fG} + M_I + M_{Gw} \quad (2.51a)$$

$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L u_L)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_L \alpha_L u_L^2)}{\partial x} = -\alpha_L \frac{\partial P}{\partial x} - P_c \frac{\partial \alpha_L}{\partial x} + B_{fL} - M_I + M_{Lw} \quad (2.51b)$$

$$B_{fG} = -\rho_G \alpha_G g \sin \beta \quad (2.52a)$$

$$B_{fL} = -\rho_L \alpha_L g \sin \beta \quad (2.52b)$$

$$P_c \frac{\partial \alpha_L}{\partial x} = \rho_L \alpha_L g (\cos \beta) \frac{\partial h_L}{\partial x} \quad (2.53)$$

2.5.7.1. Incógnitas

$$u_G, u_L, \alpha_G, P$$

2.5.7.2. Variáveis conhecidas

$$A, f_G, f_L, f_I, \rho_G, \rho_L$$

2.5.7.3. Condições de contorno

$$\text{Entrada: } u_G, u_L, \alpha_G, \alpha_L$$

$$\text{Saída: } P$$

2.5.7.4. Condições iniciais

No instante $t = 0$, os valores para as variáveis $u_G, u_L, \alpha_G, \alpha_L, P$ são prescritos em todo o domínio. Tenderão para o valor estabilizado caso não haja imposição de alterações transientes.

2.5.7.5. Considerações acerca do PVC com a equação da energia

Ao usar a equação da energia tem-se o mesmo PVC acrescido de uma incógnita a mais, a temperatura, e uma equação a mais, a própria equação da energia. Todas as variáveis adicionais introduzidas, tais como os calores e as entalpias específicas dos fluidos em cada fase, ou as propriedades das circunvizinhanças do duto tais como condutividade térmica, do duto, de seus revestimentos, e do solo, são prescritas ou funções de estado (P e T), onde P já constava no PVC isotérmico.

3. Métodos numéricos

3.1. Introdução

Os esforços recentes no domínio de métodos numéricos para a solução dos sistemas de equações diferenciais que governam os fenômenos de escoamento de fluidos se deram na área denominada dinâmica dos fluidos computacional ou termofluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD). Assim, esforços foram empreendidos nos últimos vinte anos na direção de melhorar vários aspectos, a saber: a exatidão das formulações numéricas, através de modelagens de ordens superiores, e. g. HARTEN^[62], YEE^[63]; os algoritmos implementados; as conceituações físicas dos núcleos de solução como um todo (PATANKAR^[64]); a utilização de técnicas para refinamento de malhas de discretização; e o emprego de malhas heterogêneas, ou seja, do uso de algoritmos que refinam a malha de forma adaptativa (AMR – “Adaptive Mesh Refinement”) tais como os trabalhos de NEEMAN^[65] e DE ZEEUW^[66] para reduzir o custo computacional das simulações numéricas. Esforços no sentido da paralelização dos códigos computacionais podem igualmente ser citados DONGARRA^[67]. No entanto, a literatura é abundante apenas no domínio monofásico, o qual evoluiu consideravelmente em termos de exatidão, robustez e eficiência de processamento. O domínio bifásico ou multifásico, além de oferecer uma documentação inferior em número e, muitas vezes em resultados, acresce dificuldades outras (que talvez expliquem os resultados inferiores), tais como as dificuldades numéricas de formulações por vezes não conservativas e de hiperbolicidade não assegurada em determinadas faixas do domínio de interesse da solução. Outra questão que definiu os desdobramentos da evolução da modelagem bifásica foi o fato destas serem muitas vezes proprietárias de consórcios de corporações petrolíferas. Este fato pode ter tornado o seu desenvolvimento isolado e lento.

Em meio a tais dificuldades, alguns métodos numéricos dedicados ao escoamento bifásico surgiram e podem ser divididos em dois grupos com base no tratamento do termo de pressão: (i) algoritmos para soluções implícitas de pressão e (ii) os algoritmos que usam a pressão explicitamente. No primeiro grupo, pode-se citar o “*Inter Phase Split Algorithm*” (IPSA) e suas variações apresentadas por SPALDING^{[68], [69]}, bem como o “*Implicit Multi Field (Algorithms)*” (IMF) idealizado e proposto por HARLOW & AMSDE^[70], STEWART^[71] e MAHAFFY^[72], e revisitado por DARWISH & MOUKALLED^[73], no desenvolvimento do código TRIUMPH do Imperial College (ISSA & KEMPF^[74]). Entretanto os métodos do primeiro grupo são praticamente particularizados para cada caso, ou seja, há dificuldades em sua generalização, o que provocou o desenvolvimento dos métodos do segundo grupo de algoritmos descritos em TOUMI^[52], TISELJ & PETELIN^[51], FAILLE & HEITZE^[24] e ROMATE^[75], os quais envolvem, dentre outras técnicas, a captação de ondas de choque.

3.2. Formulação geral das equações

A seção 2.2 apresentou a modelagem SPM-4, cuja solução requer uma abordagem dita não conservativa, expressa de acordo com a Eq. (3.1), em sua forma matricial:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} + \mathbf{S} \quad (3.1)$$

onde $\mathbf{Q}$ é um campo vetorial de variáveis conservativas, tais como massa e quantidade de movimento. Os termos $\mathbf{F}$ e $\mathbf{S}$ são também vetores e funções algébricas apenas de $\mathbf{Q}$, e caracterizam respectivamente os fluxos ($\mathbf{F}$) e termos fonte ($\mathbf{S}$). O termo $\mathbf{H} \partial \mathbf{Q} / \partial x$, um produto matriz-vetor, na Eq. (3.1) representa os termos não conservativos. Ao aplicar a Eq. (3.1) às Eqs. (2.46) a (2.48) têm-se a representação matricial (Eqs. 3.2, 3.3 e 3.4):

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho_G \alpha_G \\ \rho_L \alpha_L \\ \rho_G \alpha_G u_G \\ \rho_L \alpha_L u_L \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho_G \alpha_G u_G \\ \rho_L \alpha_L u_L \\ \rho_G \alpha_G u_G^2 + \alpha_G P \\ \rho_L \alpha_L u_L^2 + \alpha_L P \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P/\rho_L & 0 & 0 \\ 0 & (P - P_c)/\rho_L & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{fG} + M_I + M_{Gw} \\ B_{fL} - M_I + M_{Lw} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.3. Métodos para sistemas conservativos

Para a solução do sistema não conservativo é preciso primeiramente resolver a parte conservativa da Eq. (3.1), qual seja:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S} \quad (3.6)$$

onde a matriz $\mathbf{H}$ da Eq. (3.1) é nula.

A abordagem conservativa é a mesma usada na maior parte dos pacotes CFD, qual seja, diferenças finitas, em abordagens explícitas. Diversos livros-texto de métodos numéricos as trazem com riqueza de detalhes, dentre eles HIRSCH^{[78],[76]}, FLETCHER^[77], LEVEQUE^[80], TORO^[81] e LANEY^[82].

A técnica consiste em aproximar as derivadas parciais das equações de balanço através de quocientes de diferenças algébricas, o que resulta num sistema de equações algébricas para a variável dependente em cada ponto da malha. Para o sistema conservativo proposto pela Eq. (3.6) a discretização por diferenças finitas pode ser expressa por:

$$\mathbf{Q}_j^{n+1} = \mathbf{Q}_j^n - \gamma [\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2} - \hat{\mathbf{F}}_{j-1/2}] + \mathbf{S}_j \Delta t \quad (3.7)$$

onde Δt é o passo de tempo, $\gamma = \Delta t / \Delta x$ (sendo Δx o tamanho da discretização espacial da malha no ponto) e $\hat{\mathbf{F}}$ é o fluxo numérico, cuja expressão define a abordagem numérica. Nesta notação, j representa a célula de discretização no espaço e n à equivalente no tempo.

Duas abordagens numéricas para o termo de fluxo em sistemas conservativos são apresentadas dentre as diversas existentes na literatura: (i) a primeira representada pelos métodos de Friedrichs, Ritchmyer e FORCE, presentes em TORO^[81]; e a segunda (ii) FCT (*Flux Corrected Transport*) preconizado por BORIS & BOOK^[83]. A razão da escolha se deve ao caráter genérico dessas abordagens no que

diz respeito a sua extensão para sistemas não lineares sem a necessidade do uso de soluções, aproximadas ou não, do problema de Riemann ou da bipartição de vetores de fluxo citada em TORO^[81], caso o problema seja bi ou tridimensional. Na sequência são descritos os principais métodos numéricos encontrados na literatura para a solução dos sistemas conservativos representados pela Eq. (3.6), bem como na sequência os métodos para sistemas não conservativos.

3.3.1. Ritchmyer

O método de Ritchmyer (também conhecido na literatura como método de Lax Wendroff de dois passos) é caracterizado por um esquema de segunda ordem no espaço descrito em HIRSCH^[76]. Os vetores de estado e o termo de fluxo são dados pelas Eqs. (3.8) a (3.10):

$$\mathbf{Q}_{j+1/2}^n = \frac{1}{2}(\mathbf{Q}_{j+1}^n + \mathbf{Q}_j^n) \quad (3.8)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}_{j+1/2} = \mathbf{Q}_{j+1/2}^n - \frac{\gamma}{2}[\mathbf{F}(\mathbf{Q}_{j+1}^n) - \mathbf{F}(\mathbf{Q}_j^n)] - \frac{\Delta t}{2}\mathbf{S}(\mathbf{Q}_{j+1/2}^n) \quad (3.9)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2}^{RI} = \frac{1}{2}[\mathbf{F}(\bar{\mathbf{Q}}_{j+1/2}^n)] \quad (3.10)$$

onde o sobrescrito RI denota Ritchmyer.

3.3.2. FCT (Flux Corrected Transport)

O método FCT (*Flux Corrected Transport*) é um esquema central de segunda ordem no espaço, baseado na solução dos termos conservativos (Q) vindos do método de Ritchmyer, apoiado nas referências BORIS & BOOK^[83] e BOOK ET AL.^[85].

Considere Q^n como sendo a solução do passo anterior de tempo e $\tilde{Q}$ a nova solução atualizada, gerada pelo esquema de segunda ordem de Ritchmyer Eq. (3.8). Assim, o algoritmo FCT consiste em cinco passos, e pode ser encontrado no segundo volume de FLETCHER^[77]. Os termos de fluxo e os vetores de estado são dados pelas Eqs. (3.11) a (3.16):

- Primeiro passo: Geração dos fluxos difusivos ($\mathbf{F}_{j+1/2}^d$):

$$\mathbf{F}_{j+1/2}^d = \mathbf{v}_{j+1/2}(\mathbf{Q}_{j+1}^n - \mathbf{Q}_j^n) \quad (3.11)$$

onde $\nu_{j+1/2}$ é o coeficiente de difusão e tem o valor constante de 0,125 segundo OMGBA-ESSAMA^[4]. Esse valor, no entanto, pode ser melhorado por tentativa e erro para cada simulação (i. e., pode ser “sintonizado”).

- Segundo passo: Difusão da solução ($Q_{j+1/2}^d$ - Eq. 3.12):

$$Q_{j+1/2}^d = \tilde{Q}_j + (\mathbf{F}_{j+1/2}^n - \mathbf{F}_{j-1/2}^n) \quad (3.12)$$

- Terceiro passo: Geração dos fluxos anti-difusivos ($F_{j+1/2}^{ad}$ - Eq. 3.13):

$$F_{j+1/2}^{ad} = \mu_{j+1/2} (\tilde{Q}_{j+1} - \tilde{Q}_j) \quad (3.13)$$

onde $\mu_{j+1/2}$ é o coeficiente de anti-difusão e tem igualmente o valor constante de 0,125 segundo OMGBA-ESSAMA^[4]. Aplica-se aqui o mesmo comentário realizado para o coeficiente de difusão.

- Quarto passo: Limitação dos fluxos anti-difusivos ($F_{j+1/2}^{cad}$ - Eqs. 3.14 e 3.15):

$$S = \text{Sign}(F_{j+1/2}^{ad}) \quad (3.14)$$

$$F_{j+1/2}^{cad} = \text{Max}\left[0, \text{Min}\left[S(\tilde{Q}_{j+1} - Q_j^d), F_{j+1/2}^{ad}, S(\tilde{Q}_{j+2} - Q_{j+1}^d)\right]\right] \quad (3.15)$$

- Quinto passo: Geração do fluxo dentro da célula de discretização ($\hat{F}_{j+1/2}^{FCT}$):

$$\hat{F}_{j+1/2}^{FCT} = F_{j+1/2}^{cad} - F_{j+1/2}^d \quad (3.16)$$

3.3.3. Lax-Friedrichs

O método de Lax-Friedrichs é um esquema central de primeira ordem descrito em HIRSCH^[76] e TORO^[81]. O termo de fluxo é dado pela Eq. (3.17) abaixo:

$$\hat{F}_{j+1/2}^{LF} = \frac{1}{2} \left[\mathbf{F}(Q_j^n) + \mathbf{F}(Q_{j+1}^n) - \frac{1}{\gamma} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) \right] \quad (3.17)$$

3.3.4. FORCE (First Order Centred Scheme)

O método FORCE (*First Ordered Centered Scheme* – Esquema Central de Primeira Ordem) é, como o nome sugere, um método de primeira ordem no espaço e no tempo, baseado em TORO^[81]. O termo de fluxo é dado pela Eq. (3.18):

$$\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2}^{FORCE} = \frac{1}{2} [\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2}^{LF} + \hat{\mathbf{F}}_{j+1/2}^{RI}] \quad (3.18)$$

onde o sobrescrito LF denota o esquema de Lax-Friedrichs descrito na seção anterior.

3.3.5. Rusanov

A forma geral da abordagem de fluxo de primeira ordem de Rusanov para sistemas não lineares unidimensionais pode ser expressa como:

$$\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2}^{RUS} = \frac{1}{2} [\mathbf{F}(\mathbf{Q}_j^n) + \mathbf{F}(\mathbf{Q}_{j+1}^n) - \lambda_{j+1/2} (\mathbf{Q}_{j+1}^n - \mathbf{Q}_j^n)] \quad (3.19)$$

onde $\lambda_{j+1/2}$ é o limite superior da velocidade característica (de onda de pressão que trafega pelo mistura) em cada célula de discretização, sendo calculada por:

$$\lambda_{j+1/2} = \max \left\{ \max(\lambda_j^k), \max(\lambda_{j+1}^k) \right\}, k=1, n_{eq} \quad (3.20)$$

onde n_{eq} é o número total de equações diferenciais no modelo, i. e. quatro para o modelo SPM-4. Um valor típico desse limite superior encontra-se no intervalo entre 300 e 450 m/s.

3.3.6. TVD Lax-Friedrichs

O método é descrito em YEE^[63], o qual propõe uma abordagem TVD (“*Total Variation Diminishing*” – uma variação dentro dos métodos das diferenças finitas) empregado em conjunto com o trabalho MUSCL (*Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws*) de VAN LEER^[86] para limitar a excessiva difusão numérica do método.

O esquema numérico resultante é um pouco mais “dissipativo” que aquele encontrado na abordagem *upwind* de primeira ordem. Variações são também encontradas na literatura, tais como os trabalhos de BARMIN ET AL.^[89], que traz uma abordagem simplificada, bem como o de TÓTH & ODSTRČIL^[90], onde:

$$\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2}^{TVDLF} = \frac{1}{2} [\mathbf{F}(\mathbf{Q}_{j+1/2}^L) + \mathbf{F}(\mathbf{Q}_{j+1/2}^R)] - \frac{1}{2 \cdot \gamma} \Phi_{j+1/2}^{LR} \quad (3.21)$$

São definidos “vetores de estado” para o lado esquerdo (L) e direito (R), representados respectivamente por $\mathbf{Q}^L$ e $\mathbf{Q}^R$, os quais são formados a partir de um estado intermediário no tempo $\mathbf{Q}^{n+1/2}$ e das diferenças limitadas $\Delta \bar{\mathbf{Q}}^n$ definidas como na Eq. (3.22):

$$\mathbf{Q}_j^L = \mathbf{Q}_j^{n+1/2} + \frac{1}{2}\Delta\bar{\mathbf{Q}}_j^n, \quad \mathbf{Q}_{j+1/2}^R = \mathbf{Q}_j^{n+1/2} - \frac{1}{2}\Delta\bar{\mathbf{Q}}_j^n \quad (3.22)$$

O estado conhecido como predictor de valor de passo, é dado pela Eq. (3.23):

$$\mathbf{Q}_j^{n+1/2} = \mathbf{Q}_j^n - \frac{\gamma}{2} \left[\mathbf{F}(\mathbf{Q}_j^n + \frac{1}{2}\Delta\bar{\mathbf{Q}}_j^n) - \mathbf{F}(\mathbf{Q}_j^n - \frac{1}{2}\Delta\bar{\mathbf{Q}}_j^n) \right] \quad (3.23)$$

e o limitador de dissipação Φ^{LR} , presente na Eq. (3.21) é definido como:

$$\Phi^{LR} = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \lambda_{j+1/2}^{\max} \cdot (\mathbf{Q}^R - \mathbf{Q}^L) \quad (3.24a)$$

onde

$$\lambda_{j+1/2}^{\max} = \max \left| \lambda_k \left(\frac{\mathbf{Q}_L + \mathbf{Q}_R}{2} \right) \right|, \quad k=1, n_{eq} \quad (3.24b)$$

Outras expressões de funções limitadoras são encontradas em YEE^[63].

3.4. Métodos para sistemas não conservativos

O sistema não conservativo de equações, na forma da Eq. (3.1), envolve termos de fluxo conservativos que podem ser resolvidos por esquemas explícitos clássicos de fluxo anteriormente descritos, acrescidos de um termo não conservativo $\mathbf{H}\partial\mathbf{Q}/\partial x$. Neste caso, a expressão de solução (i. e., sua discretização) usada para os métodos numéricos é da forma:

$$\mathbf{Q}_j^{n+1} = \mathbf{Q}_j^n - \underbrace{\gamma \left[\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2} - \hat{\mathbf{F}}_{j-1/2} \right]}_{NFT} + \underbrace{\Delta t \left(\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} \right)_j}_{NCT} + \Delta t \mathbf{S}_j \quad (3.25)$$

O termo de fluxo numérico (NFT – *Numerical Flux Term*), o termo não conservativo (NCT – *Non Conservative Term*) e o termo fonte $\mathbf{S}_j$, presentes nas expressões 3.1 e 3.25, podem ser calculados nos passos de tempo velho ou novo (n ou $n+1$) o que leva a solução a um método numérico explícito ou implícito respectivamente. Os métodos sugeridos neste trabalho são explícitos, uma vez que são mais simples de serem programados. Discussões sobre as principais vantagens e desvantagens de cada uma dessas abordagens são encontradas em YEE^[63] e WENDT^[87].

Conforme comentado, a formulação conservativa apresentada na Eq. (3.6), bem como sua discretização na Eq. (3.7), estão completamente incorporadas em suas respectivas expressões não conservativas na Eqs. (3.1) e (3.25), bastando para tal

tornar a matriz de coeficientes $\mathbf{H}$ identicamente nula. Assim a formulação e discretização não conservativas foram usadas para construir o único algoritmo de solução, por serem mais genéricas.

Desta forma, para avançar o vetor $\mathbf{Q}$ no tempo, num método numérico explícito, para todos os métodos aqui explicitados, a seguinte expressão será usada:

$$\mathbf{Q}_j^{n+1} = \mathbf{Q}_j^n - \Delta \mathbf{Q}_j \quad (3.26)$$

$$\Delta \mathbf{Q}_j = -\gamma \underbrace{\left[\hat{\mathbf{F}}_{j+1/2} - \hat{\mathbf{F}}_{j-1/2} \right]}_{NFT}^n + \Delta t \underbrace{\left(\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} \right)}_{NCT}^j + \mathbf{S}_n^j \Delta t \quad (3.27)$$

Dois tipos de discretização espacial podem ser empregados para termos não conservativos e seguem descritos na sequência.

3.4.1. Esquema Minmod (COQUEL ET AL.^[88])

Sua versão de primeira ordem é expressa por (Eq. 3.28):

$$\left(\mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} \right)_j^n = \frac{\mathbf{H}_j^n}{\Delta x} \text{Minmod}(\mathbf{Q}_{j+1}^n - \mathbf{Q}_j^n, \mathbf{Q}_j^n - \mathbf{Q}_{j-1}^n) \quad (3.28)$$

onde a função Minmod é definida por (Eq. 3.29):

$$\text{Minmod}(x, y) = \frac{1}{2} (\text{sign}(x) + \text{sign}(y)) \cdot \min(|x|, |y|) \quad (3.29)$$

Essa versão de primeira ordem mostrou-se por demais difusiva. Assim foi necessária a utilização de uma discretização de segunda ordem, proposta por HARTEN^[62] (Eq. 3.30):

$$\left(\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} \right)_j^n = \frac{\mathbf{H}_j^n}{\Delta x} \text{Minmod} \left[2(\mathbf{Q}_{j+1}^n - \mathbf{Q}_j^n), \frac{1}{2}(\mathbf{Q}_{j+1}^n - \mathbf{Q}_{j-1}^n), 2(\mathbf{Q}_j^n - \mathbf{Q}_{j-1}^n) \right] \quad (3.30)$$

onde a função Minmod ganha uma nova forma (Eq. 3.31):

$$\text{Minmod}(x, y) = \begin{cases} \min(|x|, |y|, |z|) & \text{se } \text{sign}(x) = \text{sign}(y) = \text{sign}(z) \\ 0 & \text{do contrário} \end{cases} \quad (3.31)$$

3.4.2. Esquema Central

A discretização central simplificada pode igualmente ser implementada para o termo não conservativo, numa abordagem de segunda ordem para espaço conforme segue abaixo na Eq. (3.32):

$$\left(\mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} \right)_j = \mathbf{H}_j \frac{\mathbf{Q}_{j+1} - \mathbf{Q}_{j-1}}{2 \cdot \Delta x} \quad (3.32)$$

Ressalva-se que esta discretização normalmente gera oscilações numéricas, o que a torna menos adequada que os esquemas de Rusanov-Minmod, ou TVDLF - Minmod para resolver a formulação dentro da modelagem SPM-4.

3.5. Restrições nos métodos numéricos – passo de tempo

De uma maneira geral o passo de tempo Δt é escolhido com base na condição CFL (COURANT ET AL.^[91]), caso seja adotada uma formulação de solução explícita. Nessa condição Δt é dado pela Eq. (3.33):

$$\Delta t = \text{CFL} \frac{\Delta x}{\lambda_{\max}^n} \quad (3.33)$$

onde o valor numérico de CFL é positivo e inferior à unidade. Quanto mais próximo da unidade, mais eficiente o esquema numérico é em termos de estabilidade. O parâmetro numérico $\lambda_{\max}^n$ é a maior velocidade de propagação da onda de pressão, em valor absoluto, ao longo de todo o domínio espacial, na n -ésima discretização do domínio temporal.

O impacto da condição CFL nos escoamentos altamente transitórios é debatido em MAHGEREFTEH ET AL.^[92], demonstram haver um equilíbrio entre o tempo computacional requerido e a exatidão da solução buscada, dentre diversas soluções teoricamente estáveis.

Uma análise completa da hiperbolicidade da formulação SPM-4 é realizada em OMGBA-ESSAMA^[4], com base numa manipulação da Eq. (3.1) onde uma equação matricial característica para análise da hiperbolicidade é gerada. Lá está demonstrado que tal formulação é seguramente hiperbólica e estável para valores da velocidade relativa ($u_G - u_L$) ao redor de 5% do valor da velocidade sônica do gás. Essa condição impõe um intervalo prático à velocidade relativa ao longo do duto de 15 a 20 m/s, o que em casos extremos pode ser uma restrição, mormente na saída do duto.

Os trabalhos de TOUMI^[52], MASELLA^[21] e BAPTISTA^[93] demonstram que para a maioria dos escoamentos encontrados em dutos de óleo e gás, a velocidade relativa u_r , que caracteriza a velocidade de escorregamento entre as fases, é em geral da ordem de 1 a 10 m/s, enquanto a velocidade do som no gás é da ordem de 300 a 450 m/s dependendo da composição do gás.

4. Validações das modelagens

4.1. Introdução

O **capítulo 2** descreveu um conjunto de modelagens específicas para o uso em escoamento bifásico em gasodutos. O **capítulo 3** descreveu métodos numéricos adequados a tais modelagens. Este capítulo tem por objetivo validar a modelagem SPM-4 com métodos numéricos diversos de sorte a elencar aquele de melhor desempenho.

Muitas dessas modelagens foram incorporadas no código usado no trabalho de OMGBA-ESSAMA^[4], o qual serviu de base a este trabalho de doutoramento. Nesta fase o objetivo primordial foi levantar as principais potencialidades e limitações do código em termos da aplicação fim, elencando para tanto um caso padrão típicos de gasodutos bifásicos (benchmarks).

A partir daí deu-se início a um processo de verificação dos modelos até aqui apresentados, e incorporados em tal código. Tais casos foram inicialmente validados contra um simulador comercial de grande aceitação da indústria, i. e., o OLGA (SCANDPOWER^[97]).

4.2. A implementação da modelagem SPM-4

4.2.1. Apresentação

Dentre as diversas implementações presentes no código de OMGBA-ESSAMA^[4] há um esboço da modelagem SPM-4. Tal código foi desenvolvido pelo grupo de computação e matemática aplicada da universidade de Cranfield, sob o projeto multicliente TMF (*“Transient Multiphase Flow”*), do qual participam diversas companhias operadoras, dentre elas a PETROBRAS. Assim, sendo este trabalho de doutoramento patrocinado por esta empresa, teve-se acesso integral ao código fonte que foi analisado e modificado de acordo com os objetivos desta tese, sob acordo de sigilo. Tal código traz as principais modelagens, bem como métodos numéricos

descritos nos primeiros capítulos desse texto. Desse ponto em diante tal código, incluindo todas as alterações realizadas para adequá-lo a este trabalho, será chamado apenas de **código SPM-4**.

Trata-se de um código escrito em FORTRAN fazendo uso intensivo de recursos de orientação a objetos tais como herança, polimorfismo, tipos abstratos de dados, alocação dinâmica de memória e referências avançadas de tipos indexados (matrizes), requerendo dessa forma as versões mais atuais dos compiladores FORTRAN. A documentação não explicita o requisito mínimo da versão do compilador FORTRAN, mas após sua análise, concluiu-se que o padrão FORTRAN 2003 é o mais adequado.

Foi inicialmente desenvolvido para o ambiente Linux, de sorte que teve que ser portado para o ambiente Windows (no qual este trabalho se desenvolveu), o que exigiu a recriação de todos os elementos de compilação, e muitas adaptações do código no novo ambiente.

4.2.2. Limitações

A formulação SPM-4 presente em tal código apresenta uma série de limitações: (i) a impossibilidade da configuração de um perfil altimétrico; (ii) abordagem isotérmica; (iii) ausência de um modelo de acompanhamento de golfadas de líquido mais abrangente, que permita calcular os efeitos destes na pressão do escoamento, especialmente frente a golfadas de terreno; (iv) a ausência do termo de transferência de massa entre fases, o que não permite surgência de líquido no duto, a qual é comumente observada no caso real; (v) o fato de considerar a fase líquida incompressível, o que introduz incertezas no caso de condensados.

Outra limitação é a ausência de um pré-processamento minimamente aceitável, com caixas de diálogo em interface gráfica, e também de pós-processamento o que impõe uma dificuldade relevante em seu uso. A entrada de dados se dá pela edição direta de arquivos-texto pré-formatados, ou através do pré-processador que traz apenas uma caixa de diálogo MS-DOS a qual não permite correção de dado entrado errado. A saída de dados se dá em arquivos texto também, os quais podem ser, com algum esforço de processamento intermediário, migrados para planilhas eletrônicas ou programas específicos de traçado de gráficos, e a partir daí mostrados sob forma gráfica.

4.3. Breve descrição do simulador OLGA

O simulador OLGA é um simulador numérico unidimensional de escoamento multifásico em dutos e instalações de produção dedicado à indústria de óleo e gás. Seu histórico se confunde com a história da aplicação de royalties de petróleo no desenvolvimento técnico-científico, hoje difundido praticamente de forma globalizada: o estado norueguês criou uma lei na década de 70 na qual uma fração dos royalties deveria compulsoriamente ser aplicada no desenvolvimento de tecnologia na área de petróleo. Assim, no final da década de 70, uma parte dos royalties pagos por um consórcio de empresas operadoras, inicialmente formado pela Conoco, Exxon, Mobil Exploration, Norsk-Hydro A/S, PetroCanada, Statoil, Saga Petroleum e Texaco (as quais atuavam na parte norueguesa do Mar do Norte) foi destinada ao desenvolvimento de um código de escoamento multifásico a partir de códigos de escoamento multifásico presentes naquela altura na indústria nuclear, tais como TRAC^[94], SHIEH ET AL.^[95] e CATHARE^[96].

Durante suas mais de três décadas, seu desenvolvimento esteve sob diferentes comandos: inicialmente era gerido pelo consórcio e a partir da década de 90 passou a ser comercializado pela empresa norueguesa Scandpower^[97] e seu desenvolvimento ficou sob a responsabilidade conjunta do instituto Norueguês SINTEF^[98] e da citada empresa.

Diversos programas conjuntos patrocinados pelas empresas foram desenvolvidos nesse período, sendo o mais conhecido o programa OVIP (*Olga Verification and Improvment Projects*), no qual dados experimentais foram obtidos oriundos de diversas companhias, bem como do circuito experimental norueguês localizado na cidade de Trondheim. Este último é, na realidade, um dos maiores laboratórios de escoamento multifásico dedicado à indústria de óleo e gás gerenciado pelo SINTEF^[98].

No momento encontra-se em sua última versão unidimensional (a próxima já será bidimensional), a versão 7. No entanto, sua versão mais usada e validada de forma geral pelas companhias e pelo SINTEF^[98] foi a versão 5 cuja descrição de modelagem se dá em BENDIKSEN ET AL.^[6], e SCANDPOWER^[7].

A descrição conceitual considera, além da fase gás, a fase líquida dividida em duas frentes, uma na parede e outra dispersa no interior do duto, que desconsidera os efeitos da parede. Essa fase dispersa é chamada de gotículas de líquido ("Liquid droplets").

A versão cinco traz uma modelagem de três equações de massa, sendo uma para cada fase gás, líquida na parede e líquida dispersa, três equações de quantidade de movimento para cada uma das fases e uma equação da energia para a mistura. A versão 5 assume dois diferentes tratamentos das equações, um para o escoamento dito separado (onde se inclui os regimes anular e estratificado) e outra para o escoamento dito distribuído, onde aborda todos os outros regimes de escoamento. Seu método numérico de solução é de primeira ordem tanto no tempo quanto no espaço.

A versão 7 apresenta duas variações importantes em relação a cinco: (i) separa as fases líquidas por miscibilidade, criando novas equações para água independentes das equações para óleo, tanto na abordagem de massa, quanto de quantidade de movimento; (ii) utiliza o recurso de computação de alto desempenho **OpenMP™** (processamento em paralelo para máquinas com mais de um núcleo de processamento, onde tais núcleos fazem todos referência à mesma memória RAM).

4.4. Caso de referência

4.4.1. Objetivo

Definiu-se inicialmente um cenário teórico típico de interesse da indústria, qual seja, um duto de 100 km, com vazão aproximada de gás de 2,0 SMMm³/d (dois milhões de metros cúbicos padrão por dia, ou 23,15 Sm³/s) , com a presença de condensados e suas golfadas. A pressão em sua chegada (saída) é de 30 barg, típica das plantas de tratamento de gás natural existentes em projetos reais desses dutos. Busca-se analisar aspectos da solução em regime permanente e transiente. O objetivo maior desta investigação é apreciar a qualidade da solução, bem como o tempo de sua execução frente a diferentes opções de simplificação, uma vez que se destina a aplicação em tempo real, e não há garantias objetivas que possa acontecer em tempo hábil entre uma varredura de sistema e a próxima.

4.4.2. Dados de configuração

Seus dados de configuração seguem na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1 – Dados de configuração do duto de referência.

Diâmetro (in)	11,938
Comprimento (km)	100,00
Rugosidade (in)	0,0018
Inclinação (graus)	0,0000

4.4.3. Inclinação e altimetria

De forma a avaliar os efeitos da altimetria ou da inclinação nos resultados do código SPM-4, dois conjuntos de ensaios foram realizados: (i) duto horizontal e (ii) uma pequena elevação capaz de colocar a saída do duto numa altura entre 1500 e 2000 m, tipicamente encontrado em casos reais.

4.4.4. Fluidos empregados

Para a verificação do código SPM-4 foi disponibilizado por uma operadora dados de mistura de gás e condensado de poço (MARICATO^[99]) que alimentam um gasoduto bifásico da malha dutoviária nacional (vide **Figura 4.1** que traz a variação das massas específicas de óleo e gás em função da pressão, na temperatura de 20 °C).

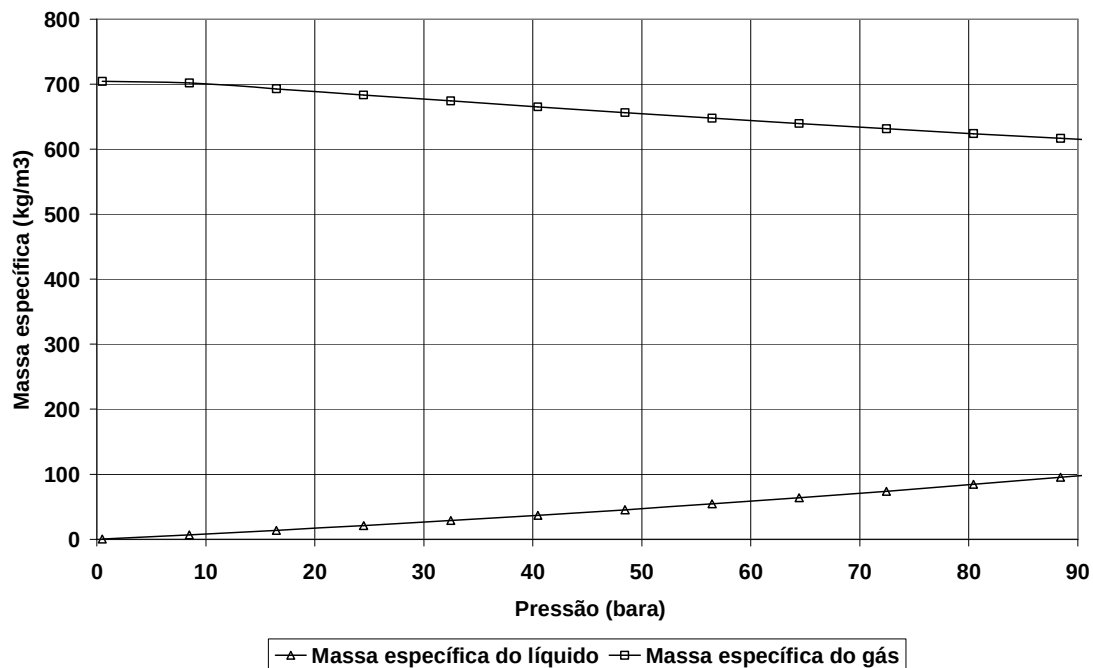


Figura 4.1 – Massa específica x P, para T=20 °C, fluido real

É importante destacar como o simulador OLGA define a condição de contorno de *holdup* (fração da seção transversal preenchida com líquido) na entrada do duto, no caso em regime permanente: como se trata de uma mistura de hidrocarbonetos em diferentes fases, o *holdup* é determinado a partir do equilíbrio líquido-vapor, o qual vem direto das condições *PVT* informadas pela tabela de propriedades.

4.4.5. Diferentes abordagens de cada simulador para propriedades PVT

O código SPM-4 traz diferentes modelagens, mas em sua maior parte tratam os fluidos como incompressíveis em alguma das fases ou mesmo em ambas. Tal modelagem corrige apenas a massa específica da fase gás, usando uma equação de estado simplificada, apenas para os efeitos de pressão, dado que é isotérmica.

O simulador OLGA, por sua vez, apresenta uma modelagem térmica mais abrangente, onde resolve a equação da energia para a mistura de fases, como parte das equações que governam o fenômeno físico modelado. Em adição, faz uso de uma tabela PVT gerada por outro simulador, o PVT Sim (CALTECH^[100]) que emprega um conjunto de opções de equação de estado, dentre elas a equação de SOAVE^[14] com a correção de PENELOUX & RAUZY^[101] para a massa específica de líquidos. De maneira a evitar estas disparidades os casos imaginados foram todos isotérmicos.

4.4.6. Diferentes abordagens de cada simulador para perdas de carga

Todas as simulações usaram as correlações descritas na **Tabela 4.2** para o cálculo das perdas de carga (FIGUEIREDO^[8]):

Tabela 4.2 – Correlação de fricção utilizadas.

Gás-parede	Líquido-Parede	Gás-Líquido Estratificado
MOODY ^[102]	MOODY ^[102]	ANDREUSSI & PERSEN ^[103]

Procurou-se usar as mesmas correlações nos dois simuladores. Isso foi possível para as correlações de fricção na parede tanto da fase gás, quanto da fase líquida. No entanto, devida às diferentes formulações, não foi possível usar a mesma correlação para o escorregamento entre as fases, independente do padrão de escoamento que estivesse vinculado.

4.4.7. Diferentes abordagens de cada simulador para regime permanente

Os dois softwares apresentam diferentes formas de lidar com regime permanente. O **código SPM-4** emprega a modelagem transiente completa e trata a simulação em regime permanente como um transiente normal de acomodação das condições de contorno às condições iniciais, onde nenhuma alteração é introduzida a menos de permitir que o próprio passo de tempo avance. Assim, a solução vai se refinando, na maioria dos casos, uma vez que eventuais desbalanceamentos mássicos no interior dos contornos do problema vão sendo compensados. Observa-se por oportuno que esse passo de tempo permitido é virtual: é usado apenas para refinar a solução de regime permanente que pertence ao momento inicial de tempo zero. O refinamento é considerado concluído com base na comparação do inventário

mássico do duto entre o passo de tempo atual e o anterior. O valor utilizado para essa comparação é configurável e no caso dos ensaios desse trabalho variou em termos relativos (comparado com o valor da iteração anterior) entre 10^{-4} e 10^{-6} .

O simulador OLGA em sua versão 5 procede de forma análoga, embora não ofereça como configurar o valor de comparação entre um passo de tempo e outro. Da versão 6 em diante, uma opção a mais é oferecida, além da abordagem já descrita do uso de um longo transiente para estabilizar as condições iniciais: todos os termos transientes são retirados da formulação e o sistema gerado é resolvido uma única vez, onde o critério de convergência continua sendo um desbalanceamento mássico, porém desvinculado do tempo. Caso haja necessidade de mais iterações para resolvê-lo, essas são puramente numéricas, relacionados com o método numérico de solução.

4.4.8. Descrição funcional dos casos

Pretende-se simular a condição de uma suposta operação estabilizada do duto caso, bem como seu esvaziamento (a “ventagem” do duto), e acompanhar o perfil de pressão ao longo do duto para os dois simuladores.

4.4.8.1 *Regime permanente*

Para o regime permanente foram comparados os perfis de pressão obtidos com o **código SPM-4**. A verificação se deu contra a mesma simulação executada com o simulador OLGA, usado como referência.

4.4.8.2 *Regime transiente*

Para o regime transiente, interrompeu-se a alimentação na entrada do duto fazendo a vazão cair a zero em 10 s, a partir do minuto 30, e a pressão cair ao nível atmosférico na saída numa rampa executada no mesmo intervalo de tempo. A partir daí se analisou as curvas também de pressão nos tempos de 1 h e 6 h. Uma única análise para o caso inclinado foi feita com 15 h de simulação para desqualificar uma modelagem. O tempo total transiente simulado em todos os casos foi de 15 h, embora as análises tenham se dado em diferentes momentos.

4.4.9. Condições de contorno

Considere a **Tabela 4.3** a qual traz as condições de contorno usadas nos diferentes ensaios. A imposição de tais condições respeita a forma com que tais simuladores as requerem i. e., cada pacote o faz de uma maneira diferente.

Tabela 4.3 – Condições de contorno dos ensaios.

	$P \text{ (Barg)}^{S,O}$	$m_{GAS} \text{ (kg/s)}^S$	$m_{OLEO} \text{ (kg/s)}^S$	$m_{TOTAL} \text{ (kg/s)}^O$	α_{LIQ}^S
Entrada	C	18,7	1,3	20	0,0623
Saída	30,0	-	-	-	-

Obs.(1): os índices O e S correspondem às condições de contorno dos softwares OLGA e código SPM-4 respectivamente. O índice C representa a variável a ser calculada na simulação.

Obs.(2): o código SPM-4 requer a fração de líquidos como dado de entrada, ao passo que o simulador OLGA a determina a partir de uma tabela PVT. De maneira a colocar as duas simulações na mesma base, o α_{LIQ} determinado pela tabela PVT foi usado também no **código SPM-4**.

4.4.10. Condições temporais

A **Tabela 4.4** traz as condições temporais usadas nos diferentes ensaios.

Tabela 4.4 – Condições temporais dos ensaios planos.

$t(s)$	$P_{Saída}^{O,S} \text{ (Barg)}$	$m_{GAS(Entrada)}^S \text{ (kg/s)}$	$m_{OLEO(Entrada)}^S \text{ (kg/s)}$	$m_{TOTAL(Entrada)}^O \text{ (kg/s)}$	α_{LIQ}^S
0	30,0	18,7	1,3	20,0	0,0623
1800	30,0	18,7	1,3	20,0	0,0623
1810	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0623
54000	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0623

4.5. O processo de benchmarking

4.5.1. Adequação da referência

O caso de referência, além de grande importância para o estudo em questão, não pode ser considerado trivial seja para o simulador OLGA, seja para o código SPM-4, uma vez que envolve um cenário de baixa pressão, empregando casos de horizontalidade e quase horizontalidade. Para o simulador OLGA existe um histórico grande de casos semelhantes, tais como os projetos básicos dos gasodutos bifásicos de Mexilhão, Peroá, Golfinho e Manati. Em adição, a maior parte dos projetos de dutos semelhantes, realizados na primeira metade da primeira década dos anos 2000 na comunidade nacional, teve o uso do simulador OLGA como exigência a ser cumprida nos processos licitatórios para projetos e consultorias.

4.5.2. Consolidação das simulações da referência

As simulações executadas com o simulador OLGA se deram através de sucessivas malhas refinadas tanto de tempo quanto de espaço, de sorte a não haver uma diferença maior que 0,1% dos valores de pressão e inventário mássico entre a malha considerada adequada e sua antecessora.

As simulações executadas com o **código SPM-4** tiveram o simulador OLGA como referência e apresentaram resultados diversos em função dos diferentes

parâmetros variados, entre eles o número de células de discretização bem como o parâmetro CFL.

A maior parte dos casos foi simulada com 100 (cem) células de discretização, estando indicado no texto quando há variação deste valor. A condição CFL usada foi de 0,1 na maior parte dos casos, estando igualmente assinaladas no texto as variações.

4.6. Resultados e discussões

4.6.1. Introdução

Foram testados os métodos de Rusanov, Ritchmyer, FORCE, FCT e TVD/Lax Friedrich, todos descritos no **capítulo 3**, inicialmente com o mesmo valor de 0,1 para o parâmetro CFL, bem como discretização espacial uniforme de 100 células. Resultados, interpretações e eventuais discussões são descritos na sequência.

4.6.2. Diferentes métodos numéricos – Regime permanente, perfil plano

Considere a **Tabela 4.5** a qual traz os erros associados ao cálculo da pressão na entrada de forma análoga a tabela anterior, porém para a mistura gás + óleo:

Tabela 4.5 – Desvios para diferentes métodos numéricos, plano

Método	Rusanov	Ritchmyer	FORCE	FCT	TVD/LAX	OLGA
ΔP (Barg)	31,68	38,69	14,05	38,87	29,26	42,46 ^(*)
Erro (%)	25	9	67	8	31	--

(*) Valor de referência.

Considere também os perfis de pressão da **Figura 4.2** obtidos com diferentes métodos numéricos. Três conclusões são possíveis: (i) os métodos numéricos FCT e Ritchmyer, ambos de segunda ordem no espaço, foram os de melhor desempenho; (ii) nos métodos de primeira ordem, especialmente naqueles que apresentaram maior desvio (FORCE e TVD/LAX), houve duas inadequações: a discretização no espaço, relativamente grosseira, e a discretização no tempo, dada pela condição CFL, que também fornece uma discretização no tempo inadequada; (iii) diferenças menores entre os dois simuladores podem ser explicadas tanto pelas diferentes formas com que cada um deles estima suas propriedades PVT, quanto pela diferença na estimação dos efeitos de escorregamento entre as fases, i. e., a forma de calcular a tensão entre as fases, já que as tensões entre fase e parede usam as mesmas correlações.

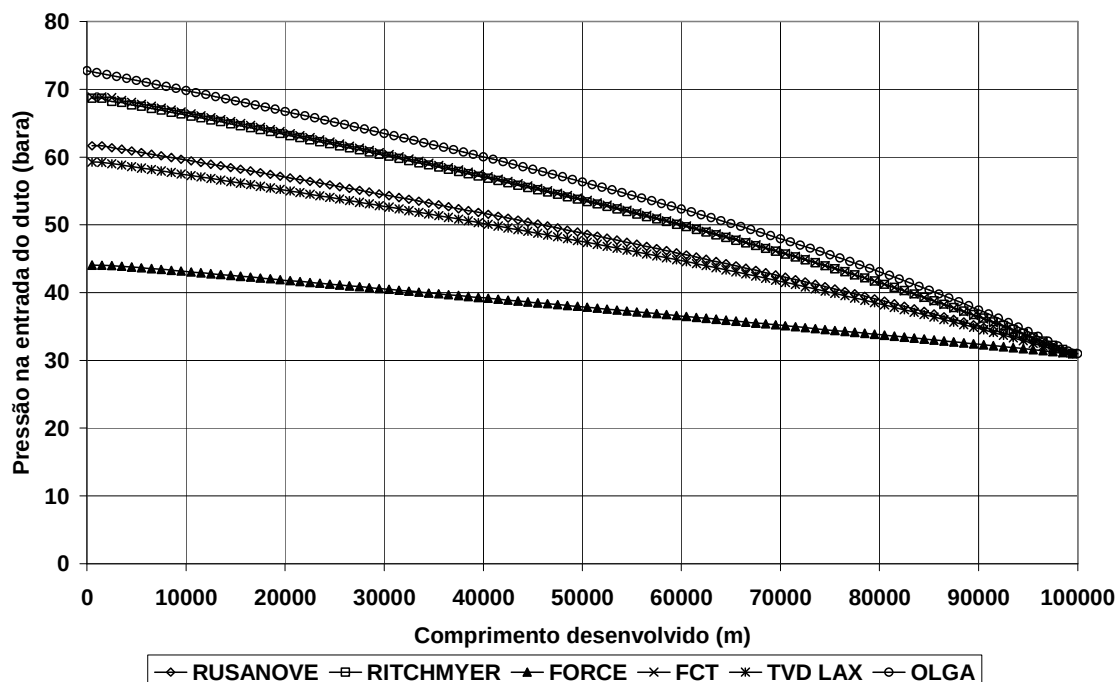


Figura 4.2 – Modelo SPM-4, diferentes métodos numéricos, reg. permanente, plano

4.6.3. Diferentes métodos numéricos – Regime transitório, perfil plano

De acordo com o cenário transiente descrito em 4.4.10, considere a **Figura 4.3** que traz os resultados dessas execuções para uma hora decorrida do início da simulação, i. e., com 30 min. de esvaziamento.

Observam-se aproximadamente as mesmas diferenças observadas nos casos em regime permanente. Adicionalmente observam-se pequenas imperfeições próximas ao contorno de saída no método FCT, que ainda assim continua sendo um dos melhores para o caso transiente, juntamente com Ritchmyer. Os dois métodos numéricos se mostram estáveis e acurados entre si. As diferenças nos valores numéricos são atribuídas a um valor inadequado do parâmetro CFL o qual será abordado na seção 4.7.3.

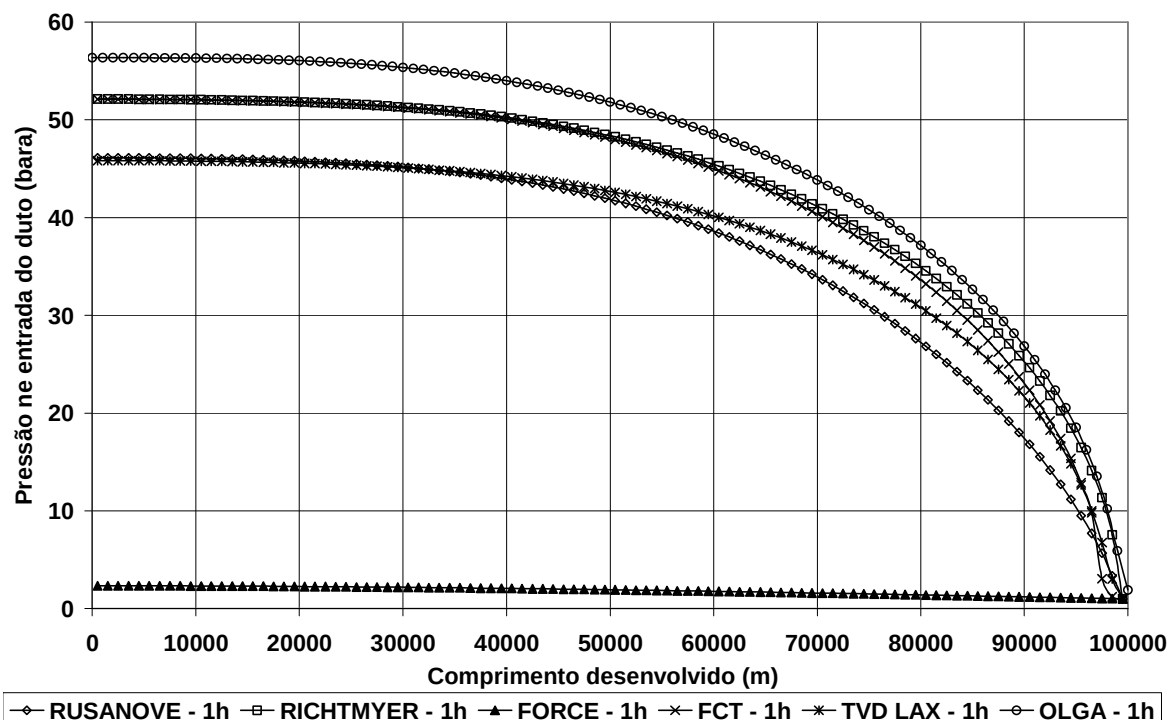


Figura 4.3 – Modelo SPM-4, diferentes métodos numéricos, $t = 1$ h, escoamento transiente duto plano

4.6.4. Efeitos da altimetria, regime permanente

Para análise dos efeitos de altimetria, usou-se o mesmo cenário definido em 4.4 acrescido agora de uma inclinação de 1 (um) grau, o que provocou uma elevação na saída do duto de cerca de 1780 m (compatível com as diferenças de cota encontradas em dutos existentes). Adicionalmente reduziu-se a vazão mássica total da mistura a um quarto da anterior de forma a permitir a formação de golfada de terreno próxima à entrada do duto, numa preparação para a simulação transiente. O objetivo foi forçar a criação de uma golfada de líquidos na parte baixa do duto exatamente para teste dos limites da quase horizontalidade do **código SPM-4**. Assim, tem-se a **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6 – Condições de contorno do cenário inclinado

	$P \text{ (Barg)}^{S,O}$	$m_{\text{GAS}} \text{ (kg/s)}^S$	$m_{\text{OLEO}} \text{ (kg/s)}^S$	$m_{\text{TOTAL}} \text{ (kg/s)}^O$	α_{LIO}^S
Entrada	C	-	-	5,0	0,0623
Saída	30,0	4,675	0,325	-	-

Obs.: os índices O e S correspondem às condições de contorno dos softwares OLGA e **código SPM-4** respectivamente. O índice C representa a variável a ser calculada na simulação.

Considere a **Figura 4.4** que descreve o regime permanente obtido com ambos simuladores, sem qualquer ajuste de um em direção ao outro (sintonia).

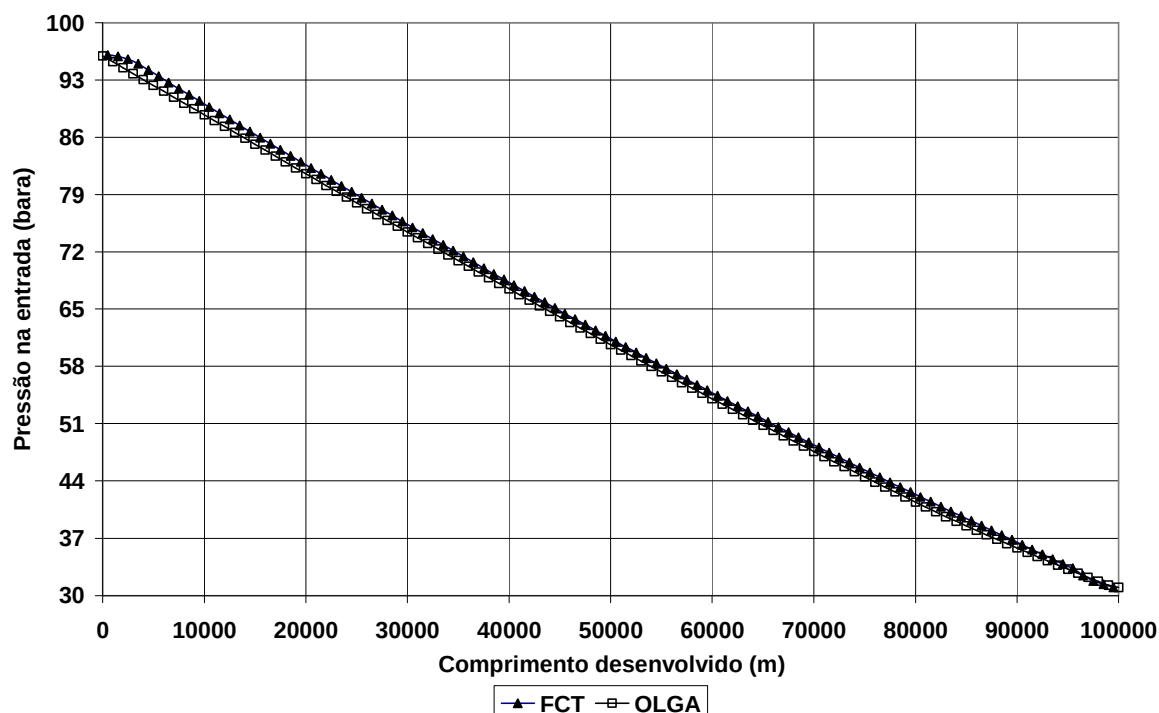


Figura 4.4 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, escoamento permanente, duto inclinado 1 grau

Os desvios entre as duas curvas para o dado de pressão de entrada é inferior a 1%, nessa particular comparação.

4.6.5. Efeitos da altimetria, regime transiente

Os demais cenários transientes foram mantidos, isto é, com meia hora de escoamento a pressão na saída cai a zero, e a vazão na entrada também, de forma a analisar o que seria um esvaziamento natural deste duto exemplo.

Considere a **Tabela 4.7** que descreve as rampas transientes configuradas em ambos simuladores. As condições de contorno se mantiveram: vazão mássica total na estrada e pressão na saída para o simulador OLGA; vazão mássica total e fração volumétrica de líquidos na entrada e pressão na saída para o código SPM-4.

Tabela 4.7 – Condições temporais do teste com duto inclinado.

Tempo (s)	P (Barg) ^{o,s}	m_{GAS} (kg/s) ^s	m_{OLEO} (kg/s) ^s	m_{TOTAL} (Kg/s) ^o	α_{LIQ} ^s
0	30,0	4,675	0,325	5,0	0,0623
1800	30,0	4,675	0,325	5,0	0,0623
1810	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0623
54000	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0623

A **Figura 4.5** mostra as duas curvas com 1 h de simulação, i. e., meia hora de esvaziamento. No entanto, e diferentemente do caso plano, no caso inclinado há relevantes e inicialmente inconsistentes diferenças da pressão na entrada. Na curva já existem diferenças salientes, para as quais apenas a explicação pelo parâmetro

CFL e/ou a discretização espacial aparentemente não são suficientes. Considere a **Figura 4.6**, bem como a **Figura 4.7** que trazem as pressões no tempo $t = 6h$, que caracteriza o esvaziamento de aproximadamente a metade do inventário do duto, e 15 h, onde o duto já está completamente vazio.

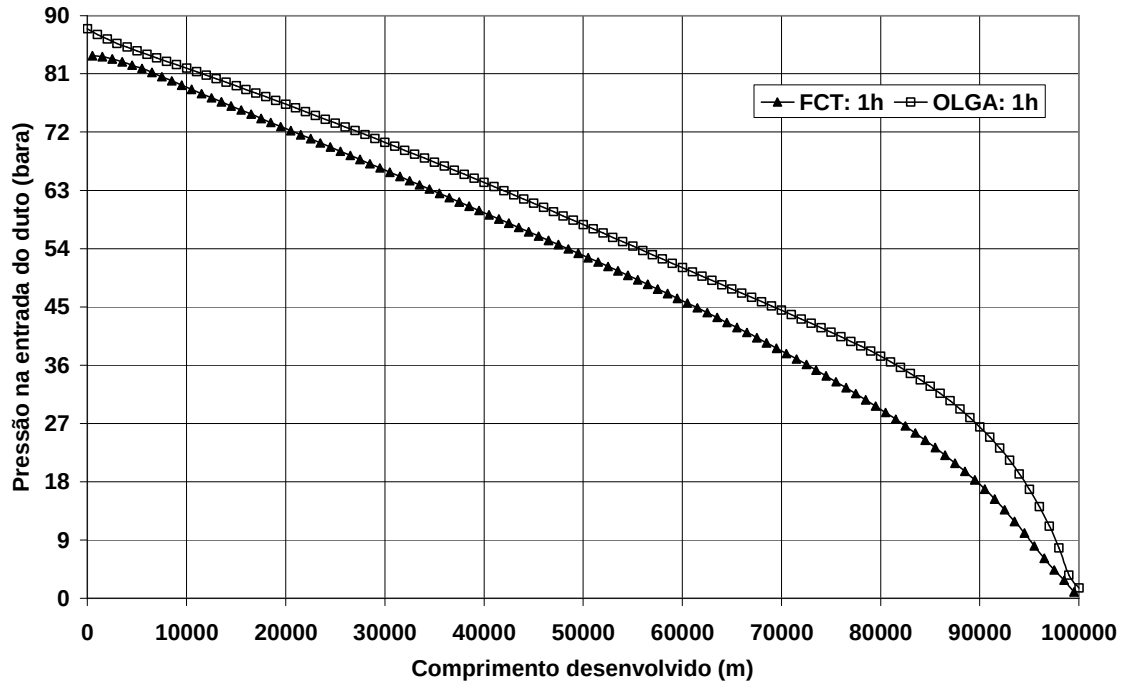


Figura 4.5 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, $t=1h$, duto inclinado

A explicação para tais diferenças se dá pela formação de uma golfada de líquidos devida a altimetria próximo a sua entrada (ponto mais baixo). À medida que a pressão vai se equalizando à pressão atmosférica na saída do duto, uma coluna única de líquido na entrada do duto vai se formando, e a pressão nesse ponto equivale a pressão hidrostática dessa coluna, uma vez que a entrada do duto está fechada. Tal efeito caracteriza o final da hipótese de quase horizontalidade, presente na modelagem SPM-4. Tal efeito é observado nos gráficos pois à medida que o tempo vai passando e a golfada de terreno vai se assentando na entrada do duto, as curvas de pressão dos dois simuladores vão se descolando.

Outra explicação é o fato do modelo SPM-4 permitir apenas uma pressão única por seção transversal do duto, cuja modelagem não prevê nível de líquido maior que um diâmetro do duto, i. e., desconsidera colunas de líquido acumulada.

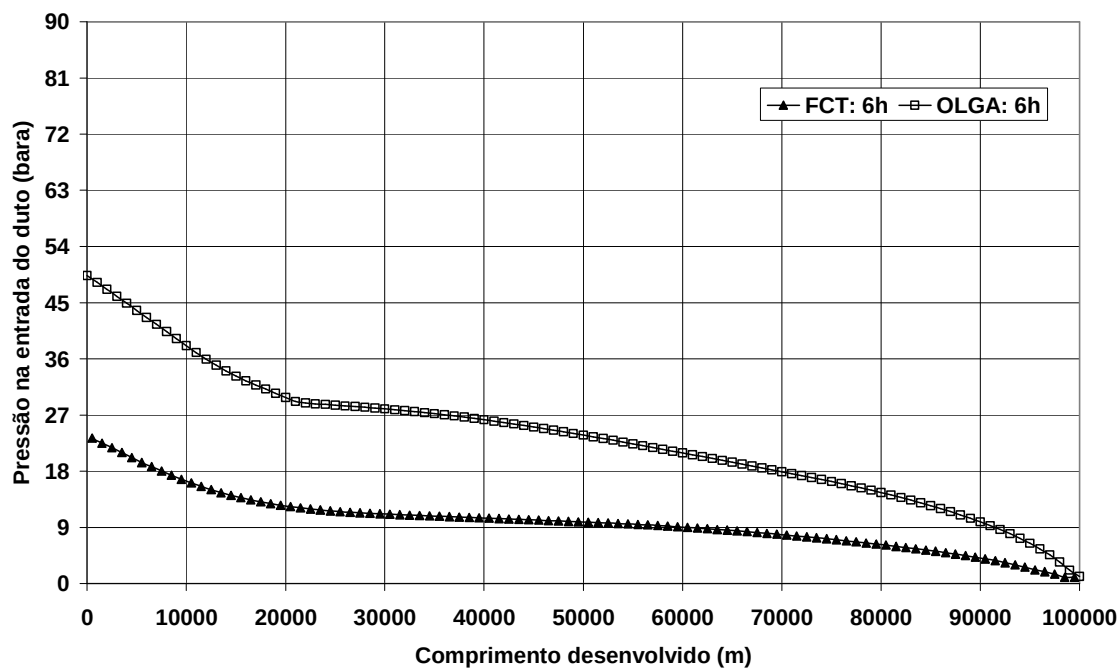


Figura 4.6 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, t=6h, duto inclinado

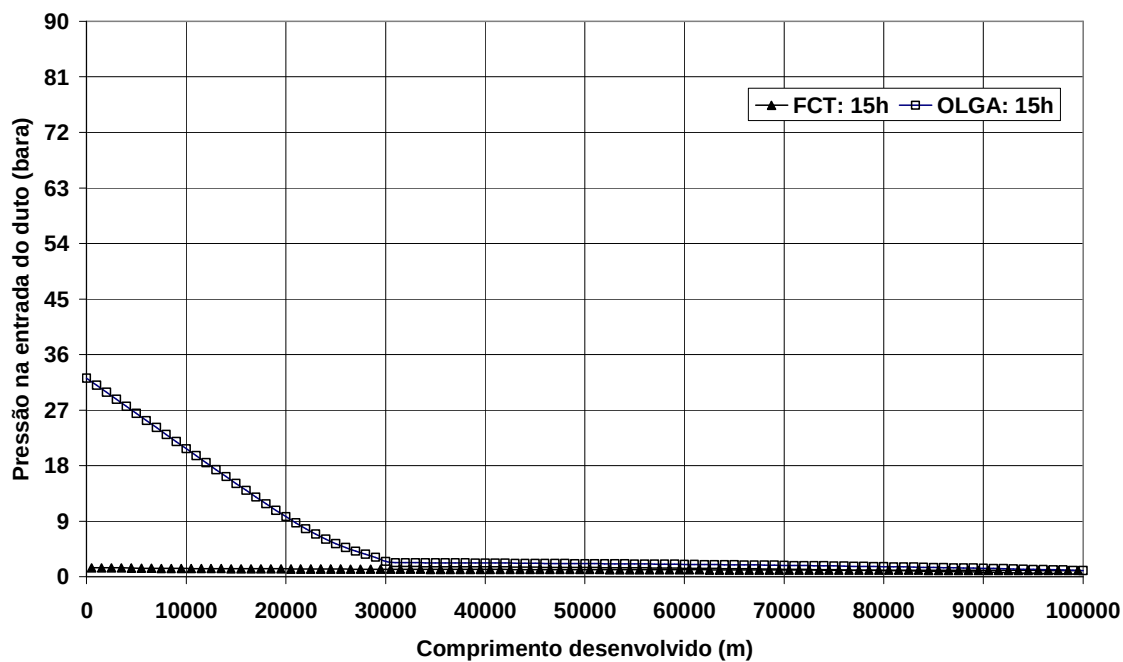


Figura 4.7 – Modelo SPM-4, FCT X OLGA, t=15 h, duto inclinado

Finalmente, como o modelo SPM-4 também não considera a transferência de massa entre as fases, mesmo que a coluna de líquido fosse modelada, possivelmente não abordaria importantes contribuições de uma fase migrando para a outra por solubilidade ou condensação.

4.7. Desempenho computacional

4.7.1. Caso com perfil horizontal

A **Tabela 4.8** apresenta os tempos computacionais obtidos com diferentes métodos numéricos para o modelo SPM-4, simulado em 15 h de regime transiente, perfil horizontal, malha uniforme de 100 elementos. O hardware usado foi Intel^(R) Core^(TM) 2 Quad CPU Q9550, com o relógio interno de 2,83 GHz e 8 gigabytes de memória. O simulador OLGA usou um código que permite tirar proveito dos quatro núcleos de CPU ao mesmo tempo (“paralelismo”), através de diretivas **OpenMPTM**, ao passo que o código SPM-4 utilizou apenas um núcleo de CPU por vez.

Os métodos numéricos que apresentaram os menores tempos de processamento foram os métodos de segunda ordem Ritchmyer e FCT, os quais retornaram tempos da mesma ordem tanto de convergência quanto de magnitude. Na análise de incerteza dos métodos da seção anterior já haviam sido aqueles que obtiveram um valor de pressão na entrada duto mais próximo ao valor de OLGA (valor de referência).

Tabela 4.8 – Tempo de CPU para métodos numéricos, caso horizontal.

Método Numérico	Tempo (s)
Ritchmyer	637
FCT	442
Rusanov	852
TVD LAX	960
OLGA	79

Observa-se que os métodos de primeira ordem, tais como Rusanov e TVD LAX apresentaram os maiores tempos de CPU. O método FORCE simplesmente divergiu e ficou oscilando entre correlações de atrito e de propriedades de estado.

O tempo de CPU obtido com os diferentes métodos numéricos disponíveis no código SPM-4 é dado por um código serial, i. e., faz uso de uma única CPU o que permite explicar seu alto tempo de CPU quando comparado ao OLGA.

O **código SPM-4** obteve, para um tempo físico de escoamento de 54000 segundos (15 h), o melhor tempo de CPU de 7,36 min. para o método numérico FCT, e de 16 min. para o pior (TVD LAX), sendo a média dos métodos de 12 min. o que para este caso particular permite seu uso em tempo real.

Assim, tem-se uma taxa de varredura viável, com o tempo de CPU obtido, bastante inferior ao tempo real do escoamento. Entretanto, o desempenho deste caso plano deixou muito a desejar em relação ao OLGA, pois embora use quatro CPU's, teve um desempenho 9,2 vezes melhor. Ou seja, se o algoritmo paralelo apresentasse uma eficiência de 100% (o que nunca acontece) ainda assim o simulador OLGA seria aproximadamente 130% mais rápido. São diversas as razões desta diferença, em especial a formulação do OLGA que é bastante diferente. Outra razão também de relevância é o uso de uma tabela de propriedades PVT pelo OLGA, onde apenas interpolações são realizadas, o que requer somente operações básicas como adição, subtração, multiplicação e divisão. O código SPM-4 calcula a propriedade média em cada célula de discretização usando uma equação de estados, embora simplória. Esse uso implica em operações matemáticas mais sofisticadas tais como a exponenciação de expoente real.

4.7.2. Caso inclinado

A **Tabela 4.9** apresenta o tempo de CPU obtido apenas com o método numérico FCT para o modelo SPM-4, considerado o mais adequado, não somente devido a seu tempo computacional, mas pelo fato de ter sido o único que funcionou em regime permanente e transiente para o perfil inclinado, i. e., o método de Ritchmyer apresentou problemas de divergência neste cenário, cuja origem não foi identificada.

Tabela 4.9 – Tempo de CPU para métodos numéricos, perfil inclinado.

Método Numérico	Tempo (s)
FCT	1457
OLGA	411

A inclinação implica em dois acréscimos principais no tempo de computacional: (i) o cálculo da inclinação que envolve uma função seno em cada célula de discretização (a depender da formulação), presentes nos dois simuladores; bem como (ii) o cálculo das golfadas de terreno, que envolvem modelagem adicional, com exponenciações e novas funções trigonométricas por célula, presente apenas no OLGA. Assim, o tempo do **código SPM-4** subiu 3,3 vezes, já o tempo do OLGA saltou 5,2 vezes.

Os mesmos comentários relativos à “paralelização”, bem como à adequação a tempo real feitos para o caso com perfil horizontal, valem aqui. Para o tempo físico de escoamento de 54000 segundos (15 h) um tempo de CPU de 1460 segundos (25 min.) no **código SPM-4**.

Assim, tem-se uma taxa de varredura viável, com o tempo de CPU também inferior ao tempo real do escoamento, para este específico caso. Como citado, o método FCT foi o único a apresentar resultados, pois o método Ritchmyer só funcionou para o regime permanente. Assim, o método numérico FCT foi o método mais estável, pois funcionou de forma aceitável em todos os casos apresentados.

4.7.3. Variações do parâmetro CFL para as simulações

Através de diferentes simulações, pode-se observar que quando se varia o valor do parâmetro CFL e/ou o número de células discretizadas, obtém-se o valor da pressão na entrada do duto no instante inicial da simulação, próximo da pressão calculada no OLGA, para os métodos numéricos do modelo SPM-4, em regime permanente e transiente com perfil horizontal (**Tabela 4.10**). Ressalta-se que tal tabela é apenas informativa, i. e., não tem por finalidade qualquer comparação uma vez que os métodos requerem CFL's e discretizações espaciais diferentes para convergir. Considere a **Tabela 4.11** qual traz os erros associados ao cálculo da pressão na entrada com base nas perdas de carga em relação à saída:

Tabela 4.10 – Valores de CFL para exatidão próxima ao caso referência (OLGA)

Método Numérico	Tempo de CPU (s)	Valor de CFL	Número de células de Discretização	Pressão (Barg)
Ritchmyer	1963	0,01	100	72,47
FCT	499	0,04	100	70,23
FORCE	26556	0,3	1000	71,09
Rusanov	49695	0,3	1000	72,83
TVD LAX	36496	0,1	1000	72,14

Tabela 4.11 – Desvios em relação ao caso de referência, duto horizontal

Método	Rusanov	Ritchmyer	FORCE	FCT	TVD/LAX	OLGA
ΔP (barg)	42,83	42,47	41,09	40,23	42,14	42,46(*)
Erro (%)	0,85	0,02	3,23	5,25	0,75	--

(*) Valor de referência.

O desvio pode ser tornado pequeno, contra diferentes custos computacionais de cada método, custos estes causados estritamente pelo valor do parâmetro CFL, e do nível de refinamento da discretização específica. Os métodos de segunda ordem (Ritchmyer e FCT) apresentaram resultados relativamente próximos ao caso de referência, com a mesma discretização, apenas com variações (i. e., diminuições, descritas na **Tabela 4.10**) do parâmetro CFL. Já os métodos de primeira ordem

exigiram uma mudança na discretização espacial de uma ordem de grandeza, o que parece coerente, implicando, entretanto, em custos computacionais altos.

A conclusão é que o método mais estável, de segunda ordem no tempo, com tempos compatíveis com aqueles encontrados no caso de referência foi o método FCT.

4.8. Verificação da hiperbolicidade teórica do modelo SPM-4

4.8.1. Verificação das velocidades

Considere a **Tabela 4.12** a qual traz as velocidades de líquido e gás obtidas nos contornos do duto. As velocidades relativas são então calculadas e apresentadas na mesma tabela.

Tabela 4.12 – u_r de entrada/saída, regime permanente perfil plano

	Entrada			Saída		
	u_L (m/s)	u_G (m/s)	u_r (m/s)	u_L (m/s)	u_G (m/s)	u_r (m/s)
SPM-4	1,22	4,75	3,53	1,24	9,94	8,70
OLGA	1,27	4,82	3,55	1,29	10,18	8,79
Dif. (%)	-4,2	- 0,8	-0,5	-3,8	-1,4	-1,0

O simulador *PVT* comercial PVTSIM^[100] reporta uma velocidade sônica para essa composição de gás de 384 m/s na condição de entrada e de 377 m/s na condição de saída. Assim, o valor limite a ser respeitado perante o critério de 5% da velocidade sônica como limite superior seria de 19,5 m/s, o qual é respeitado em qualquer condição.

5. Arquitetura de automação e aplicações de tempo real em dutos

5.1. Introdução

A indústria de movimentação dutoviária busca movimentar a maior quantidade de fluidos, dentro da melhor condição de segurança, economicidade e qualidade (MOHITPOUR ET AL.^[104]). Seu foco é a movimentação em si, e não o produto, embora diferentes produtos requeiram diferentes cuidados operacionais. É empregada numa variedade de segmentos industriais, desde suprimento e distribuição de água, químicos variados, petroquímicos, nuclear (em pequenos dutos), óleo e gás (e. g., gás natural, óleo cru, produtos refinados e misturas polifásicas), grãos, e até minerais sólidos em suspensão. O cenário objeto deste estudo são os gasodutos que transportam misturas bifásicas de hidrocarbonetos.

As funções avançadas de gestão operacional de dutos, doravante aqui chamadas apenas de aplicações de tempo real, são softwares, nem sempre inteiramente de tempo real que, de alguma forma, contribuem para automatizar a operação de dutos. As funções existentes são específicas de um dado segmento de indústria e, por vezes, cenário de movimentação. Por exemplo, pode-se ter uma função específica para acompanhar em tempo real o inventário da fase gás de um gasoduto bifásico. Outro exemplo seria a otimização do bombeamento de uma malha de polidutos (dutos que transportam bateladas de diferentes produtos refinados tais como Diesel e gasolina), que é executado apenas a cada vez que uma nova batelada entra ou deixa a rede de dutos. Existe uma gama grande destas funções voltadas para a automação de dutos.

5.2. Histórico

As primeiras iniciativas de automação de dutos surgiram no começo dos anos 80 (MOHITPOUR ET AL.^[105]), e foram evoluindo juntamente com as tecnologias de instrumentação, comunicação, gestão centralizada ou distribuída de processos, bem como da própria tecnologia de computadores.

A primeira geração, surgida entre os anos 80 e 90 é foi desenvolvida para sistemas monofásicos, tanto para modelagem quanto para medição de vazão e outras variáveis volumétricas. As funções são individualizadas, particularizadas, sem integração entre os módulos, e focam nos processos em regime permanente, embora aplicações tipicamente transientes também existam (e. g., detecção de vazamentos). São tipicamente mono processadas.

A segunda geração, iniciada a partir da virada do milênio e caracterizando o atual estado da arte pode abordar sistemas multifásicos, tanto para modelagem quanto para medição, mas a maior diferença está na integração para um dado domínio de aplicação, e. g., gestão operacional de dutos, onde uma função pode tirar proveito de um dado já calculado por outro módulo. Por exemplo, todas as funções usadas para um gasoduto, tais como reconciliação de inventários, detecção de vazamentos ou acompanhamento de pigs podem usar o mesmo simulador numérico de escoamento, o mesmo módulo de aquisição de dados de tempo real, e serem comandadas a partir do mesmo módulo de controle. O emprego de algoritmos paralelos é opcional e discreto, e as aplicações abordam os estados estáticos, permanentes e transientes.

A terceira geração, ainda não alcançada, foca na integração de domínios de aplicação, i. e., integra-se sistemas completos. Por exemplo, tem-se a integração em alta escala da gestão operacional de poços, processos da planta em plataforma, operação de dutos, e da planta de processamento de gás natural em terra próximo à saída do duto, todos comandados pelo mesmo sistema. Seria uma espécie de sistema de gestão operacional da produção de gás e condensado como um todo, do poço até a entrega na malha de distribuição em terra. Neste caso, a paralelização como forma de computação de alto desempenho se dá em escala generalizada.

5.3. Multidisciplinariedade

De uma maneira geral as aplicações de tempo real para dutos abrangem um conjunto grande de domínios de conhecimento, desde a automação (instrumentação, comunicação, sistemas supervisórios, etc.), fenômenos de transporte, métodos numéricos, bem como diversos segmentos da ciência da computação. Estes últimos

incluem algoritmos em geral, heurísticas, sistemas especialistas, processamento em tempo real, bases de dados relacionais ou não (SGBD's) e protocolos de redes. Finalmente, bem como principalmente, envolvem o entendimento do segmento particular da operação que se visa automatizar.

5.4. Nomenclaturas

Não existe no momento um padrão de nomenclaturas suficientemente abrangente para cobrir todos os termos das aplicações de tempo real em dutos em língua portuguesa. Em caráter experimental, existe o projeto WikiDutos (IBP^[106]), inicialmente imaginado para servir de referência informal para terminologias de dutos em língua portuguesa. Assim, um glossário de termos foi inserido no início deste texto.

Algumas nomenclaturas acabaram por se consolidar com base em sua origem, e, g., “estimador de estados”, oriundo do domínio de automação. No contexto das aplicações de tempo real o estimador de estados se confunde com o conceito de um simulador de escoamento em tempo real, pois simula os estados que o algoritmo da particular função de gestão abordará. De maneira a deixar os termos compatíveis com o jargão da indústria, optou-se por respeitar essas características.

No que diz respeito a nomenclaturas associadas às áreas de instrumentação e automação, este texto segue o padrão do vocabulário internacional de termos gerais e metrologia (INMETRO^[107]).

5.5. Arquitetura geral de automação

5.5.1. Introdução

Considere a **Figura 5.1** que descreve genericamente a arquitetura de automação que este trabalho enfoca. Existem diversas arquiteturas possíveis, de sorte que se buscou usar a mais abrangente em termos conceituais, bem como aquela que traduza o estado da arte já instalado em campo, com alguma perspectiva de vida útil pela frente.

Trata-se de um diagrama de camadas e linhas. Nas camadas são descritos os elementos importantes que geram ou introduzem modificações nos dados, e nas linhas as modificações em si, sob o ponto de vista, físico, lógico e das incertezas e possíveis falhas que são acrescentadas aos dados toda vez que salta de camada. No diagrama as camadas estão dispostas horizontalmente, ao passo que as linhas são verticais. O que se busca é caracterizar os elementos importantes que inserem alterações nos dados.

5.5.2. Camadas

São sete camadas, onde nem todas estarão sempre presentes: (i) instrumento (transmissor); (ii) Conversão análogo-digital; (iii) controle local; (iv) supervisão local; (v) sistema de comunicação; (vi) supervisão geograficamente distribuída ou remota; (vii) aplicação de tempo real.

5.5.2.1. *Instrumento (transmissor)*

O instrumento ou transmissor é a camada na qual o dado é gerado a diferentes frequências ou amostragens de acordo com seu elemento primário. Tem a si associado uma incerteza ou exatidão, tal como uma repetitividade. É sempre analógico, por princípio de automação.

No instrumento, as seguintes falhas são possíveis: (i) dado congelado, onde o instrumento repete o mesmo valor após um número configurável de varreduras; (ii) dado fora de faixa, onde o valor que o instrumento reporta encontra-se fora de uma faixa pré-estabelecida, e. g., uma pressão absoluta negativa; (iii) dados fora de incerteza, onde um filtro revela que o instrumento apresenta um erro aleatório maior que o informado pelo fabricante; (iv) dado com falha aleatória, onde o dado passou em todos os testes anteriores mas não apresenta qualquer coerência com o valor esperado por seu processo para aquele momento no qual é lido. Um exemplo seria um aquecimento de um fluido onde repentinamente o instrumento retornasse, na sequência temporal, um valor de temperatura menor que seu antecessor.

5.5.2.2. *Conversão análogo-digital (A/D)*

Os dados saem do transmissor em sinal analógico e precisam ser convertidos para o formato digital. A segunda camada se incumbem dessa tarefa. Na conversão análogo-digital dois aspectos são importantes: (i) a depender da abordagem e do hardware que a faça quase sempre introduz uma incerteza adicional, i. e., acresce a incerteza do instrumento de um valor adicional; (ii) tem a si associada uma varredura que deve respeitar as limitações de tempo de amostragem do elemento primário do instrumento. Como exemplo, de nada vale uma varredura de cem leituras num segundo, se o elemento primário do instrumento conseguir apenas distinguir um dado a cada segundo. Normalmente é realizado por um cartão de hardware que o faz para diversos instrumentos ao mesmo tempo.

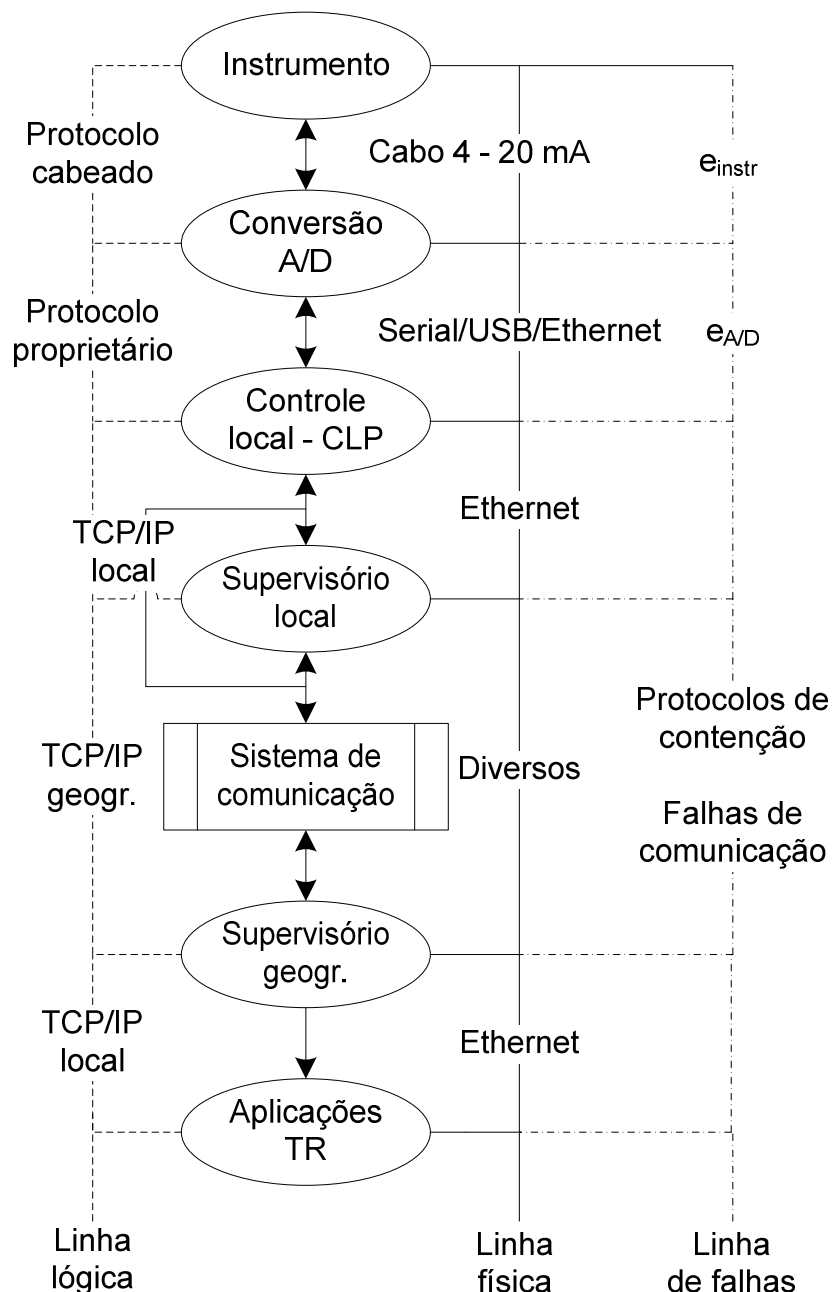


Figura 5.1 – Arquitetura geral de aquisição de dados das aplicações de tempo real

5.5.2.3. Controle local

Numa determinada planta local pode existir uma grande quantidade (milhares) de instrumentos que disponibilizam dados, já em formato digital, em tempo real. A disciplina na qual esses instrumentos serão controlados, sua varredura, bem como comandos para equipamentos que estejam também na mesma malha é feita pelo controle local através dos controladores lógicos programáveis (CLP) ou *Programmable Logical Controllers* (PLC). Um CLP possui dois elementos de interesse maior deste trabalho: (i) O número de portas capaz de controlar, o que na prática significa a soma de instrumentos e equipamentos que é capaz de controlar; (ii) Sua

memória, que deve ser suficiente para todos seus processos, com uma certa margem de contingência para crescimentos eventuais. Na arquitetura de automação de dutos os CLP's podem estar conectados à supervisão local ou diretamente ao sistema de comunicação que responsável por levar os dados à locação central de supervisão, geograficamente (remotamente) localizada.

5.5.2.4. *Supervisão local*

A depender do nível de complexidade da planta local, pode haver necessidade de um nível local de supervisão. Tal supervisão executaria tarefas de interesse local tal como controlar níveis de lubrificantes de determinados equipamentos ou acionar as bombas que movimentam esses lubrificantes. São atividades necessárias porém de pouca importância para a supervisão geral. Essas tarefas são executadas por programas que dispõem de interfaces gráficas particularizadas para as plantas em questão, bem como com funções específicas de gestão local, tais como acompanhamentos em tempo real das variáveis de interesse local. São os chamados SDCD (Sistemas Digitais de Controle Distribuído) ou DCS (*Distributed Control Systems*). Trata-se de uma camada que nem sempre estará presente.

5.5.2.5. *Sistema de comunicação*

É a camada responsável por levar os dados da locação de campo para a locação central onde a supervisão central se dará. Essa distância pode variar de centenas de metros a milhares de quilômetros, atravessando desde pequenos trechos planos até continentes inteiros. Varia bastante em termos de eficiência, confiabilidade custo, taxa de varredura e protocolos de contenção. A tendência de dutos novos é que todos disponham de fibras óticas, o atual estado da arte. Nos dutos antigos tem-se um pouco de tudo, desde enlaces de rádio analógicos até o uso de satélites de diferentes órbitas.

5.5.2.6. *Supervisão geograficamente distribuída*

É a camada onde o duto é controlado e todos os dados relevantes são recebidos em tempo real e historiados. Comunica-se com um número arbitrário de supervisões ou controles localmente distribuídos. Também conhecido como sistema supervisorio ou SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). É a partir da supervisão central que os dados de P , Q_G , Q_L , T , composição, ρ_G e ρ_L serão providos em tempo real às diversas funções avançadas de gestão operacional do duto, dentre elas detecção de vazamentos.

5.5.2.7. Aplicações de tempo real

No contexto desse trabalho é o mesmo que função avançada de controle operacional de dutos, conjunto no qual os sistemas de detecção de vazamentos se inserem.

5.5.3. Linhas

As linhas da **Figura 5.1** mostram como as camadas se comunicam entre si em termos lógicos e físicos, e quais incertezas e falhas advêm dessa comunicação, numa abordagem camada a camada.

5.5.3.1. *Linha física*

O instrumento de campo se comunica com o cartão de conversão análogo-digital via cabo 4 – 20 mA, que nada mais é que um conjunto de diversos cabos de baixíssimo diâmetro agrupados num conjunto único onde cada cabo é responsável por um tipo de sinal externado pelo transmissor. O cartão A/D por sua vez não apresenta padrão único, podendo se comunicar com o CLP através de uma série de diferentes padrões físicos, quase sempre vinculados a seu fabricante. Do CLP ao supervisor local, ou diretamente ao sistema de comunicação, quase sempre se tem o padrão físico 10 Base T da Ethernet, em 100 Mbit/s ou 1 Gbit/s, o mesmo acontecendo entre o SDCD e o sistema de comunicação. Do sistema de comunicação à supervisão central pode-se ter uma série de diferentes padrões físicos, desde fibras óticas até os mais diferentes tipos de comunicação via rádio. Finalmente do supervisor central até a máquina onde o sistema de detecção de vazamentos é executado, o padrão físico volta a ser o 10 Base T da Ethernet.

5.5.3.2. *Linha lógica*

A comunicação analógica entre o transmissor e o cartão de conversão A/D não apresenta padrão lógico por não ser digital. O que existe é uma convenção, uma espécie de protocolo cabeado definindo o sinal analógico de cada cabo. Entre o conversor A/D e o CLP existem diversos padrões lógicos no mercado, quase todos proprietários. A partir do CLP o protocolo lógico passa a ser predominantemente TCP/IP até chegar à máquina das aplicações em tempo real localizada fisicamente próxima ao supervisor central.

5.5.3.3. *Linha de falhas*

Havendo comunicação entre duas camadas, ela estará sujeita a falhas não importando quão confiável aparentemente seja. Assim, pelo menos a integridade do dado, i. e., se o número digitalmente enviado é o mesmo recebido, deve ser verificada em todos os enlaces de comunicação. Não obstante, conforme já comentado, cartões A/D podem adicionar incertezas à medição, além daquelas providas pelo elemento primário do instrumento. Entretanto, o ponto de maior risco é sempre a comunicação geograficamente distribuída, i. e., entre as locação de campo e de supervisão central. Nela residem os maiores riscos de queda ou falha na comunicação.

5.5.4. Protocolos de aquisição (contenção) de dados

São as abordagens de transmissão de dados empregadas pelo sistema de comunicação que têm por objetivo usar de forma racional e otimizada os recursos disponíveis de comunicação. Por exemplo, os estados de válvulas (aberto, fechado, ou trânsito) não precisam ser transmitidos a cada varredura (ou seja, por rajada), devendo sê-lo apenas quando há variação (por exceção). O mesmo se aplica a determinadas variáveis, e. g., temperaturas mínimas. Os parágrafos a seguir os definem com detalhes.

5.5.4.1. *Rajada (polling)*

Na abordagem por rajada (*poling*) o dado é transmitido em sua origem a cada varredura não importando se houve variação ou não.

5.5.4.2. *Exceção (exception)*

O dado somente é transmitido em sua origem caso uma variação acima de uma quantidade percentual configurável for transmitida (banda morta ou *deadband*). Cada transmissor terá a si associada uma dada banda morta, e nem todos poderão ser transmitidos por exceção; as variáveis mais importantes deverão ser transmitidas por rajadas (e. g., vazões e pressões na entrada e saída do segmento monitorado).

5.5.5. Descrição prática da arquitetura

Considere a **Figura 5.2** na qual os transmissores de campo (FT_G , FT_L , PT e TT) adquirem dados de Q_G , Q_L , P , T , bem como podem informar o carimbo de tempo no qual cada variável foi lida. Tais variáveis são transmitidas de maneira analógica num primeiro momento para um conversor analógico-digital. O protocolo físico é o padrão industrial 4-20 mA. O cabo 4-20 mA se conecta a alguma forma de conversor

analógico-digital onde o sinal dos diferentes transmissores são convertidos num valor digital.

A partir desse ponto o dado de campo é passado à máquina onde as aplicações de tempo real são executadas através da comunicação de dados em tempo real, seja ela: (i) direta com cada CLP localmente distribuído; (ii) direta com cada supervisão localmente distribuída ou (iii) direta com a supervisão central.

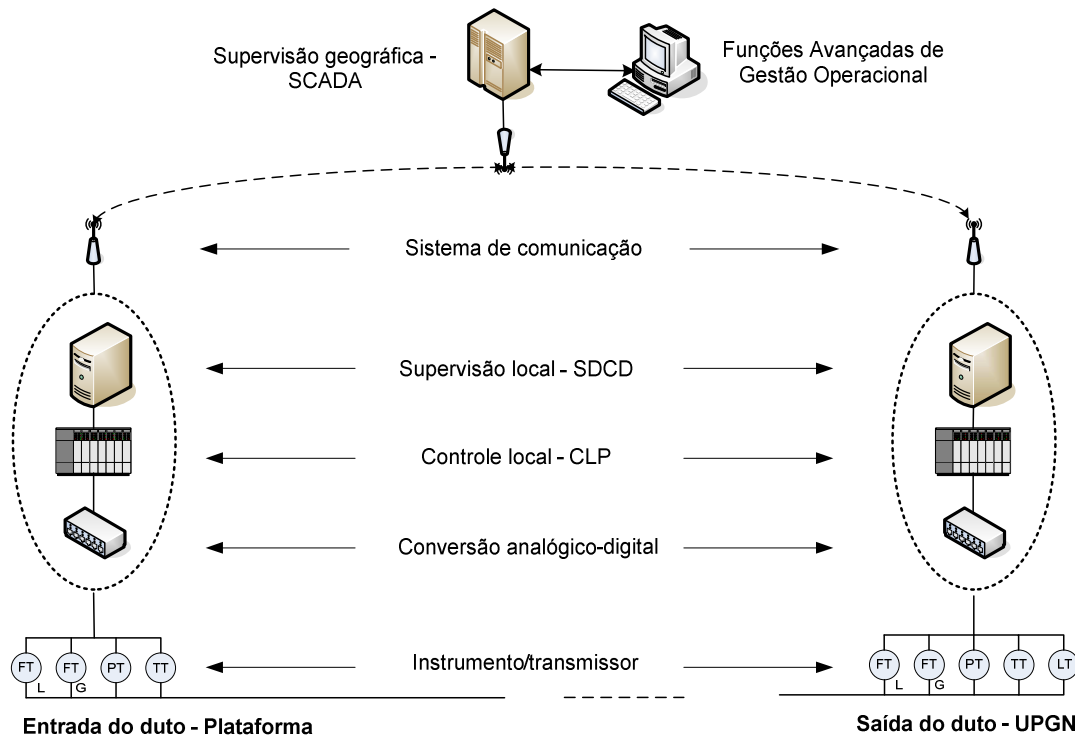


Figura 5.2 – Arquitetura geral de aquisição de dados das aplicações de tempo real em dutos

5.6. Módulos de software

De uma maneira geral essas aplicações apresentam a modularidade de acordo com a **Figura 5.3**. Considerando que são caracterizadas por um software que é executado em uma ou mais máquinas de “funções avançadas de tempo real” de acordo com a **Figura 5.2**, faz-se uma breve descrição de cada um desses módulos nos próximos parágrafos.

5.6.1. Módulo de aquisição de dados em tempo real

É o módulo que adquire dados em tempo real a partir de uma das três opções citadas no segundo parágrafo da **seção 5.5.5** (sendo a terceira opção a mais comum) e de acordo com algum protocolo específico. O protocolo mais comum no momento

do fechamento deste texto é o OPC (*OLE for Process Control*) o qual foi inicialmente criado pela Microsoft, compatível apenas com ambiente Windows, mas que se desvinculou de tal empresa, tornando-se um padrão para arquitetura universal em 2009 (OPC Foundation^[108]).

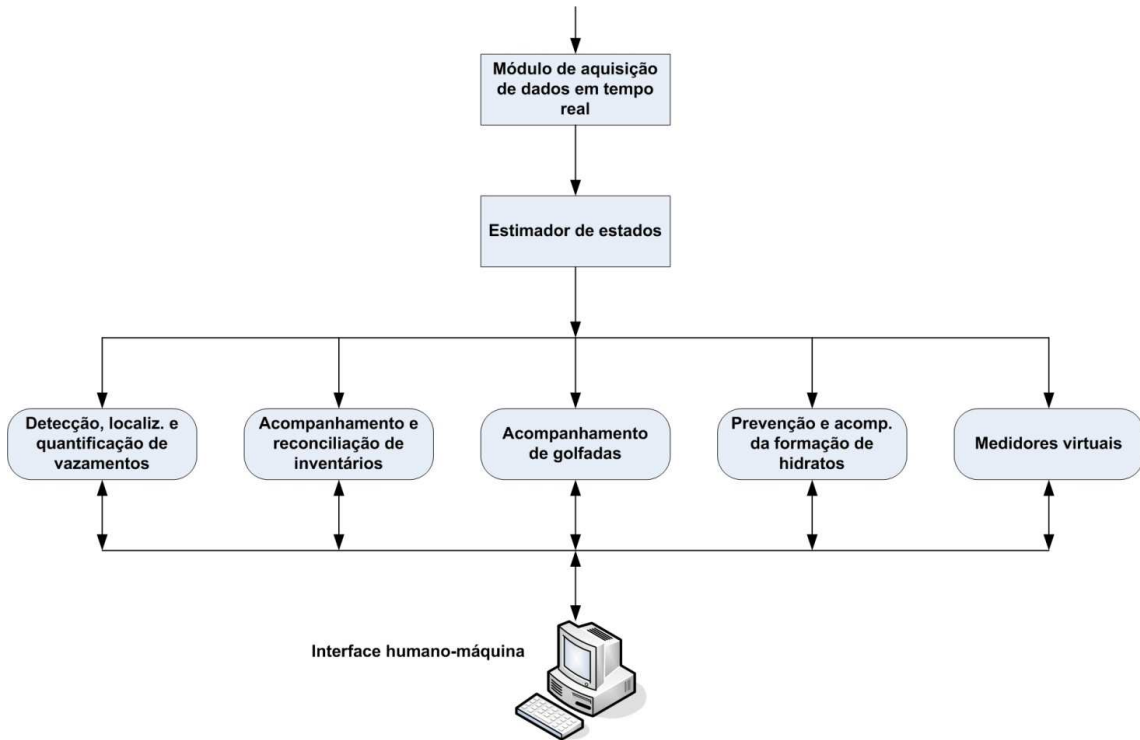


Figura 5.3 – Modularidade das funções de gestão operacional de dutos

Tal módulo é também responsável pela crítica dos dados. Busca-se identificar as falhas mais comuns observadas no trajeto dos dados desde o elemento primário da instrumentação no campo até sua chegada ao estimador de estado da aplicação de tempo real. Tais falhas são detalhadas nos próximos parágrafos.

5.6.1.1. Dado fora de integridade (“qualidade”)

Determina a qualidade da transmissão do dado, sua integridade, i. e., se o valor que foi transmitido foi aquele que foi efetivamente recebido. Lança mão de testes de bits, e. g., CRC (*cyclic redundancy check*).

5.6.1.2. Dado fora de faixa

É aquele que, embora sua qualidade seja boa, seu valor não corresponde a algo fisicamente dentro de uma faixa configurável. Por exemplo, para um transmissor de pressão absoluta, a faixa de validade é toda positiva. As faixas de validade são configuráveis por instrumento.

5.6.1.3. *Dado fora de incerteza ou ruidoso*

É o dado que após um número configurável de observações apresenta um ruído médio superior àquele configurado como sendo a incerteza média máxima daquela específica instrumentação, de acordo com a especificação do fabricante. O desafio aqui é diferenciar ruído de instrumentação de variação de processo.

5.6.1.4. *Dado preso*

É o dado que após um número configurável de observações apresenta um ruído médio bastante inferior àquele configurado como sendo a incerteza média da específica instrumentação, de acordo com a especificação do fabricante.

5.6.1.5. *Dado congelado*

É o dado que após um número configurável de observações apresenta o mesmo valor lido.

5.6.1.6. *Dado com falha aleatória (lobo solitário)*

É o dado que mesmo passando em todos os testes anteriores, apresenta um valor completamente incompatível com seu processo. Um exemplo seria uma pressão ascendente durante uma partida de bombeamento, e um dos dados na sequência seja relevantemente inferior a seu antecessor. Será um dado perfeitamente íntegro, dentro da faixa, dentro da incerteza, sem falha de comunicação e mesmo assim equivocado (causado provavelmente por alguma falha momentânea da eletrônica da instrumentação, dentre outras) sob o ponto de vista de processo. Devido à sua baixa frequência são conhecidos como lobos solitários (*lone wolves*).

Não existe filtro confiável para tais dados, devendo o sistema em si ser resistente à sua presença.

5.6.1.7. *Falha de comunicação*

A falha de comunicação já é naturalmente informada na qualidade do dado. No entanto é um acidente que se destaca, pois usualmente coloca o valor do dado congelado no limite inferior ou superior (depende do protocolo usado) da faixa da validade.

5.6.1.8. *Dado normal*

O dado normal guarda as seguintes características: (i) foi transmitido de forma íntegra, i. e., seus bits foram checados para consistência e apresentam qualidade

verificável, ou seja, não há qualquer falha de integridade; (ii) apresenta variações dentro de faixa de incerteza prevista para aquele instrumento particular, i. e., não há indícios de que esteja preso, congelado, fora de faixa ou ruidoso. O dado normal pode ser facilmente simulado por introdução de ruído controlado.

É também em tal módulo que é realizada a consistência da transmissão de dados. Os módulos abaixo deste somente trabalham com dados que cheguem na abordagem de transmissão tipo rajada (*polling*). Assim, é nele que a conversão de dados que chegam por exceção é realizada.

5.6.2. Suavização de dados (*data smoothing*)

As condições operacionais de dutos, e em particular dos gasodutos *offshore*, proporcionam grandes incertezas de medição da variável mais importante, não somente para operação, como também para detecção de vazamentos: a vazão volumétrica compensada da fase principal (gás). Mesmo depois de todas as críticas aplicadas, as vazões usualmente são obtidas de acordo com a **Figura 5.4.**, na qual os subscrito “cab” se refere à entrada do duto, e “cau” à saída. Nessa específica figura, a variável Q simboliza a vazão volumétrica compensada de gás.

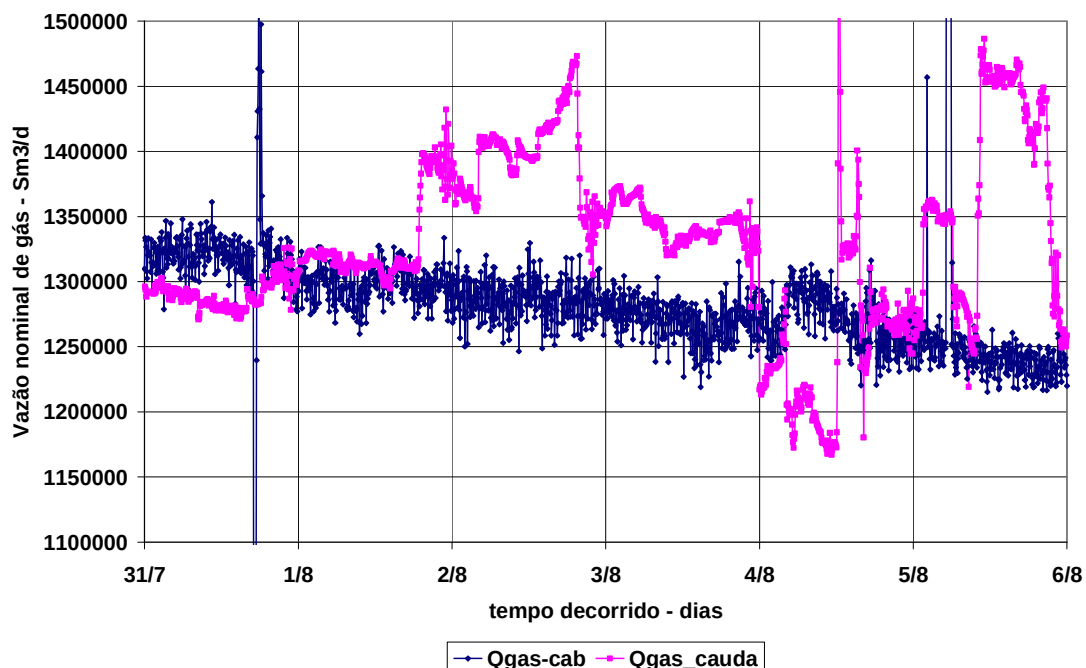


Figura 5.4 – medições reais de vazões volumétricas em gasodutos offshore

Considerando a grande não linearidade da formulação do escoamento (e. g., SPM-4, desenvolvida no **capítulo 2**), se esses dados forem usados dessa forma, aumentarão fortemente essas oscilações, e muitos dos casos sequer obterão solução (i. e., a solução divergirá).

Dessa forma, esses dados precisam ser suavizados, ou seja, há que se aplicar um tratamento no qual essas oscilações diminuam consideravelmente sem deixarem de representar bem o escoamento.

GAO ET AL.^[109] fazem um apanhado de tais métodos e aplicam as transformadas Wavelets como solução para este problema. SAVITZKY-GOLAY^[110] sugerem um filtro alternativo, onde a preocupação maior é a representação fidedigna não somente da curva de vazão, mas também de sua derivada. É importante observar que para o termo que considera a variação de inventário do gasoduto, a vazão volumétrica terá de ser derivada.

Para o objetivo deste trabalho, uma média móvel integrada num intervalo de 5 min. será empregada (ilustrada na **Figura 5.5**, aplicada sobre os dados da **Figura 5.4**) a qual demonstrará a importância da suavização, embora se saiba que as três opções anteriores ofereçam, em tese, resultados melhores. A mesmas observações tecidas para a figura anterior (5.4) valem para esta (5.5). O subscrito “suave” denota variável suavizada.

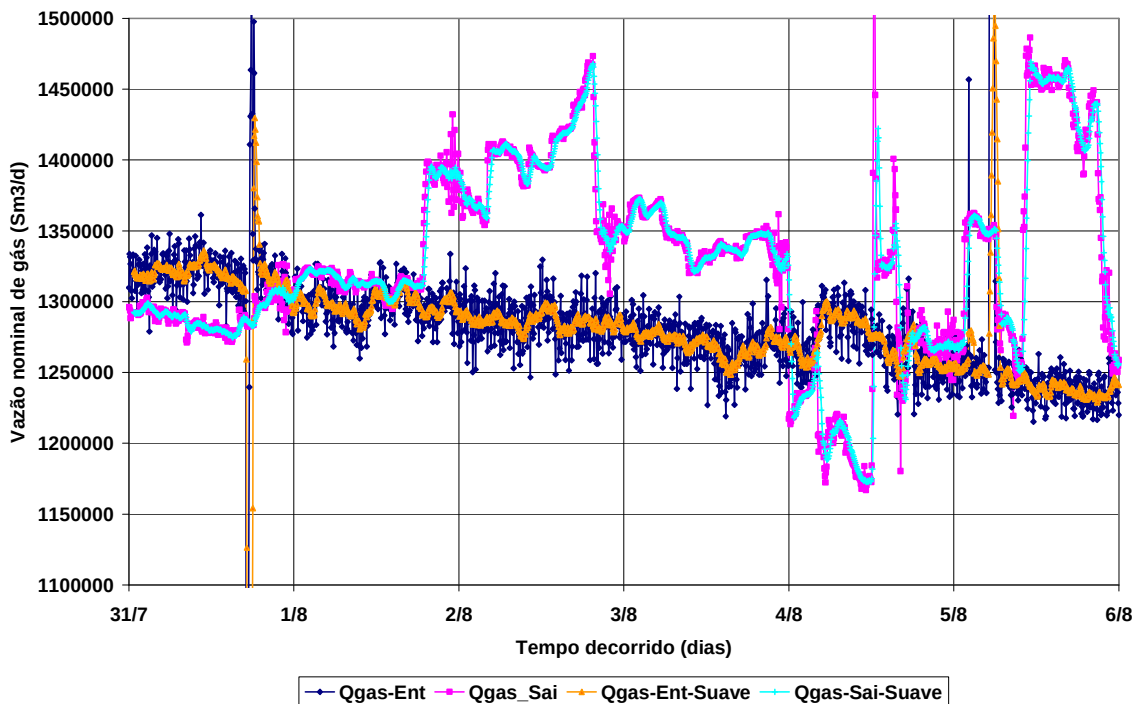


Figura 5.5 – Efeito da suavização em medições de vazões volumétricas de gás

A média móvel $\bar{X}_i$ da variável discreta X no tempo t_i , com base no intervalo (ou janela) de tempo Δt_i é definida por:

$$\bar{X}_i \equiv \frac{1}{\Delta t_i} \int_{t_i - \Delta t_i}^{t_i} X(t) dt \quad (5.1)$$

Considerando a forma mais simples de integração, e também que no intervalo Δt_i existem n_{mm} varreduras (ou dados que chegam), a média móvel é então calculada pela Eq. (5.2):

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n_{mm}} \sum_{k=i}^{i+n_{mm}+1} X_k \quad (5.2)$$

onde i é um índice que caracteriza a varredura do momento.

5.6.3. Estimador de estados (EE)

Tem por função determinar, através de simulação numérica do escoamento bifásico, variáveis relevantes do escoamento tais como P , Q_k , T e ρ_k para diferentes fases ao longo do duto e m_k (inventário) também para diferentes fases, porém para o duto como um todo, sendo todas elas determinadas em diferentes tempos. Tem como condição de contorno os dados medidos em tempo real que chegam a cada varredura. Sua função é entregar dados medidos e calculados das variáveis citadas a diferentes módulos abaixo de si. Cada módulo pode oferecer um benefício diferente conforme a **Figura 5.3**.

Na realidade trata-se de um jargão de campo (conceitualmente questionável) cuja origem vem da história da evolução dessas funções: como a arquitetura de automação da **Figura 5.2** foi desenvolvida por profissionais do segmento de automação, estendeu-se às funções a mesma nomenclatura usada nos elementos conceituais da instrumentação. Em tal segmento, quando se infere um estado de variável indiretamente numa dada posição, através de dados medidos em outra posição, usa-se a terminologia “estimador de estados”.

5.6.4. Sintonia do EE

Mesmo valendo-se da melhor modelagem teórica, “existiriam” diferenças relevantes entre o valor estimado pelo EE e o valor real obtido de campo, caso este não fosse “sintonizado” ou “calibrado”. Tais diferenças não são devidas a erros de instrumentação, elas acontecerão mesmo com um instrumento teoricamente exato. Elas ocorrem porque existem variáveis no sistema como um todo, a maior parte delas no EE, as quais não se consegue medir, apenas inferir, e seus valores mudam com o passar do tempo (algo como de um ano para o outro ou de uma estação do ano para

a outra). São as chamadas variáveis estocásticas, ou parâmetros de sintonia. Exemplos de tais variáveis: rugosidade da parede interna do duto, diâmetro interno real do duto, propriedades térmicas do solo tais como temperatura média e condutividade térmica, e mesmo algumas propriedades físicas dos fluidos. Tais variáveis são determinadas através de um processo de sintonia, onde se iguala o valor estimado ao valor real, e, com base em alguma tecnologia de ajuste chega-se ao valor dos parâmetros de sintonia. O processo de ajuste pode se dar desde a forma mais elementar de tentativa e erro, até por meio de processos estocásticos dinâmicos apoiados por peças de software inteligentes. A sintonia está diretamente associada ao EE, o qual não pode ser usado sem ser sintonizado. MODISETTE^[111] descreve as principais variáveis de sintonia num gasoduto ou oleoduto, e propõem um algoritmo baseada na máxima semelhança para sua execução. O mesmo autor as aplica à estimação de estados em sistemas de tempo real que são empregados tanto em gasodutos quanto em oleodutos na referência (MODISETTE^[112]).

5.6.5. Funções específicas

De posse das variáveis relevantes de processo, com cálculo ou estimativa feita em cima de dados validados, diferentes algoritmos aplicados sobre essas variáveis proverão diferentes benefícios. Esses benefícios caracterizam as diferentes e específicas aplicações de tempo real. Observe que essa arquitetura não se restringe a tais aplicações, mas se aplicam a qualquer controle de um processo de uma maneira genérica.

5.7. **Diferentes funcionalidades**

São diversas as funções de gestão operacional de dutos possíveis, respeitadas a forma de integração como serão implantadas. Faz-se seguir uma breve descrição de apenas algumas delas. É importante citar que cada cenário específico de atuação apresentará a necessidade de diferentes funções, e que o número dessas funções cresce à medida que a automação evolui.

5.7.1. Sistemas de detecção, localização e quantificação de vazamentos

Os sistemas de detecção de vazamentos monitoram um segmento de duto em tempo real, e têm como objetivo emitir um alarme toda vez que um vazamento ocorrer. Além da detecção, a depender da tecnologia empregada, estimam a localização do vazamento e procuram quantificar tanto a(s) vazão(ões) momentânea(s) quanto o(s) volume(s) acumulado(s) vazado(s). É o objetivo maior desse texto, estudar tais sistemas para o cenário de gasodutos bifásicos. O **capítulo**

6 traz um apanhado completo do estado da arte da tecnologia, comentando eventuais outros cenários vinculados a tecnologias de melhor desempenho por cenário.

5.7.2. Acompanhamento, cálculo e reconciliação de inventários

As funções de acompanhamento e cálculo de inventários acompanham o inventário total (quantidade de massa ou de volume expresso na condição padrão) de cada fase para todos os segmentos que compõem a rede de dutos em consideração, bem como executa seu cálculo a cada nova varredura de dados. Para tanto, leva em consideração eventos transientes e variações nas condições (vazões, pressões e temperaturas) nas diferentes entregas, e entradas de fluidos, de maneira a sempre respeitar o fechamento do balanço material na rede. Esse cálculo é também chamado “reconciliação” de inventários (*“inventory reconciliation”*). MAHGEREFTEH ET AL.^[92] abordam uma forma de realizar a reconciliação baseada em simulação de tempo real. HASAN ET AL.^[113] sugerem uma forma simplificada baseada em correlações empíricas para incluir as contribuições mássicas de poços e DUKHOVNAYA & ADEWUMI^[114] sugerem uma forma de fazê-lo empregando o método numérico TVD, descrito no **capítulo 3**.

5.7.3. Programação e acompanhamento de movimentações

A função avançada de programação e acompanhamento de movimentações estabelece, com base em demandas, tempos de trânsito estimados, disponibilidade de produtos e disponibilidade de tancagem ao longo da rede (no específico caso de líquidos), a ordem e quantidade da entrada das diferentes bateladas (ou cargas de gás) numa rede de dutos, com vista a entregas a clientes diferenciados. Esta função está na interface entre a gestão operacional e a gestão logística uma vez que o controle de entradas e saídas de massa na rede de dutos, bem como os volumes dos tanques posicionados ao longo da rede é puramente operacional, mas a razão que motiva tais entradas e saídas é de natureza comercial. Outra diferenciação é que em tese este sistema não necessariamente precisa ser de tempo real, uma vez que como o nome sugere é uma programação, a qual será obedecida ou não. HERRÁNA ET AL.^[115] propõem um algoritmo baseado em entradas sequenciais diferenciadas por ponderação de massa. Os autores nacionais BOSCHETTO ET AL.^[116] propõem abordagem alternativa: o algoritmo é baseado em programação linear inteira mista (MILP – *“Mixed Integer Linear Programming”*) de múltiplas entradas e saídas, as quais são modeladas como rotas otimizadas em grafo (estrutura de dados adequada à representação de um conjunto de pontos espalhados no espaço que definem rotas de qualquer natureza). Uma necessidade de praticamente todo sistema de programação

operacional é ter a si associado ou embutido um módulo de “reconciliação” de inventários, o que pode acontecer de uma maneira simplificada baseada somente em EE de regime permanente, ou em abordagem completa, que considere os efeitos transientes, especialmente para gasodutos, os quais passam relevante parte de sua operação em tal regime. Diversas outras referências enfocam esses algoritmos e suas variações tais como REJOWSKI JR. & PINTO^[117] e RELVAS ET AL.^[118].

5.7.4. Contaminação entre diferentes bateladas ou colchões

A movimentação de bateladas em polidutos é feita de forma sequencial sem qualquer separação entre elas, tais como os diferentes colchões de gás em gasodutos. Isso acontece porque tal comprimento contaminado usualmente é pequeno, e economicamente recomendado frente à inserção de qualquer elemento de separação.

As referências RACHID ET AL.^[119], e RACHID ET AL.^[120] trazem modelos que descrevem 08 (oito) diferentes formas de cálculo para comprimento contaminado, onde uma mais precisa é demonstrada em RACHID ET AL.^[121].

5.7.5. Acompanhamentos posicionais

Realizam acompanhamento da posição de pigs, esferas e bateladas em polidutos, de pigs, golfadas e frentes de colchões ou cargas de gás (oriundas de diferentes fontes) em gasodutos, todos em tempo real, quase sempre numa abordagem transiente, permitindo estimar seus tempos de chegada e de passagem por pontos específicos. Estima também volumes ou inventários anteriores e posteriores ao elemento de acompanhamento. Especial interesse para o cenário objeto deste trabalho é o acompanhamento de golfadas e pigs, uma vez que as posições desses elementos internos de escoamento influenciam diretamente o inventário transiente de cada fase dentro do gasoduto, bem como a identificação da posição de um eventual vazamento.

Para o acompanhamento de pigs ESMAEILZADEH ET AL.^[122] propõem uma modelagem suficientemente genérica para a descrição de seus movimentos dentro de dutos monofásicos, seja de líquidos ou gases. Baseia-se na dinâmica do pig e seu escorregamento, a qual pode ser estendida a escoamento bifásico, de acordo com o próprio artigo, além de oferecer vasta revisão bibliográfica sobre o assunto. XU & GONG^[124] particularizam o desenvolvimento especificamente para os gasodutos bifásicos objeto deste trabalho, onde fazem exatamente uma comparação de seu modelo proposto contra o modelo existente no simulador OLGA.

Para o acompanhamento de golfadas a literatura é mais diversificada. Há clara distinção entre três funções distintas: (i) acompanhamento posicional de golfadas; (ii) a descrição do mecanismo de aparecimento ou formação das golfadas UJANG, HEWITT ET AL.^[125], e (iii) a valoração mássica de cada fase presente nas golfadas (MAZZA ET AL.^[126]). Essas três distinções, entretanto se aplicam usualmente apenas às golfadas hidrodinâmicas. WANG ET AL.^[127] propõem um modelo de acompanhamento de golfadas baseado em experimentações feitas em escala piloto.

5.7.6. Acompanhamentos pontuais (Instrumentação virtual)

Realiza o acompanhamento de variáveis importantes para o processo de movimentação dutoviária tais como P , T , Q_k , ρ_k e α_k (*holdup*) em qualquer ponto do duto, não somente onde exista instrumentação. Uma decorrência desta função são as chamadas “instrumentações virtuais”, onde o cálculo é feito num ponto onde não existe instrumento, mas o valor da propriedade é necessário. Ou seja, faz uso direto e objetivo do EE para prever valores de variáveis importantes. As referências bibliográficas para este tipo de aplicação se confundem com as referências para os simuladores de escoamento em tempo real, já citadas nos **capítulos 2 e 3**, uma vez que a diferença relevante entre esses sistemas e os EE são as interfaces gráficas particularmente direcionadas a esta finalidade. Referências que reúnem uma compilação bibliográfica abrangente do estado da arte para abordagens tanto monofásicas quanto bifásicas incluem CHACZYKOWSKI^[61], MAHGEREFTEH ET AL.^[92], MODISETTE-1^[111] MODISETTE-2^[112] e HOLMAS^[79], sendo este último especificamente para o escoamento bifásico objeto deste estudo, porém com enfoque para fenômenos ondulatórios da pressão no escoamento.

5.7.7. Treinamento de operadores

Essa não é exatamente uma função de gestão operacional, mas de apoio à preparação de operadores, e existe para oleodutos, polidutos e gasodutos monofásicos, bem como para dutos bifásicos. Trata-se de um ambiente totalmente particularizado para o duto específico, onde há um console a partir do qual o simulador é operado como se fosse o duto alvo do treinamento, retornando valores e curvas muito próximos daqueles efetivamente verificados no duto real, sem a necessidade de alguma forma de interrupção das atividades normais da sala de operação, para treinamento. Cenários específicos são pré-configurados num ambiente de operação usualmente bastante semelhantes em termos de interface gráficas àqueles que o operador usará na operação real. HYLLSETH ET AL.^[123]

descrevem um produto comercial voltado para o treinamento na operação de gasodutos bifásicos.

5.7.8. Otimização do uso de energia para movimentação de fluidos

Realiza o acompanhamento em tempo real do consumo nas estações de bombeamento (oleodutos e polidutos) ou compressão (gasodutos) da rede de dutos, oferecendo sempre uma configuração ótima sob o ponto de vista de consumo ou entregas. Tal configuração informa qual máquina, de qual estação, deve estar ligada, em qual velocidade de rotação (ou outra variável equivalente para máquinas não rotativas), para que a maximização econômica do retorno se dê, sem a quebra de compromissos de entregas nem comprometimento da segurança. KLERNPOUS ET AL.^[128] propõem algoritmo para otimização do bombeamento de uma rede de distribuição de água. REJOWSKI JR. & PINTO^[117] fazem um apanhado completo da literatura, incluindo os algoritmos principais de otimização de redes, embora o artigo seja orientado a programação operacional.

5.7.9. Outros

Diversas outras funções ou aplicações de tempo real estão disponíveis tais como a estimativa de fator de fricção em tempo real (coadjuvante na investigação de corrosão) a e estimativa da eficiência de uso do duto em tempo real.

5.7.10. Funções típicas do cenário de gasodutos bifásicos

No domínio específico de interesse deste trabalho, i. e., os gasodutos bifásicos, são as seguintes funções usualmente empregadas pelas companhias operadoras: (i) acompanhamento de inventário de cada fase em tempo real; (ii) acompanhamento de pigs; (iii) predição em tempo real de formação de golfadas de líquidos, acompanhamento de sua posição e frequência; (iv) predição em tempo real da formação de hidratos (v); Acompanhamento de taxa de corrosão baseada na produção de CO₂ pelo aço da estrutura do duto, e, aquela considerada mais importante: (vi) detecção, localização e quantificação de vazamentos, objeto desta dissertação.

6. Modelos para detecção de vazamentos em dutos

6.1. Introdução

De acordo com o capítulo anterior, os sistemas de detecção, localização e quantificação de vazamentos caracterizam uma das aplicações de tempo real em dutos, talvez a mais importante delas sob o ponto de vista operacional. Conforme já citado, esse trabalho aborda apenas a função detecção (i. e., desvinculado das funções de localização e quantificação de vazamentos) no domínio dos gasodutos bifásicos.

A variação do cenário usualmente implica numa variação grande da tecnologia, onde alguns cenários oferecem abundantes opções, e. g., os oleodutos monofásicos com pequenos espaçamentos entre tomadas de medição, e em outros o desafio de prover uma tecnologia com desempenho minimamente aceitável persiste, como o cenário aqui abordado.

É importante esclarecer que o principal benefício buscado pelas operadoras de dutos são as detecções confiáveis de vazamentos, que podem ocorrer nas piores situações, e. g., na troca de turno de operação, durante a madrugada numa linha cujo maior segmento esteja em locação *offshore*, em área de proteção ambiental, ou densamente povoada.

Outro paradigma importante e intuitivo, mas por vezes desconsiderado, frente à expectativa gerencial no desempenho do sistema (tal é o volume de recursos que custa), é que sistema de detecção de vazamentos não evita vazamentos. Como o nome sugere, para detectar, há que vazar. Busca-se de fato a menor quantidade vazada até que a detecção seja alarmada, quantidade esta chamada sensibilidade do sistema (API-01^[1], CSA^[2], API-1155^[132]).

Os vazamentos são de fato evitados pelos procedimentos periódicos de inspeção de dutos (API-1160^[134]) tais como passagens de pigs, controle criterioso da corrosão interna e externa, inspeções visuais onde for possível, etc., os quais envolvem outro patamar de investimentos, relevantemente superior ao da monitoração online.

Nesse texto o termo LDS (“leak detection system”) é empregado para descrever qualquer sistema de detecção de vazamentos de sorte para evitar confusões que uma eventual transliteração da sigla para o português traria: SDV (sistema de detecção de vazamento) seria facilmente confundido com as válvulas de segurança (“Safety Discharge Valve”).

6.2. Resultados Desejados

Um sistema de detecção de vazamentos usualmente oferece as seguintes funcionalidades: (i) detecção do vazamento; (ii) localização do vazamento; (iii) tempo estimado de início do vazamento; (iv) vazão estimada de vazamento, a partir da detecção, a cada varredura do sistema; (v) quantidade vazada, a partir da detecção; e (vi) monitoramento da vazão vazada após à detecção.

Essas funcionalidades devem abordar todos os modos de operação do duto em questão. Por exemplo, num oleoduto, deve funcionar plenamente em: (i) regime permanente, caracterizado por uma vazão aproximadamente estabilizada ou constante; (ii) na partida e na parada da bomba ou do poço, que caracterizam regimes transientes; bem como (iii) na parada estática pressurizada do duto, o que significa ausência de entrada ou saída de fluido mas envolve a presença de um complexo fenômeno de escoamento ondulatório dentro do duto. Os mesmos modos operacionais valem para os gasodutos, respeitadas as semelhanças, a menos da parada estática pressurizada, que dificilmente ocorre, mormente em seu tramo principal.

De acordo com os objetivos citados no **capítulo 1**, este texto trata apenas a funcionalidade de detecção de vazamentos, abordando alguns conceitos importantes também à funcionalidade quantificação de vazamentos, sem, no entanto descrevê-la ou desenvolvê-la.

Já a funcionalidade localização de vazamentos exige outro domínio de conceitos não coberto neste trabalho, e que poderá ser objeto de trabalhos futuros.

Observa-se por oportuno que a maioria dos sistemas existentes trabalha apenas com a hipótese de um único vazamento acontecer por vez no segmento monitorado, i. e., nenhum deles está projetado para lidar com vazamentos concomitantes ou

simultâneos. Embora algumas tecnologias possam detectá-los, dificilmente os localizarão e os quantificarão de forma individualizada.

6.3. Estatísticas da indústria

Diversos organismos regulatórios dispõem de estatísticas onde cada uma delas é tabelada por diferentes extratos, e. g., causas, custos, fluidos, sensibilidade da área afetada dentre muitas outras. Tais dados ajudam a compreender as falhas mais recorrentes em incidente envolvendo vazamentos, bem como prever custos em planejamentos de todas as naturezas, inclusive atuariais.

Outro benefício importante das estatísticas é permitir dividir os vazamentos de dutos em dois tipos, a saber:

- (i) aqueles que se desenvolvem lentamente, tais como uma relevante parte dos vazamentos causados por corrosão ou qualquer outra razão estrutural que provoque uma trinca ou “furo” de lenta propagação;
- (ii) vazamentos abruptos, que ocorrem praticamente de forma instantânea.

Essa distinção será crucial no momento da escolha da tecnologia, uma vez que algumas tecnologias, e. g., todas as tecnologias que se valem da captura nos contornos do duto, de onda de pressão gerada pelo vazamento (as ditas tecnologias acústicas de detecção de vazamento) que se propaguem pelo fluido, não apresentam desempenho satisfatório no primeiro grupo.

6.3.1. Americanas

O departamento de transporte dos EUA (DOT/USA) delega a administração das estatísticas de vazamentos em dutos à agência PHMSA (*Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration* – Administração da segurança de dutos e materiais perigosos). Um complexo sistema de base de dados permite a elaboração da busca por diversas categorias além de prover o relatório oficial de cada acidente. Considere a **Figura 6.1** a qual ilustra as principais causas de vazamentos em gasodutos de transporte dos EUA, no último intervalo válido de vinte anos (1993-2012).

A discussão acerca de qual causa provoca vazamentos lentos ou abruptos é subjetiva e usualmente elemento controverso de disputa entre fornecedores de tecnologias. Por exemplo, é conhecido que os pits de corrosão, bem como algumas falhas em soldas geram vazamentos que se desenvolvem de forma bastante lenta, levando até alguns minutos do momento que a falha tem início até sua forma final. Por outro lado os vazamentos causados por escavação externa tendem a ser

abruptos. Mas serão todos eles? E o que dizer sobre “dano por força natural” que inclui desde as movimentações de terrenos até furacões, tornados, terremotos e maremotos. O que pode ser efetivamente afirmado é que ambos acontecem, em proporções suficientemente relevantes para não serem desconsiderados. Dizendo de outra forma, o duto não pode ser monitorado apenas para vazamentos abruptos, ou apenas para vazamentos lentos, mas deve sê-lo para a integridade dos casos.

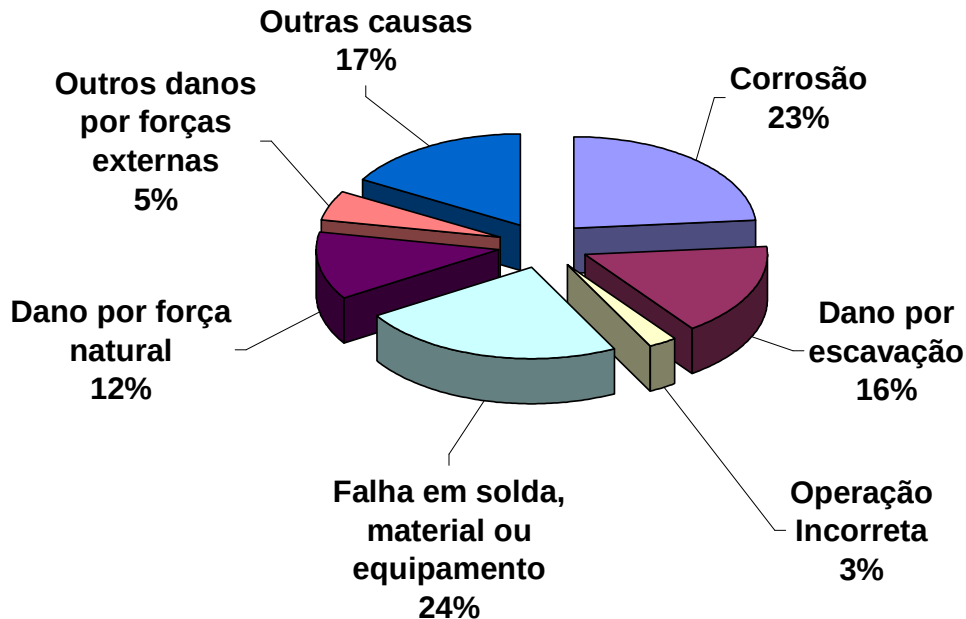


Figura 6.1 – PHMSA: causas de vazamentos em oleodutos nos EUA (1993 – 2012)

O PHMSA tenta reduzir, desde 2009, a subjetividade de tal discussão ao classificar o tipo de liberação de produtos (**Tabela 6.1**), bem como o tipo do vazamento (**Tabela 6.2**) e não mais somente suas causas.

Tabela 6.1 – Tipo de liberação (PHMSA^[130])

Tipo de liberação	
Termo em português	Termo em inglês
Vazamento	<i>Leak</i>
Ruptura	<i>Rupture</i>
Perfuração mecânica	<i>Mechanical Puncture</i>
Outros	<i>other</i>

Tabela 6.2 – Tipo de vazamento (PHMSA^[130])

Tipo de vazamento	
Termo em português	Termo em inglês
Falha em selo ou vedação	<i>Seal or packing</i>
Pequeno furo	<i>Pinhole</i>
Trinca/fenda	<i>Crack</i>
Falha em conexão	<i>Conection failure</i>
Outros	<i>Other</i>

Tais classificações, bem como a classificação da causa dos vazamentos, são sujeitas a regras aprovadas por diferentes níveis de autoridades dentro do DOT, podendo em maior nível, ter seus critérios objetivos votados no congresso americano, estando assim mais regulamentadas.

6.3.2. Europeias

Diferentemente dos EUA, as estatísticas europeias não estão agrupadas por um órgão único capaz de cobrir todo o continente de forma tão abrangente e livremente liberada. Deve-se em parte a pulverização de legislações e regulamentações que ocorrem por países. Há, no entanto uma iniciativa de um grupo de quinze companhias operadoras de linhas de transporte gás (*European Gas Pipeline Incident Data Group – EGIG*) que publica trienalmente estatísticas sobre acidentes (a última publicada foi em 2011). Considere a **Figura 6.2** que traz as principais causas de acidentes em gasodutos europeus consolidados em média móvel de 5 anos, de 1974 a 2010.

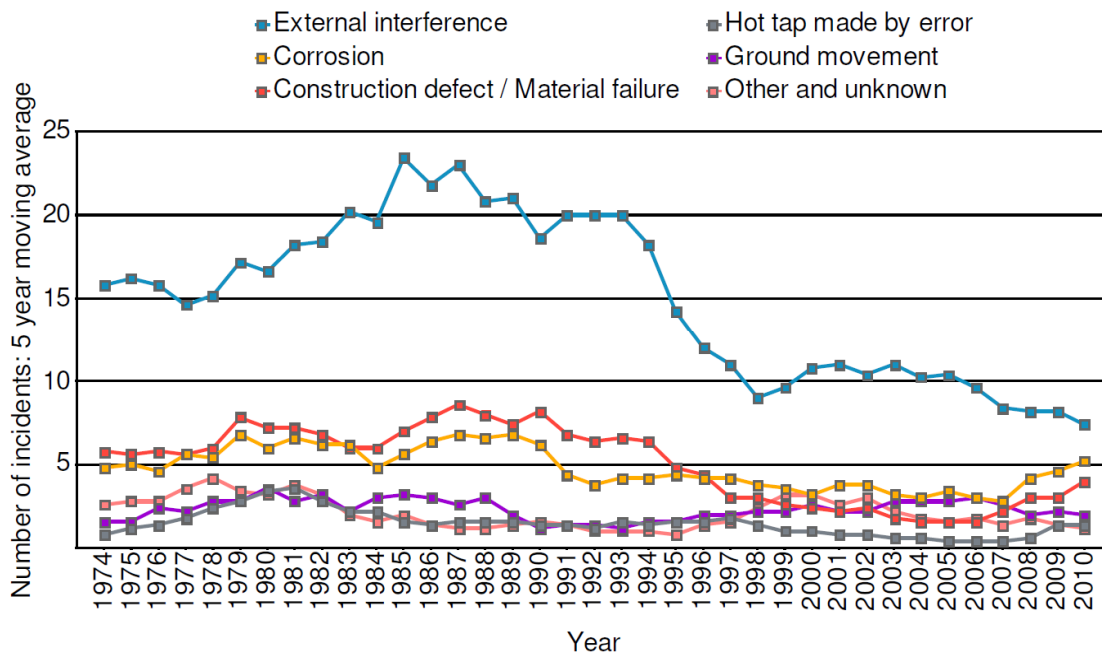


Figura 6.2 – EGIG: causas de vazamentos em gasodutos de transporte europeus

6.4. Caracterização fluidodinâmica de vazamentos em dutos

6.4.1. Nos contornos do segmento monitorado

O vazamento tem um comportamento fluidodinâmico típico num trecho de duto sob monitoração, independentemente do fato do escoamento ser bifásico ou não. Considere um vazamento atmosférico acontecendo num segmento de duto num ponto a jusante de uma estação de bombeamento, de compressão, ou mesmo da cabeça

de um poço (ambos apresentarão comportamento semelhante). No momento em que ocorre o vazamento, as pressões na entrada e na saída do segmento caem, devido ao alívio atmosférico causado pelo vazamento. A reação fluidodinâmica da bomba, compressor ou poço a tais quedas é um aumento na vazão da entrada do segmento monitorado, ajustando seu desempenho à nova curva de sistema gerada. Um novo ponto de equilíbrio é gerado após o transiente do vazamento, comportando-se a partir daí como uma saída lateral de massa em regime aproximadamente permanente. Teoricamente todos os vazamentos, onde o duto encontra-se em regime permanente antes do vazamento acontecer, acontecem dessa forma.

O comportamento da vazão de saída é dependente do processo naquele ponto. É comum cair num primeiro momento para alimentar o vazamento, mas à medida que a pressão de saída também cai, a vazão se recupera parcialmente. Assim o fará até o limite de fornecimento do poço bomba ou compressor na entrada do duto, num transiente que pode variar de poucos minutos a muitas horas, a depender do comprimento do duto e da natureza de seu inventário.

Embora seja de trivial identificação fenomenológica, sua modelagem e simulação numérica não são simples, uma vez que promove nos contornos do segmento monitorado a queda aleatória de duas condições: pressão e velocidade (i. e., vazão). Uma delas precisa ser prescrita de alguma forma.

Considere o exemplo a seguir, realizado sobre o mesmo gasoduto exemplo usado nas simulações do **capítulo 4** (100 km, 12 in, horizontal). Neste exemplo tal duto será chamado de segmento de duto, pois fará parte de uma pequena rede de três dutos criada especificamente para estudar comportamento de vazamentos. O simulador usado foi o OLGA^[5].

De maneira a permitir a observação do comportamento fluidodinâmico nos contornos do segmento de duto, a simulação foi modelada de acordo com a **Figura 6.3**. Colocou-se um primeiro segmento de duto do mesmo diâmetro e 50 km de comprimento à montante do segmento original (MONT_SEG, na figura), bem como outro segmento de duto de mesmo diâmetro e 15 km de comprimento a jusante do segmento original (JUS_SEG, na figura).

Ou seja, busca-se analisar o comportamento de um segmento de duto de 100 km (SEG, na figura) que se encontra entre estes dois segmentos anteriormente citados. As condições de contorno foram fixadas nos contornos de entrada do segmento de montante (MONT_SEG) e de saída no segmento de jusante (JUS_SEG). Este procedimento foi necessário de maneira a permitir a simulação da variação de

pressão e vazão simultaneamente nos dois contornos contornos do segmento de interesse (SEG).

A razão para a escolha dos comprimentos dos segmentos de montante e jusante foi meramente intuitiva, i. e., como no segmento próximo à entrada a pressão é maior, a perda de carga por atrito é também maior.

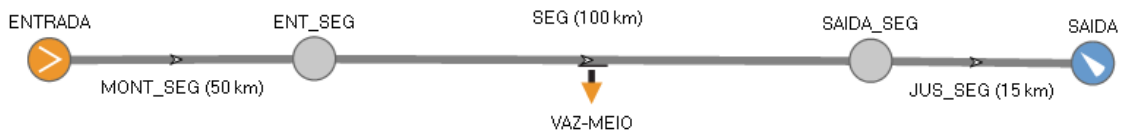


Figura 6.3 – Esquemático da simulação de comportamento de vazamentos

Um vazamento de 1,0 in é aberto no meio do segmento, no instante $t = 2\text{h}$, de forma abrupta, i. e., seu diâmetro vai de 0 a 1 in em 1 s. A **Figura 6.4** ilustra os dados da operação em regime permanente, de 0 a 2 h, e os comportamentos decorrentes de pressão e vazão mássica total de mistura bifásica na entrada e na saída do duto, após a abertura do vazamento.

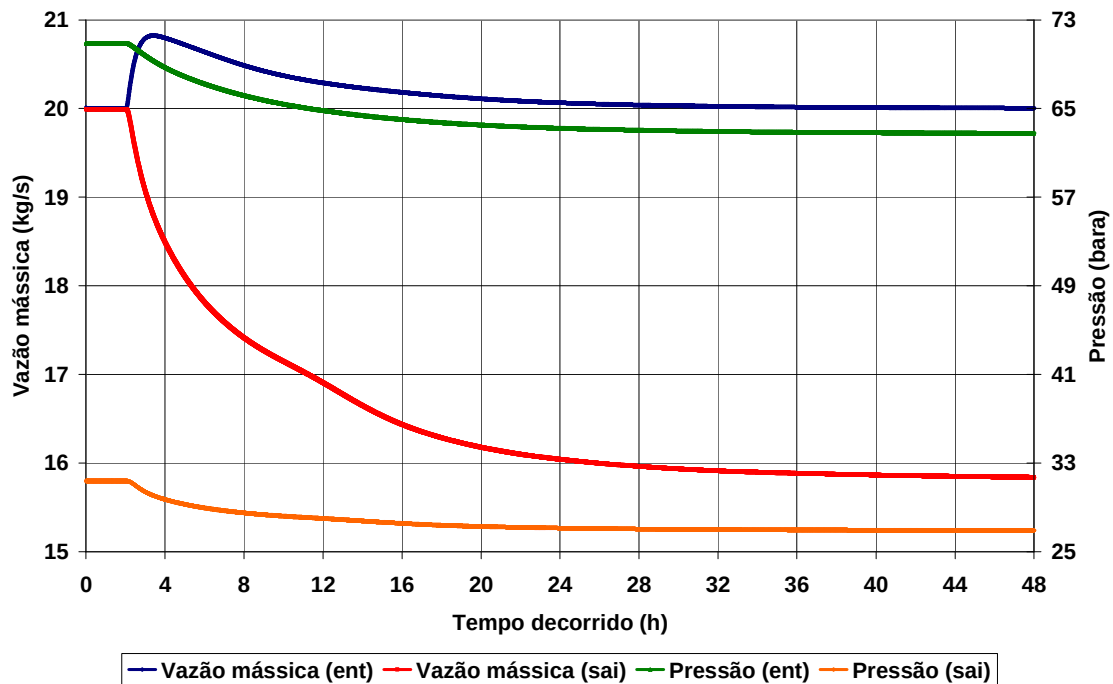


Figura 6.4 – Comportamento de pressões e vazões mássicas de entrada e saída

O exemplo simulou um total de 48 h, sendo 2 h em regime permanente e as 46 h seguintes a reação ao vazamento.

A curva azul representa a vazão na entrada do duto, a qual cresce para compensar a vazão vazada. Essa compensação se dará de acordo com a capacidade

do eventual poço ou sistema de produção como um todo em continuar fornecendo massa. A curva vermelha representa a vazão na saída a qual cai devido ao vazamento que lhe subtrai massa.

Ao abrir o vazamento, que neste caso é atmosférico, a pressão da linha como um todo cai, i. e., as pressões de entrada (curva verde) e saída (curva laranja) caem. Isso ocorre devido por que o vazamento provoca, a partir do momento em que é aberto, a propagação de uma onda de pressão em direção aos contornos do duto a qual comunica o alívio atmosférico.

Há duas categorias de efeitos de pressão no vazamento:

- (i) Efeitos rápidos: um fenômeno ondulatório de alta frequência (100 Hz a 1 KHz) que viaja em direção aos contornos na velocidade sônica do fluido, descontada da velocidade do escoamento, no sentido contra fluxo e acrescida da velocidade do escoamento no outro sentido. A amplitude desse sinal de pressão é altamente dependente de quão rápido o vazamento foi gerado bem como da relação entre o diâmetro da falha (vazamento) e o diâmetro do duto. Esse efeito é de difícil simulação numérica uma vez que os passos de tempo requeridos seriam da ordem do inverso de suas frequências;
- (ii) Efeitos lentos: queda de pressão (da ordem horas) perceptível após o fenômeno ondulatório citado em (i), e ilustrado na **Figura 6.4**.

6.4.2. No ponto do vazamento

Uma vez gerado o vazamento, tem-se um escoamento radial unidimensional bifásico do interior para o exterior do duto, através de sua parede. Uma vez que a fase predominante no interior do duto é gás, tal escoamento será crítico sempre que a relação entre a pressão absoluta interna e externa ao duto for superior a aproximadamente 2,0 (BAPTISTA^[93]), haja vista que:

$$\frac{P_0}{P^*} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{1-k}} \quad (6.1)$$

onde P^* é a condição crítica ou afogada representada pela jusante do escoamento radial (que mais se aproxima do lado de fora do duto) e P_0 é a condição estagnada representada pela condição de montante de tal escoamento caracterizada pelo lado de dentro do duto, uma vez que a abordagem desse escoamento radial é também

puramente unidimensional. A variável k o coeficiente termodinâmico do gás, que na idealidade vale 1,4, e é caracterizado pela relação (C_p/C_v).

A definição de k , para o específico interesse do escoamento sônico, muda consideravelmente quando o gás passa a se distanciar do comportamento ideal, de acordo com a Eq. (6.2) (BAPTISTA^[93]):

$$k = \frac{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P}{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P + \frac{P}{T}\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T} = \frac{T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V}{T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V + P\left(\frac{C_v}{C_p} - 1\right)} \quad (6.2)$$

As derivadas parciais termodinâmicas acima podem ser calculadas a partir de uma equação de estado que aborde gases e líquidos, bem como permita regra de misturas (uma vez que todo gás natural, bem como todo condensado são composições de diferentes hidrocarbonetos) para compor seus parâmetros. Um exemplo é a Eq. de PENG & ROBINSON^[13]. A **Figura 6.5** ilustra a variação de k com a pressão, fixada a temperatura em 20 °C para o fluido caracterizado na **Figura 4.1**, usado nos exemplos até aqui, gerada com o simulador comercial PVTSIM^[100].

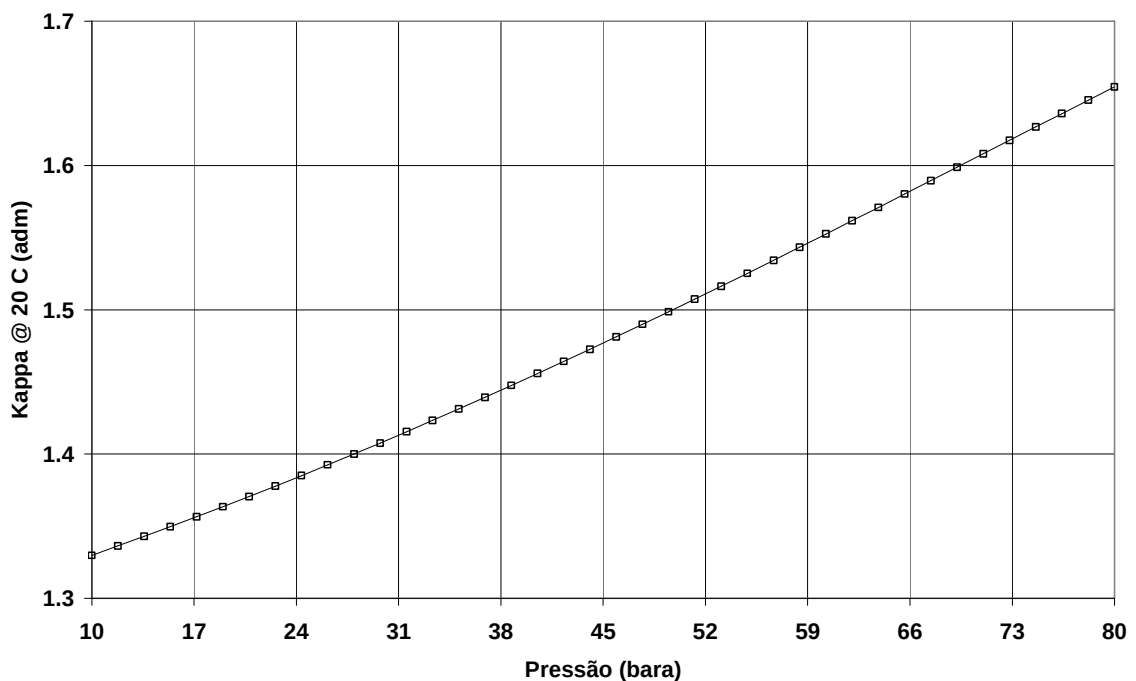


Figura 6.5 – Ex. de variação de k contra P @ 20°C num gás real

A pressão estagnada no vazamento do exemplo anterior segue na **Figura 6.6**. Observe que a pressão estagnada se confunde com a pressão no interior do duto.

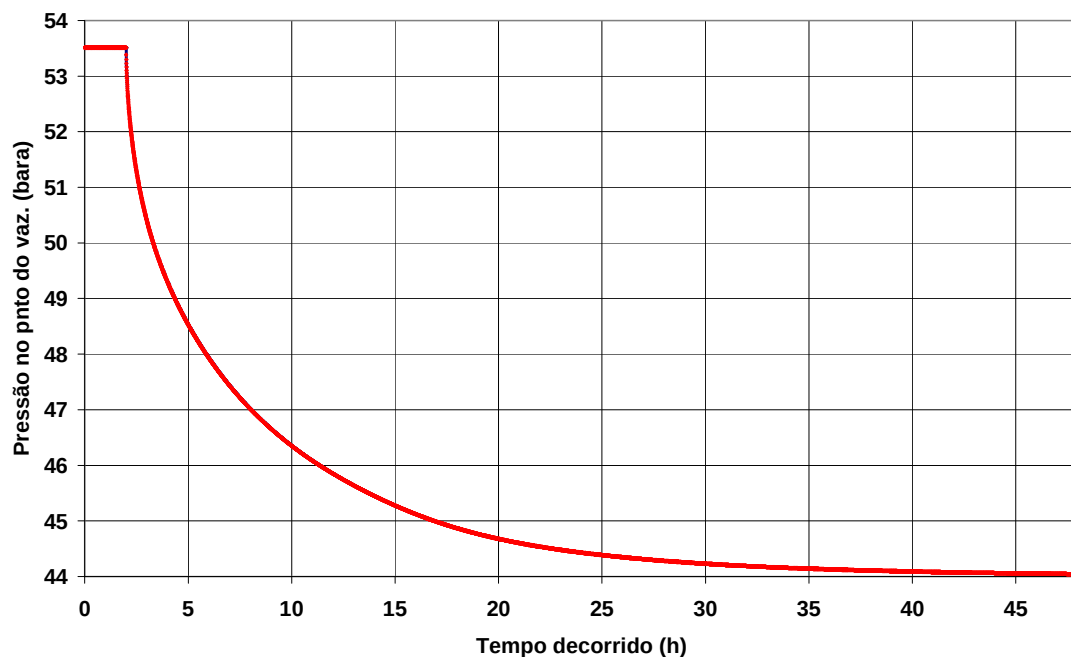


Figura 6.6 – Pressão estagnada no ponto do vazamento

Na prática quase todos os vazamentos em gasodutos são sônicos, a menos que uma coluna d'água relevante esteja presente no ambiente externo, no caso de um duto *offshore*, o que causaria uma relação inferior a aproximadamente 2,0 (e. g. um gasoduto fluindo a 150 bara numa lamina d'água de 1000 m). Assim uma garganta sônica se estabelece no ponto de vazamento, cujo equacionamento de vazão de gás segue na Eq. (6.3) (BAPTISTA^[93]):

$$\dot{m}_{G0} = \frac{\pi}{4} \cdot C_D \cdot a_0 \cdot \rho_0 \cdot D_{VAZ}^2 \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1} + \frac{1}{2}} \quad (6.3)$$

onde C_D é o coeficiente de descarga (usualmente 0,84^[7]), a_0 e ρ_0 são respectivamente a velocidade sônica e a massa específica do gás calculadas na condição interna ao duto e D_{VAZ} é o diâmetro equivalente do vazamento.

A vazão de líquidos vazada é integralmente dependente do padrão de escoamento que se desenvolve em cada ponto do duto. Por exemplo, na chegada do pig à saída duto, a seção transversal se enche de líquido (padrão golfada), transformando um pequeno trecho próximo ao final do duto num escoamento semelhante ao de um oleoduto. No padrão estratificado, tal vazão é calculada com base em propriedades *PVT*, uma vez que se assume equilíbrio entre as fases líquido e vapor para aquela específica condição de P e T .

Assim são cinco as possíveis vazões “vazadas” num vazamento de gasoduto bifásico, ilustradas na **Figura 6.7**:

- (i) a vazão (mássica ou volumétrica padrão) de gás na condição estagnada (interior do duto), representada pela curva preta ($\dot{m}_{G0}$);
- (ii) a vazão (mássica ou volumétrica padrão) de líquidos na condição estagnada (interior do duto), representada pela curva azul ($\dot{m}_{L0}$);
- (iii) a vazão (mássica ou volumétrica padrão) de gás na condição afogada (exterior do duto), representada pela curva vermelha ($\dot{m}_G^*$);
- (iv) a vazão (mássica ou volumétrica padrão) de líquidos na condição afogada (exterior do duto), representada pela curva verde ($\dot{m}_L^*$);
- (v) a vazão mássica total, a única em que se conserva, tanto no lado estagnado quanto no lado afogado (desprezando-se os curtos efeitos transientes no transporte do gás no trajeto do interior para o exterior do duto), representada pela curva marrom ($\dot{m}^* = \dot{m}_L^* + \dot{m}_G^* = \dot{m}_0 = \dot{m}_{L0} + \dot{m}_{G0}$).

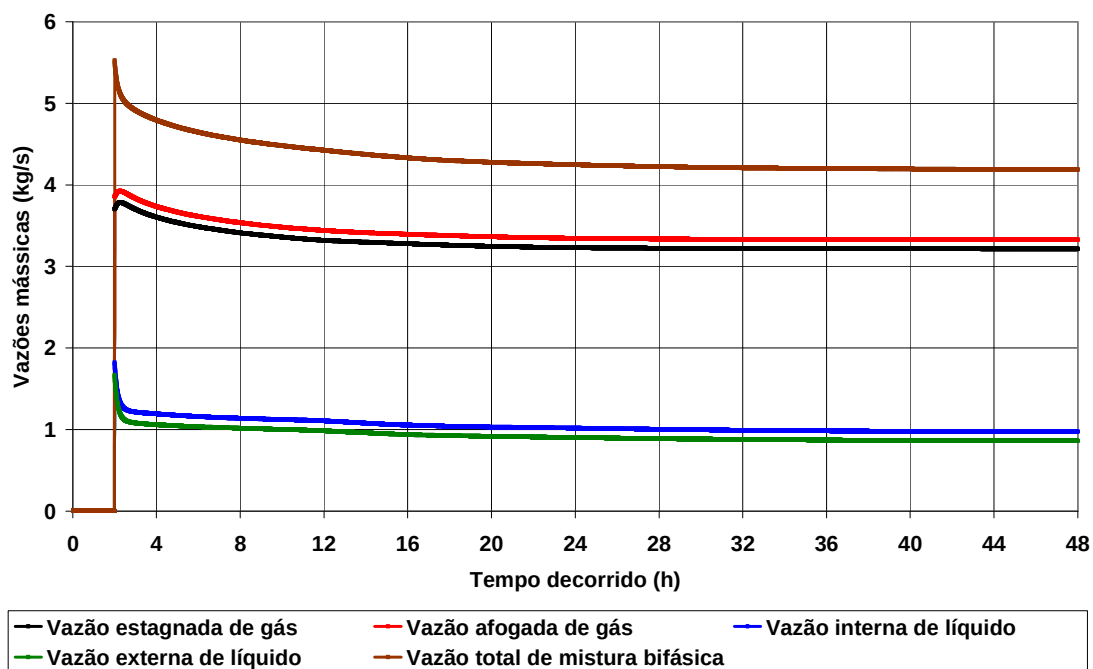


Figura 6.7 – As cinco vazões mássicas presentes num vazamento sônico

As vazões mássicas de gás são diferentes nas condições estagnada e crítica, uma vez que estão em condições distintas de P e T . O mesmo pode ser dito para as vazões de líquidos. Assim, há relevante transferência de massa entre fases quando a mistura bifásica atravessa a garganta sônica, devido a fenômenos de mudança física

de fase bem com de solubilidade de uma fase na outra, uma vez que esta também é função forte de P e T .

6.5. Caracterização termodinâmica (ou PVT) de vazamento em dutos

Considerando o cenário de gasodutos no momento da abertura do vazamento, independentemente de sua forma ser abrupta ou lenta, há uma grande expansão da fase gás do interior do duto para a atmosfera (ou mesmo para um ambiente externo pressurizado que esteja numa pressão absoluta inferior à cerca da metade da pressão interna).

No contorno (radial) desse problema, a troca térmica por difusão é praticamente nula dada a velocidade do gás (KATZ & LEE^[137]). Como não há qualquer parte móvel nesse sistema termodinâmico, não há trabalho de eixo sendo executado ($W_s = 0$). Assim tem-se um processo isentálpico, uma vez que:

$$\Delta H = q - W_s \quad (6.4)$$

Tal expansão caracteriza, por definição, o efeito Joule-Thompson (KATZ^[138]), ou Joule-Kelvin (SMITH & VAN NESS^[135]) e provoca uma redução da temperatura nas vizinhanças da parede do duto onde se dá o vazamento. A **Figura 6.8** demonstra tal efeito.

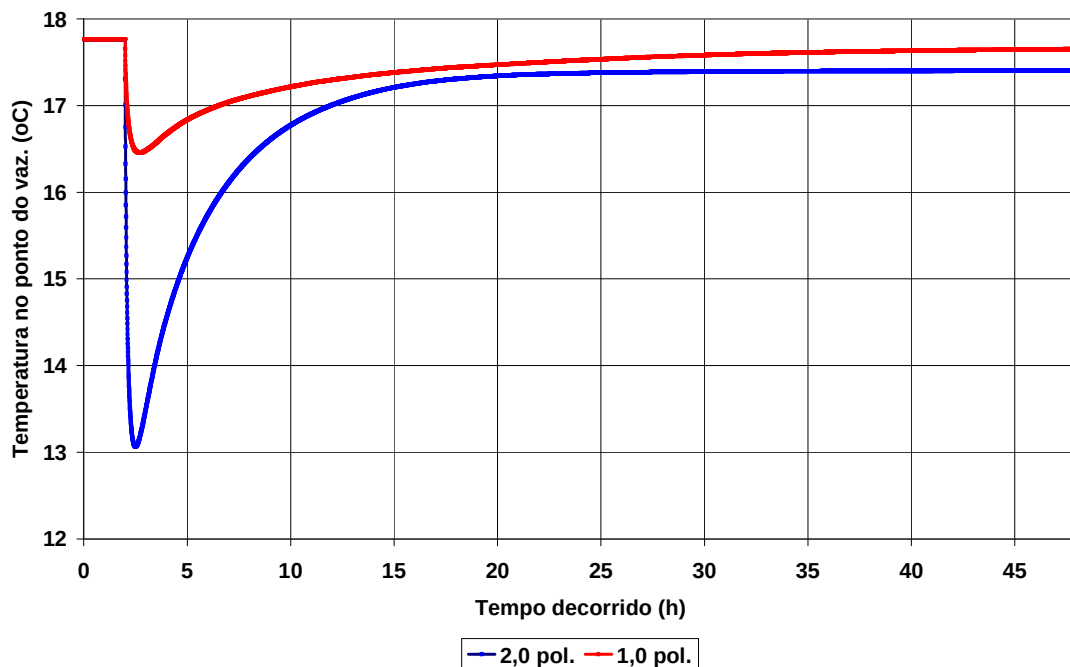


Figura 6.8 – Efeito Joule-Thompson para furos de 1,0 e 2,0 in no ponto do vazamento

6.6. Parâmetros de desempenho

Há pouca referência na literatura acadêmica ou mesmo aberta sobre parâmetros de desempenho de sistemas de detecção de vazamentos em dutos. Este assunto parece estar mais restrito a documentos oficiais de organismos reguladores, tais como o *American Petroleum Institute*, e. g., API-1130^[1], *Canadian Standard Association*, e. g., CSA-Z662^[2] ou mesmo publicações fechadas, egressas de consórcios de operadoras, ou de uma específica operadora, tal como SHELL-GB^[142]. Duas podem ser as razões dessa realidade:

- (i) as pesquisas acadêmicas estão preferencialmente direcionadas ao parâmetro sensibilidade de detecção e sua reprodução apoiada em modelagens teóricas – a revisão bibliográfica demonstrou essa realidade, onde praticamente todos os artigos analisados, e. g. COLOMBO ET AL.^[143], sequer comentam a existência do parâmetro confiabilidade, um dos mais importante na indústria e nos organismos normativos;
- (ii) o distanciamento entre os experimentos pilotos e o duto real, que impactam diretamente a confiabilidade. De fato, se comparados os experimentos pilotos com as condições de operação de dutos reais, estes normalmente trabalham com números de Reynolds por vezes duas ordens de magnitude inferiores.

O número de Reynolds é um parâmetro básico de um ensaio que busque similaridade em dutos (SEDOV^[144]). Nos experimentos pilotos alguns elementos cruciais da confiabilidade são de difícil reprodução sendo o mais importante o grande tempo requerido de reação (inércia dinâmica) existente nos transientes devidos a grandes espaçamentos entre tomadas de medição que existem nos dutos reais (tipicamente centenas de quilômetros), especialmente em gasodutos mono ou bifásicos.

Assim, esse trabalho adota os parâmetros preconizados por API-1130^[1] e CSA-Z662^[2] e CFR 195^[140]. Os três são dedicados a oleodutos o que pode levantar questionamentos sobre sua pertinência a gasodutos. O DOT-USA, entretanto, os usa também para gasodutos, conforme cita e KIEFNER & ASSOCIATES^[139], documento regulatório daquele organismo, em sua página 2-12, itens 1 e 2:

“1 – In our opinion many of the leak detection regulations in 49 CFR 195 – especially expressions of principles and procedures – apply in large part equally well to gas pipelines.

2 - *In our opinion, the API RP 1155 that describes the principles of how to assess the performance of a leak detection system on a liquids pipeline also applies equally well to gas pipelines*".

Assim, assume-se que os parâmetros de desempenho preconizados por tais referências valem para os gasodutos deste trabalho. Dentre as três referências acima citadas, três parâmetros de desempenho são comuns e considerados os mais importantes: confiabilidade, sensibilidade e exatidão, os quais são definidos nos próximos parágrafos por ordem de importância, i. e., do mais importante para o menos importante, com base nas composições textuais das referências citadas.

6.6.1. Confiabilidade

A confiabilidade mede a habilidade do sistema em evitar falsos alarmes, somente indicando vazamentos realmente existentes. Para todos os efeitos, uma indicação de vazamento deve parar a linha. O custo de uma parada desnecessária é muito alto, descredenciando o próprio sistema como um todo, caso recorrente. Os parágrafos a seguir descrevem passagens importantes da literatura a respeito:

- KIEFNER & ASSOCIATES^[139], pág 4-8: *"Reliability: this means that the system must correctly report any real alarms, but it is equally important that the system does not generate false alarms"*; Pág 4-27: *"Reliability is further split into the probability of detecting a leak, given that a leak does in fact exist (misses), and the probability of incorrectly declaring a leak, given that no leak has occurred (false alarms)"*;
- API RP 1130^[15], págs 13-14: *"This is defined as a measure of the CPM's ability to render accurate decisions about the possible existence of a leak on the pipeline while operating within an envelope established by the CPM design. A system is considered more reliable if it consistently detects actual leaks without generating incorrect declarations. For example, in the selection criteria above, the feature "Be available during transients" would be a reliability consideration"*;

Ou seja, há um entendimento no qual a confiabilidade envolve três verificações com possíveis medições associadas:

- (i) a existência de falsos alarmes, falsos positivos ou alarmes espúrios (indistintamente tratados como o mesmo conceito neste documento) seja qual for a sua justificativa (**C1**);

- (ii) a cobertura efetiva pelo sistema do conjunto de situações operacionais que o duto experimenta em sua operação corriqueira, incluindo estáticas, transientes de partida, transientes de parada, corridas de pigs, e variações de pressão e vazão de acordo com algum evento comum, e. g., entrada de um novo poço ou queda/aumento de demanda na saída do duto (C2);
- (iii) que o sistema alarme objetivamente sempre que um vazamento ocorrer dentro da condição de sensibilidade esperada (C3).

Dois outros conceitos objetivos são vinculados a confiabilidade como decorrência, i. e., como interpretação comum dos acima descritos:

- (iv) Inexistência de falsos positivos “conhecidos”: não existem falsos positivos conhecidos, no domínio de operação normal do duto (estática, regime permanente, e quaisquer transientes causados por passagem de pig, aumento ou queda de capacidade). Um alarme é sempre um alarme e deve parar a linha. A constatação é trivial haja vista haver sempre possibilidade provada da existência de vazamento real numa condição onde o falso positivo ocorra com frequência. Isso ganha especial importância quando o falso positivo ocorre em transientes de aumento de pressão, também conhecidos como empacotamentos, i. e., nas partidas de duto e nos aumentos de capacidade, uma vez que tal situação expõe o duto a maiores esforços advindos da transferência de momento linear do fluido para a estrutura (C4).
- (v) Avalanche de alarmes: de forma simplificada, avalanche de alarmes significa uma quantidade de alarmes maior que a capacidade do operador em interpretá-los em tempo hábil de tomada de decisões, sejam eles falsos ou verdadeiros. É intuitivo o fato de que de nada adianta alarmes acurados, se precisarem ser verificados (e todo alarme tem de ser verificado) num tempo maior que o requerido pelo operador para tomar decisões, especialmente quando parte deles for espúria (C5).

Uma observação: no contexto do API RP 1130^[1], a sigla CPM, *Computational Pipeline Monitoring*, é sinônimo de sistema de detecção de vazamentos em dutos.

Não existem medidas padrão para esse critério, sendo usualmente avaliado em número de alarmes falsos observados num dado período de tempo. É um dado contratual, onde é comum ver-se empresas exigindo um determinado prazo, e. g., 90

dias, sem falsos alarmes, após a instalação do sistema (“*commissioning*”), para a aceitação do mesmo em campo.

6.6.2. Sensibilidade

A sensibilidade determina a maior ou menor capacidade do sistema detectar o menor vazamento, no menor espaço de tempo possível. É expressa em termos de uma quantidade vazada até a detecção. Usualmente é levantada em pontos específicos do duto, e é descrita num gráfico de tempo de detecção, contra vazão vazada expressa em percentual da vazão instantânea do duto. O menor vazamento detectável por um sistema, neste caso expresso sob a forma de uma vazão, é também um importante dado de sensibilidade.

- API RP 1130^[1], pág 14: “*Sensitivity is a composite measure of the size of a leak that a system is capable of detecting, and the time required for the system to issue an alarm in the event that a leak of that size should occur*”

Ou seja, há um entendimento no qual a sensibilidade envolve duas verificações com medições associadas:

- (i) um tamanho mínimo de vazamento que o sistema seja capaz de detectar, independentemente do tempo. Opcionalmente em vez de um tempo uma quantidade vazada pode ser usada (**S1**);
- (ii) o tempo no qual esse vazamento mínimo é capaz de ser detectado (**S2**).

Sistemas baseados em modelos que analisam desbalanceamentos de inventário, empregando taxa de varredura aproximadamente constante, apresentam comportamento hiperbólico (API RP 1130^[1]), ou uma curva que tem comportamento aproximadamente hiperbólico (RACHID ET AL.^[119]), tendendo para uma quantidade vazada até a detecção aproximadamente constante, independente do tamanho do vazamento. A **Figura 6.9** traz uma consideração teórica deste conceito de sensibilidade hiperbólica (API-1155^[132]).

Nem todos os sistemas de detecção apresentam sensibilidades hiperbólicas. A análise trivial do tempo de trânsito de uma onda de pressão num duto sugere teoricamente que o tempo de detecção é constante e independente do tamanho do furo a ser detectado (API-1155^[132]).

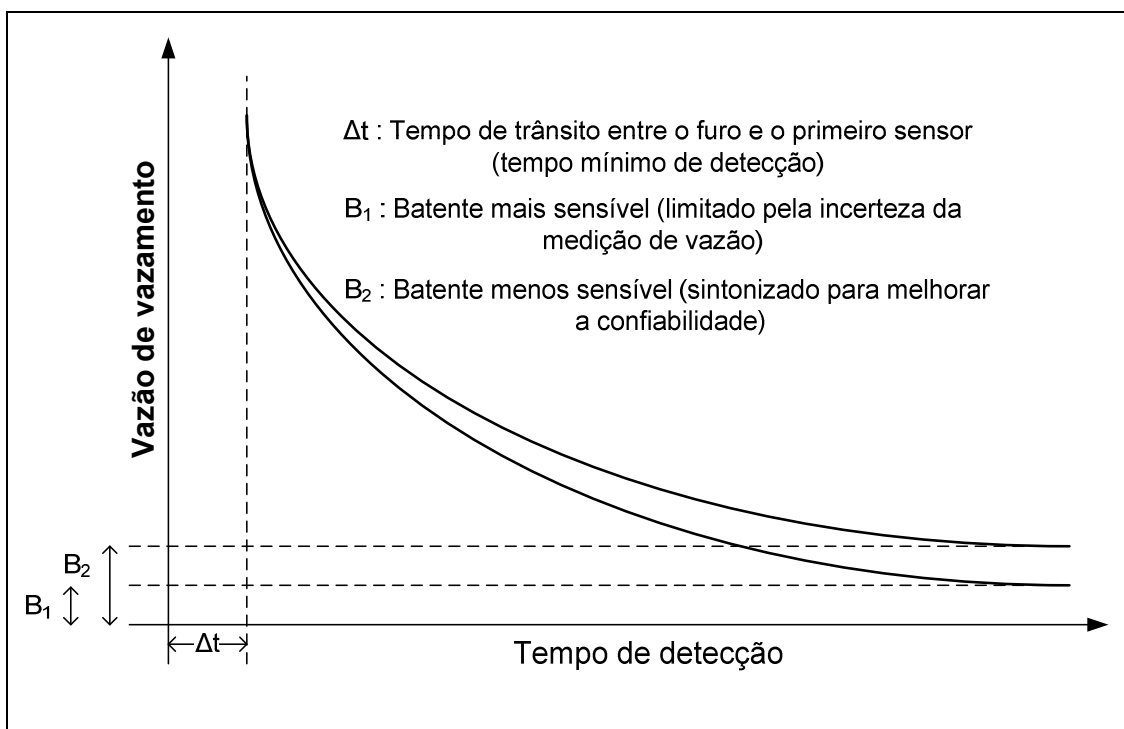


Figura 6.9 – Sensibilidade hiperbólica

Na prática, a menos dos balanços fluidodinâmicos de inventário, a maior parte dos sistemas apresenta uma sensibilidade entre esses dois casos limite (hiperbólica e tempo de trânsito constante). RACHID ET AL.^[119] demonstram que a curva de sensibilidade para os sistemas baseados em desbalanceamentos de inventário não é exatamente hiperbólica, embora tenha um formato semelhante.

6.6.3. Exatidão

Mede a proximidade que os dados reportados pelo sistema têm com a realidade. A exatidão se aplica usualmente à localização e à quantificação do vazamento, duas funcionalidades não cobertas por esse trabalho.

6.6.4. Outros parâmetros

A robustez é um parâmetro associado à capacidade do sistema continuar operando, ainda que de forma degradada, mesmo quando um canal de dados fica indisponível (i. e., perde-se um instrumento). A robustez é usualmente expressa através do número de canais independentes capazes de prover a função detecção de vazamentos (CSA-Z662^[2]).

Em 2002 o API realizou uma investigação dedicada a sistemas de detecção de vazamentos que de alguma forma chegassem, ou cruzassem aeroportos, se conectando de alguma forma à tancagem desta localidade (API-4716^[145]). Para este

cenário particular foram definidos seis novos critérios específicos: especificidade, aplicabilidade, compatibilidade, operabilidade, manutenibilidade e repetitividade. São parâmetros completamente análogos aos mesmos observados no domínio da instrumentação, e não apresentam universalidade, mas caracterizam bom exemplo de parâmetros outros que não os constantes no API RP 1130^[1], estes sim, universalmente aceitos.

6.7. Desempenho de acordo com a posição do furo no segmento monitorado

6.7.1. Introdução

O desempenho de um LDS é diferente ao longo do segmento monitorado. Faz-se listar princípios que se aplicam para todos os sistemas cujas tecnologias se baseiem em propriedades físicas que trafeguem pelo fluido (mais à frente serão classificados como sistemas internos).

(i) os sinais de pressão e vazão transmitidos pelo fluido trafegam à velocidade média de transito da onda de pressão naquele fluido;

(ii) para a detecção há necessidade apenas de o sinal viajar do ponto da falha até o sensor mais próximo;

(iii) para a localização há a necessidade de o sinal viajar do ponto da falha até ambos os sensores que o circundam.

As consequências de tais princípios definem as posições mais fáceis e difíceis de se detectar e localizar vazamentos, abordadas nos próximos parágrafos.

6.7.2. Posições de melhor detecção

A detecção será mais rápida quanto mais próxima a falha estiver de um dos instrumentos de medição instalados no segmento monitorado. O mesmo vale para a exatidão de quantificação. Assim vazamentos próximos à entrada, ou à saída serão detectados mais rapidamente que aqueles próximos ao meio do segmento monitorado. O furo próximo à entrada será marginalmente mais rapidamente detectado uma vez que normalmente possui a pressão maior.

6.7.3. Posições de melhor localização

A localização será mais rápida quanto mais próxima do centro do segmento monitorado estiver a falha, entre duas tomadas de medição. Assim furos próximos ao meio do segmento serão não somente detectados mais rapidamente como

provavelmente com uma incerteza menor. Analogamente, o ponto de pior detecção será sempre próximo à saída do segmento monitorado.

6.8. Revisão bibliográfica

6.8.1. Aspectos gerais

Por se tratar de um assunto que lida diretamente com impactos ambientais, sociais, econômicos e de consequências objetivas na rotina operacional de dutos, muitas referências são documentos de organismos reguladores, tais como o departamento de transporte dos EUA, através de seu escritório oficialmente criado para tal, o PHMSA^[146], o organismo normativo canadense CSA-Z662^[2] ou o americano API.

Por outro lado por caracterizar grande interesse industrial das operadoras de campos e dutos, há ainda muita bibliografia reservada, oriunda de projetos contratados por estas ou grupos formados por diversas delas, tais como o PRCI^[147] e o SWRI^[148].

Outra característica das referências bibliográficas é que existe pouca referência em português, especialmente para o domínio de gasodutos bifásicos.

6.8.2. Classificação de tecnologias

Esta seção abrange o trabalho de revisão bibliográfica das principais tecnologias de detecção de vazamentos em princípio sem restrição de cenário de aplicação, a qual se dá na sequência do texto.

Não se identificou um padrão universal para as nomenclaturas do assunto, mesmo em língua inglesa, assim serão aqui aplicados os conceitos preconizados pelo API RP 1130^[1] e descrito nas seções que seguem.

6.8.3. Sistemas internos

Os sistemas internos são chamados de CPM (*“Computational Pipeline Monitoring”*) pelos API's RP 1130^[1] e 1155^[132]. Sua premissa básica é o fato do sensor diretamente envolvido com a função detecção de vazamentos tocar o fluido, ou pelos menos medir ou inferir a propriedade de interesse na condição interna do duto, usualmente do escoamento lá existente.

De uma maneira geral, com exceção das tecnologias acústicas, as quais não se classificam bem nesta categoria (embora assim sejam definidas pelo API RP 1130^[1]), os sistemas internos são sistemas de software apoiados por hardware. O núcleo da

solução é desempenhado pelo software, e não há necessidade da adição de qualquer outro elemento de automação, fora daqueles tradicionalmente usados para operar o duto (tais como sensores específicos ou CLP's dedicados para executarem funções direcionadas apenas a tecnologia de detecção de vazamentos).

Sob o ponto de vista tecnológico, são quatro as famílias de tecnologias mais importantes desta classificação:

6.8.3.1. Modelos fluidodinâmicos de tempo real

Os modelos fluidodinâmicos de tempo real analisam o escoamento em tempo real a partir das equações físicas que os governam. São desenvolvidos para dutos que transportam os seguintes fluidos:

- líquidos altamente incompressíveis como a água COLOMBO ET AL.^[143];
- hidrocarbonetos líquidos, tais como Diesel, querosene, gasolina e GLP (gases liquefeitos de petróleo – uma mistura especificada de propano e n-butano), onde a compressibilidade apresenta uma importância relativa (BAPTISTA^[149], LIOU^[150], GAIGER^[151], E ABHULIMEN & SUSU^[152]).
- gases, ou misturas bifásicas de fase predominante gás, onde a compressibilidade apresenta uma importância crucial nos longos transientes (ABBASPOUR ET AL.^[48] e ABHULIMEN & SUSU^[153]).

Tais modelos inferem a existência de vazamentos através da diferença entre a variável sentida (usualmente P , Q ou inventário, m) e aquela predita pelo modelo onde, no específico caso do inventário, ter-se-á um balanço volumétrico ou material.

6.8.3.2. Modelos estatísticos de tempo real

Também analisam variáveis de escoamento como vazão e pressão em tempo real, mas usam modelo estatístico como premissa básica para detectar vazamentos, (DIBLASI & MURAVCHIK^[154] E TU ET AL.^[155]), usualmente baseado em testes de probabilidade para eventos seqüenciais (WALD^[156]).

6.8.3.3. Tecnologias baseadas em lógicas dedicadas ou sistemas especialistas

São caracterizados por quaisquer variações dos sistemas anteriormente citados que apoiem suas decisões acerca da existência de vazamentos em novos algoritmos ou heurísticas de inferência tais como: sistemas especialistas baseados em lógica de conjuntos ou “ensembles”, vinculadas ou não à lógica Fuzzy (LAURENTYS ET AL.^[157]) ou Fuzzy C (LIANG ET AL.^[158]); regras de aprendizado ou inferência de

valores, “*Belief rules*” (ZHANG ET AL.^[159], ZHOU ET AL.^[161] E XU, ET AL.^[162]); sistemas puramente apoiados em lógica Fuzzy (SILVA ET AL.^[163]); sistemas apoiados em redes neurais; ou mesmo sistemas apoiados em algoritmos genéticos (TANAND ET AL.^[164]). Se por um lado procuram melhorar a confiabilidade da decisão através do uso de aprendizado de uma maneira geral, por outro se limitam pelas mesmas restrições de sensibilidade encontradas nos modelos, especialmente no que diz respeito à medição de vazão. A forma de aprendizado também requer preocupações adicionais uma vez que um evento mal aprendido comprometerá a confiabilidade que em essência é aquilo que se deseja maximizar.

6.8.3.4. Modelos baseados em princípios de otimização

São caracterizados por variações dos modelos anteriormente descritos, apoiando, no entanto a decisão acerca da existência de vazamentos em observadores de estado lineares (GEIGER ET AL.^[165]), ou não lineares (BILLMANN & ISERMANN^[166]). Em um modelo autorregressivo MIMO (“*Multi Input Multi Output*”) são definidos parâmetros distribuídos, bem como parâmetros do tipo “*lumped*” (GEIGER ET AL.^[165]). VAZ JR. ET AL.^[167] propõem preditores lineares do tipo ARX-MIMO (*Autoregressive Exogenous MIMO*). Observadores de estado não lineares para gasodutos monofásicos são propostos por BILLMANN & ISERMANN^[166]. É mais uma tentativa de melhoria da confiabilidade, se restringindo pela sensibilidade existente nos modelos citados. A depender da complexidade do modelo usado tanto para descrever o escoamento quanto para detectar vazamento, o sistema em si requer extremo poder de computação, podendo requerer tempos de processamento maiores que o tempo real em sistemas de computação monoprocessados.

6.8.3.5. Análise de pressão em pontos - PPA

A análise de pressão de ponto em tempo real (PPA – *Pressure Point Analysis*) essencialmente estabelece uma correlação estatística (usualmente a distribuição t de Student) entre a pressão média da linha antes e depois do vazamento para inferir acerca da sua existência (FARMER E.^[169] e FARMER E.^[168]). Na realidade é uma tecnologia que desconsidera todos os outros efeitos transientes, de sorte que somente pode ser empregada em regime permanente.

6.8.3.6. Tecnologias acústicas

As diversas e diferentes tecnologias acústicas têm como premissa captar, detectar um pico primário da onda de pressão que pode ser gerado por alguns seletos

tipos de vazamentos, bem como o tempo de trânsito de tal pico entre o ponto do vazamento e um sensor (LI ET AL.^[170] e XU ET AL.^[171]).

Estas duas últimas tecnologias descritas em 6.8.3.5 e 6.8.3.6, embora tenham seus sensores (que são sempre sensores de pressão) também tocando o fluido, são fracamente vinculadas ao escoamento no interior do duto como elemento relevante no algoritmo de detecção de vazamentos, de sorte que apesar de serem sistemas internos, podem ser entendidos como sistemas “mistos” ou “híbridos”. De qualquer forma são descritas e comentadas nas **seções 6.12 e 6.13**.

6.8.4. Sistemas externos

Usam sensores dedicados montados sempre de alguma forma externa ao duto, e a variável sentida também o será de forma externa ao duto. De uma maneira geral são sensores de presença de hidrocarbonetos, condutividade elétrica, pressão, vibração e temperatura, dentre outros. Seus algoritmos de detecção analisam o sinal e não se vinculam o escoamento. De uma maneira geral constituem sistemas de hardware, apoiados por software. São sempre 100% dedicados e proprietários e usam pouco ou nada a infraestrutura de automação convencional do duto.

Um importante salto tecnológico nesta classificação são os sistemas baseados em fibras óticas lançadas na própria faixa do duto, onde o corpo da fibra serve tanto como elemento de comunicação, quanto como o próprio sensor, normalmente associado a alguma forma de medição de pressão (ai incluídas as vibrações) e temperatura. A fibra é lançada na mesma faixa do duto estando fisicamente bastante próxima a este (distância inferior a um metro). No caso de um vazamento, normalmente duas são as tecnologias empregadas: o sensoriamento distribuído de temperatura (DTS – “*Distributed Temperature Sensing*”), que detecta um abaixamento súbito de temperatura num dado ponto, diferente dos demais, causados pelo efeito Joule Thompson associado a um vazamento, especialmente vazamento de gás; bem como o sensoriamento acústico distribuído (DAS – “*Distributed Acoustic Sensing*”) que detecta a vibração num dado ponto próximo ao duto, também diferente dos demais pontos, que é causada pelo vazamento. A DAS oferece ainda outros benefícios tais como a detecção de movimentação de terrenos antecipada, bem como a presença de intervenções de terceiros próximos a pista do duto, não necessariamente em cima deste. A grande vantagem desta tecnologia reside na sua transmissão imediata à sala de controle, uma vez que as informações na fibra trafegam em velocidade próxima a da luz. A grande desvantagem está na

necessidade da escavação de uma vala paralela para assentar a fibra, no caso de dutos existentes (o chamado “retrofit”).

TANIMOLA & HILL^[172] descrevem três estudos de caso usando está tecnologia: (i) duas linhas paralelas de GLP de apenas 4,1 km de comprimento, sendo uma de 36 in e a outra de 14 in, usando DST, com a finalidade de detecção de vazamentos, visando uma incerteza de localização projetada de 1,5 m; (ii) uma linha de etileno de 57 km usando apenas DST mais uma vez com a finalidade de detecção de vazamentos de etileno em estado supercrítico trabalhando a alta pressão (ao redor de 100 Bar) – neste caso, por conveniência da localização da sala de controle aproximadamente no meio da linha, foram colocadas duas fibras, uma de 26 km e a outra de 31 km, embora o artigo afirme que comprimentos maiores que 60 km já tenham sido instalados com sucesso; e (iii) uma linha de 80 km de gás natural, também a alta pressão, cujo maior objetivo era a detecção de intervenção de terceiros, bem como o acompanhamento em tempo real da passagem de pigs, já que estes emitem ruídos característicos no momento em que passam por determinado ponto.

STRONG ET AL.^[173] afirmam que comprimentos até 150 km podem ser empregados sem a necessidade de realimentação do sinal da fibra, o que já coloca uma vantagem estratégica para dutos de longo espaçamento entre tomadas de medição. QU ET AL.^[174] apresentam um modelo baseado em máquinas de estado e aprendizado do tipo SVM (“*Support Vector Machine*”) bem como transformadas *Wavelet* para a análise dos sinais acústicos fornecidos pela fibra com motivação exclusiva de detecção de vazamentos, onde testes de campo num oleoduto de cerca de 35 km são reportados. Neste específico caso o maior erro reportado de localização foi de cerca de 300 m, ou seja, um pouco inferior a 1% do comprimento monitorado, e o menor em torno de 40 m, i. e., cerca de 0,1% do comprimento monitorado, desempenho usualmente não alcançável por outras tecnologias.

CARRILO ET AL.^[175] descrevem a engenharia dos sensores instalados na fibra, sob os pontos de vista de material e forma de fabricação bem como a forma com a qual o sinal é transmitido. LOPEZ ET AL.^[176] demonstram uma das abordagens de transmissão dos dados com específica motivação para detecção de vazamentos, trazendo um exemplo de aplicação numa linha de gasolina de 15 km.

Outros testes de campo em linhas reias são descritos em (INAUDI ET AL.^[177], STRONG ET AL.^[173] e RAVET ET AL.^[178]).

Todos esses artigos, no entanto, trazem poucos dados sobre a sensibilidade do sistema em especial quando o comprimento monitorado aumenta, e nenhum deles comenta o critério de confiabilidade, i. e., quantos falsos alarmes foram emitidos nestes ensaios. Outras preocupações tais como o uso dessas tecnologias em linhas de mar, o tempo de degradação da fibra enterrada, como se dá a queda do desempenho à medida que degrada, bem como o que fazer para “emendá-la” quando por alguma razão for partida ao longo do duto são preocupações adicionais dessa tecnologia, além do “retrofit” compulsório para linhas já existentes.

Sob o ponto de vista tecnológico, a revisão bibliográfica revela ainda as seguintes tecnologias de detecção de vazamentos como sistemas externos:

(i) os sistemas de análise de dispersão de massa (JAX^[179], NOBALCH & BRICE^[180]), onde o elemento sensor é um pequeno duto de meia polegada de diâmetro que é lançado na faixa do duto bem próximo a este. Um vácuo de ar é movimentado internamente a este pequeno duto através da sucção de uma bomba posicionada em sua saída, que naturalmente coincide com a saída do segmento monitorado. Pode parecer estranho, mas é a forma de gerar vácuo. O pequeno duto é revestido por uma membrana sensível a hidrocarbonetos, de sorte que quando uma mínima quantidade toca tal membrana, essa quantidade é internalizada ao pequeno duto. Na saída existe um cromatógrafo capaz de identificar o hidrocarboneto. Monitora trechos máximos de cerca de 10 km;

(ii) os sistemas de análise de condutividade elétrica (RAYCHEM^[181], TYKO THERMAL^[182]), onde o elemento sensor é um cabo elétrico revestido por uma borracha especial o qual é igualmente passado na faixa do duto, bem próximo ao duto que se quer monitorar, neste caso para pequeníssimos trechos. Ao entrar em contato com o óleo, a borracha expande e fecha um circuito, habilitando um alarme. Monitora trechos máximos de cerca de 2 km.

Como muitos dos dutos objeto deste trabalho apresentam a maior parte de seus trechos em locações *offshore*, as soluções externas ficam prejudicadas de sorte que aqui somente soluções internas serão avaliadas na sequência.

6.9. Modelos fluidodinâmicos de tempo real I – Balanços volumétricos ou materiais

6.9.1. Introdução

São diversas as formas dessa tecnologia, sendo as duas mais conhecidas: (i) a comparação direta, em tempo real, entre inventário medido e calculado, o chamado

balanço material, volumétrico, volumétrico compensado ou de inventário, presente nas referências ABBASPOUR ET AL.^[48], BAPTISTA^[149], GAIGER^[151]; (ii) a comparação entre um conjunto de variáveis discretas nos contornos dos dutos, de forma medida contra calculada em tempo real (LIOU^[150] & ABHULIMEN & SUSU^[152]). Essa segunda forma será abordada na **seção 6.10.16.10**.

Considere adicionalmente a **Figura 6.10** a qual descreve os módulos dos sistemas de detecção de vazamentos em tempo real baseados em modelos, sejam eles fluidodinâmicos ou estatísticos. Tal figura é um encadeamento lógico da **Figura 5.3**, da **seção 5.6.1**. Os elementos descritos são os mesmos das aplicações de tempo real descritas no capítulo anterior, com a adição agora dos algoritmos referentes à detecção, localização e quantificação de vazamentos.

Os próximos parágrafos descrevem as principais formas dos balanços volumétricos ou mássicos no enfoque dos gasodutos bifásicos.

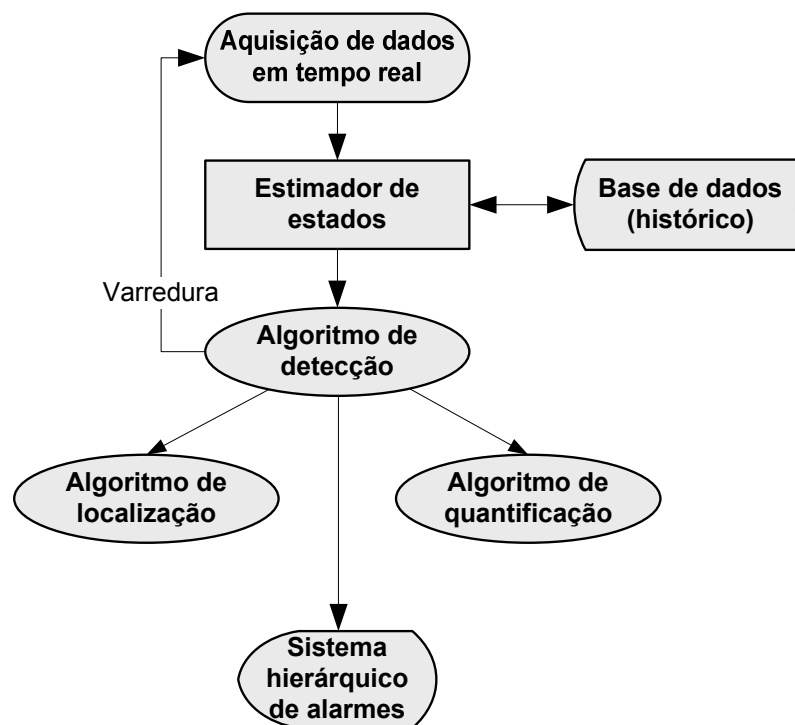


Figura 6.10 – Módulos de um LDS baseado em modelos de tempo real

6.9.2. Balanço de inventário total

Considerando os contornos do domínio do problema como a entrada e a saída do segmento de duto monitorado, tem-se que, na condição de não vazamento (STOUFFS & GIOT^[184]):

$$\left| \dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} - \frac{dm_{total}}{dt} \right| \geq U(\dot{m}_{med}) \quad (6.5)$$

onde $\dot{m}_{ent}$ e $\dot{m}_{sai}$ são respectivamente as vazões mássicas na entrada e saída do segmento monitorado, $U(\dot{m}_{med})$ é a incerteza média da medição dessas vazões de entrada e saída e dm_{total}/dt é a taxa de variação do inventário do segmento monitorado. Observa-se que a Eq. (6.5) se aplica em qualquer regime de escoamento, seja ele transiente ou permanente, bem como para escoamentos mono ou bifásicos.

Para o caso de escoamento com duas fases, tem-se:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{ent}^G + \dot{m}_{ent}^L \quad (6.6a)$$

$$\dot{m}_{sai} = \dot{m}_{sai}^G + \dot{m}_{sai}^L \quad (6.6b)$$

onde $\dot{m}_{ent}$ é a vazão mássica total que entra no segmento monitorado, i. e., a soma das vazões mássicas de entrada das fases gás ($\dot{m}_{ent}^G$) e líquido ($\dot{m}_{ent}^L$), $\dot{m}_{sai}$ é a vazão mássica total que sai do segmento monitorado, i. e., a soma das vazões mássicas de saída de gás ($\dot{m}_{sai}^G$) e líquido ($\dot{m}_{sai}^L$). $U(\dot{m}_{med})$ é a incerteza média das medições de vazão de entrada e saída, e m_{total} o inventário do segmento, calculado a partir de P , T , ρ_G e ρ_L . Observa-se que ao tratar conjuntamente as fases gás e líquido as vazões passam a serem somente vazões mássicas, i. e., não se pode usar as vazões volumétricas compensadas para soma de fases distintas. O que pode ser feito é a determinação da vazão mássica a partir das vazões volumétricas compensadas e suas respectivas massas específicas de referência:

$$\dot{m}_{ent} = (Q_{gás} \rho_{gás})_{ent(comp)} + (Q_{liq} \rho_{liq})_{ent(comp)} \quad (6.7)$$

$$\dot{m}_{sai} = (Q_{gás} \rho_{gás})_{sai(comp)} + (Q_{liq} \rho_{liq})_{sai(comp)} \quad (6.8)$$

Teoricamente na Eq. (6.4) deveria haver mais um termo em seu lado direito para considerar as incertezas no cálculo do termo transiente de inventário, em função das incertezas de P , T , ρ_G e ρ_L . No entanto os erros associados a essas medições são consideravelmente inferiores aos da vazão mássica, embora não desprezíveis.

No limite a igualdade pode ser aplicada, uma vez que a desigualdade somente existe devido à medição de vazão. Assim:

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} = \frac{dm_{total}}{dt} \quad (6.9)$$

onde m_{total} é a massa de fluido contida no segmento de duto (ou inventário). A Eq. (6.9) é intuitiva, mas trata-se de uma forma simplificada da equação da continuidade.

Devido à existência do termo a direita da igualdade na Eq. (6.9), i. e., o termo de variação transiente do inventário do gasoduto considerando ambas as fases (dm_{total} / dt), houve a necessidade do desenvolvimento dos quatro primeiros capítulos deste trabalho. No caso do escoamento bifásico, será necessário definir o inventário, de acordo com a Eq. (6.10):

$$m_{total} = \int_0^L A \{ \alpha_L(x,t) \rho_L + [1 - \alpha_L(x,t)] \rho_G(x,t) \} dx \quad (6.10)$$

Assume-se que a área da seção transversal A do duto é constante, que a massa específica do líquido também é constante na modelagem SPM-4, e que as variações tanto da massa específica do gás, quanto da fração volumétrica de líquido ao longo do comprimento do duto vêm da solução do campo de pressões da modelagem SPM-4. Assim, o inventário para a cada passo de tempo fixo Δt , será dado por:

$$m_{total} = A \int_0^L \{ \alpha_L(x) \rho_L + [1 - \alpha_L(x)] \rho_G(x) \} dx \quad (6.11)$$

Todas as quantidades presentes dentro do integrando da Eq. (6.11) estão disponíveis dentro de cada célula de discretização do domínio de x , a partir da solução do escoamento pela modelagem SPM-4, uma vez que $\alpha_L(x)$ está definido. Assim, a integração da Eq. (6.11) envolve apenas a variável x e pode ser resolvida por um método numérico de integração. Escolheu-se para este trabalho o método de Simpson (ATIKINSON^[183]), definido na Eq. (6.12):

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} \left[f(x_0) + \sum_{i=1}^{n/2-1} f(x_{2i}) + \sum_{i=1}^{n/2} f(x_{2i-1}) + f(x_n) \right] \quad (6.12)$$

onde n tem que necessariamente ser par, $h = (b - a)/n$, e a incerteza tem seu limite superior em:

$$|err| = \frac{h^4}{180} (b - a) \text{Max} |f^{iv}(\xi)|, \quad a < \xi < b \quad (6.13)$$

É oportuno observar que a discretização do domínio de x é totalmente controlada pelo usuário no caso da modelagem SPM-4, que é mesma a ser usada pelo método de Simpson (ATIKINSON^[183]). Desta forma o fato de ser compulsoriamente par não é um problema.

De posse do inventário, o cálculo do termo transiente dm_{total}/dt se dá por diferenciação numérica regressiva (ou “para trás”) em relação ao tempo, Eq. (6.14) (ATIKINSON^[183]):

$$f'(x) = \frac{\sum_{j=oe}^0 m_j f(x_j)}{x_1 - x_0} \quad (6.14)$$

onde oe é a ordem de exatidão da derivada, e os coefs. m_j seguem na **Tabela 6.3**.

Tabela 6.3 – Coeficientes de diferenças finitas regressivas

Exatidão	m_0	m_{-1}	m_{-2}	m_{-3}	m_{-4}	m_{-5}	m_{-6}
$O(h_x)$	1	-1					
$O(h_x^2)$	3/2	-2	1/2				
$O(h_x^3)$	11/6	-3	3/2	-1/3			
$O(h_x^4)$	25/12	-4	3	-4/3	1/4		
$O(h_x^5)$	137/60	-5	5	-10/3	5/4	-1/5	
$O(h_x^6)$	49/20	-6	15/6	-20/3	15/4	-6/5	1/6

Esse é maior desafio desse método uma vez que o controle dessa diferenciação não está integralmente na mão do usuário. Dependerá de uma taxa de varredura razoavelmente constante, o que não é determinístico. São muitos os pontos de descontrole que levam a essa situação: sincronização de todos os instrumentos, latência da rede geograficamente distribuída, transmissão por exceção e finalmente ativação da crítica perante dado recém chegado que força a repetição do dado anterior.

Outro problema é de natureza numérica, da estabilidade da derivada em si: quanto maior a sua ordem de exatidão, mais instável se torna em termos de função ou valor numérico, o que deixa sua curva com degraus periódicos ou aspecto de

processo descontroladamente ruidoso. A melhor opção de derivação nem sempre é aquela que envolve a maior ordem de exatidão. Neste trabalho foram usadas as expressões $O(h^2)$ para os casos com o duto em regime permanente, e $O(h^3)$ para o regime transiente, os quais foram determinados por experimentação.

Alguns casos típicos passam a ser analisados:

- Duto partindo (“*Start-up*”)

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} > 0 \text{ e } \frac{dm_{total}}{dt} > 0 \quad (6.15)$$

- Duto em regime permanente (“*Steady state*”)

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} = 0 \text{ e } \frac{dm_{total}}{dt} = 0 \quad (6.16)$$

- Duto parando (“*Shut down*”)

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} < 0 \text{ e } \frac{dm_{total}}{dt} < 0 \quad (6.17)$$

- Duto em estática (“*Shut in*”, situação presente tipicamente em oleodutos)

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sai} = 0 \text{ e } \frac{dm_{total}}{dt} = 0 \quad (6.18)$$

STOUFFS & GIOT^[184] descrevem a importância do termo transiente $\partial m_{total} / \partial t$ e propõem uma forma de calculá-lo e analisá-lo a cada varredura, numa abordagem inicialmente imaginada para escoamentos monofásicos.

O Algoritmo de Detecção de Vazamento, ADV, se baseia então na comparação dos termos da Eq. (6.9), contra uma tolerância ε prescrita usualmente a partir da incerteza média da medição de vazão nos contornos monitorados, acrescida da incerteza do cômputo da taxa temporal do inventário. Tal tolerância é chamada limiar ou batente (“*threshold*”). O algoritmo então se dá com base na comparação da desigualdade 6.19:

$$\text{Se } \left(\left| \dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} - \frac{dm_{total}}{dt} \right| > \varepsilon \right) \Rightarrow \Lambda \equiv 1 \quad (6.19)$$

onde Λ é a variável lógica que define o disparo do alarme, i. e., caso $\Lambda \equiv 1$ o alarme é disparado. O teste é feito a cada varredura de dados. As vazões mássicas vêm da medição de vazão em tempo real, e o termo transiente de inventário é calculado a cada varredura pelo estimador de estados que neste caso é o simulador de

escoamento bifásico em gasodutos descrito nos **capítulos 2 e 3** e verificado no **capítulo 4**. RACHID ET AL.^[119] demonstram que o limiar ε deve necessariamente obedecer à limitação para balanços materiais com compensação volumétrica da Eq. (6.20), admitindo que $\dot{m}_{ent}$, $\dot{m}_{sai}$ e (dm_{total} / dt) são independentes entre si.

$$\varepsilon = \sqrt{U^2(\dot{m}_{ent}) + U^2(\dot{m}_{sai}) + U^2(dm_{total} / dt)} \quad (6.20)$$

Caso as incertezas de entrada e saída sejam aproximadamente iguais, em operação relativamente estabilizada (i. e., regime permanente) tem-se a simplificação descrita na Eq. (6.21):

$$\varepsilon = U(\dot{m}_{sai}) \cdot \sqrt{2} = U(\dot{m}_{ent}) \cdot \sqrt{2} \quad (6.21)$$

6.9.3. Balanço de inventário por fase

O mesmo princípio pode ser aplicado para cada fase, respeitando-se as variações mássicas que ocorrem em cada uma delas, devido aos fenômenos de liquefação de frações pesadas da fase gás, vaporização de frações leves da fase líquida e solubilidade do gás no líquido. Desconsiderando-se as incertezas de vazão, tem-se:

$$\dot{m}_{ent}^G - \dot{m}_{sai}^G = \frac{dm_G}{dt} + \Delta\dot{m}_{GL} \quad (6.22a)$$

$$\dot{m}_{ent}^L - \dot{m}_{sai}^L = \frac{dm_L}{dt} - \Delta\dot{m}_{LG} \quad (6.22b)$$

onde $\Delta\dot{m}_{LG}$ é a parcela de massa da fase líquida que é transferida a fase gás e $\Delta\dot{m}_{GL}$ é o inverso. Tal parcela deve ser calculada a cada varredura através de formulações PVT, i. e., a soma das trocas mássicas em cada célula de discretização do domínio caracterizado pelo duto. No específico caso dos gasodutos objeto desse estudo, tal parcela é quase sempre negativa, e leva o nome de surgência de líquidos. Dizendo de outra forma, a vazão mássica de gás na entrada quase sempre será maior que a de saída devido a conversão de gás em líquido (surgência de líquidos).

Observa-se por oportuno que a possibilidade de se criar algoritmos baseados nas fases individuais é importante uma vez que nem sempre existem medições de boa qualidade para as duas fases nos contornos do gasoduto. Há também situações nas quais apenas uma fase está presente em determinados trechos dos dutos. Na chegada do pig, por exemplo, o trecho próximo à saída do duto encontra-se com a

seção transversal cheia de líquido, causando a queda a zero da vazão mássica de gás na saída.

O ADV é análogo:

$$\text{Se } \left(\left| \dot{m}_{ent}^k - \dot{m}_{sai}^k - \frac{dm_k}{dt} - \Delta \dot{m}_k \right| > \varepsilon_k \right) \Rightarrow \Lambda_k \equiv 1 \quad (6.23)$$

onde Λ_k é a variável lógica que define o disparo do alarme para a fase k . O teste é feito a cada varredura. A vazão mássica vem da medição de vazão em tempo real, e o termo transiente de inventário (dm_k/dt) é calculado a cada varredura pelo estimador de estados. Analogamente RACHID ET AL.^[119] demonstram que o limiar ε_k deve necessariamente obedecer à limitação descrita pela Eq. (6.24):

$$\varepsilon = \sqrt{U^2(\dot{m}_{ent}^k) + U^2(\dot{m}_{sai}^k) + U^2(dm_{total}^k / dt) + U^2(\Delta \dot{m}_k)} \quad (6.24)$$

O que não é análogo são as interpretações dos diferentes regimes de operação, pois num gasoduto longo, por exemplo, a condição *PVT* da saída pode estar tão diferente daquela da entrada, que mesmo ao empacotar a partir da entrada, uma quantidade de líquido muito grande na saída pode se formar.

A discussão acerca do uso concomitante de mais de um algoritmo de detecção de vazamentos é controversa. Não há qualquer garantia que seu uso aumente a confiabilidade ou sensibilidade do sistema. Existe a probabilidade dos problemas e não das virtudes se somarem, especialmente se os algoritmos se basearem em princípios distintos (API RP 1130^[1] & API-1155^[132]). Somente a partir de uma análise de probabilidades na situação onde cada algoritmo apresenta um desempenho esperado melhor e pior, poder-se-á inferir acerca da pertinência de tal prática. O enfoque deste trabalho é usar tal algoritmo apenas na fase predominante, qual seja, a fase gás, por conta das muitas descontinuidades existentes na fase líquida.

A sensibilidade dos balanços de inventário totais ou por fase se aproximam do comportamento hiperbólico descrito na **Figura 6.9**.

6.9.4. Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130^[1]

Ambas variações, balanço de inventário e balanço de inventário por fases são descritas no API RP 1130^[1] como categoria B.1, “*Line Balance CPM*”.

6.9.5. Principais virtudes

A base de análise técnica das virtudes e limitações desses sistemas são os parâmetros de desempenho definidos na **seção 6.6**.

De uma maneira geral os balanços materiais de tempo real são de fácil entendimento ao operador pois usam os conceitos básicos, presentes no dia a dia da operação. Apresentam alta robustez, pois caso determinados instrumentos tornem-se indisponíveis, podem continuar operando ainda que de forma degradada, no caso de sistemas monofásicos. Permitem qualquer espaçamento entre tomadas de medição, ou seja, podem ser instalados num segmento de grande comprimento, onde apenas o desempenho de sensibilidade será afetado, e finalmente, descrevem todos os elementos de escoamento do problema de sorte que podem ser usados quando o escoamento do segmento monitorado está em regime transiente, embora a sensibilidade seja igualmente afetada.

6.9.6. Principais limitações

São integralmente dependentes da qualidade da medição de vazão da fase predominante nos dois contornos do segmento monitorado. À medida que o espaçamento entre tomadas de medição aumenta a sensibilidade cai. São pouco sensíveis a pequenos vazamentos próximos aos contornos.

Sua confiabilidade é aleatória para vazamentos pequenos, uma vez que seu ADV é trivial, não se baseia em qualquer fundamentação estatística ou de probabilidade, e pode flutuar ao sabor das flutuações das incertezas da medição de vazão. Essa característica pode provocar falsos alarmes quando o vazamento estiver próximo da incerteza da medição de vazão.

6.10. Modelos fluidodinâmicos de tempo real II – Análise de dispersão de pressão e vazão

6.10.1. Introdução

Conforme citado na **seção 6.9.1**, essa tecnologia compara valores calculados contra valores medidos de P e $\dot{m}_k$ nos contornos, em vez da comparação mássica da tecnologia anterior. ABHULIMEN & SUSU^[153] apresentam uma revisão bibliográfica atualizada sobre essa tecnologia, voltada entretanto para o escoamento monofásico de gás, bem como propõem um modelo próprio.

6.10.2. Descrição

Considere que P e $\dot{m}_k$ são respectivamente as vazões e pressões adquiridas em tempo real nos contornos de um segmento monitorado de duto, bem como P' e $\dot{m}'_k$ são as variáveis calculadas pelo estimador de estados. São definidos dois limiares e_1 e e_2 , os quais emitirão alarmes toda vez que forem ultrapassados, sendo Δt a taxa de varredura média oferecida pelo sistema de comunicação. Cada variável que caracteriza uma dada condição de contorno pode ser medida, bem como calculada a partir das outras variáveis medidas no seu e no outro contorno. Por exemplo, a vazão de entrada de gás, pode ser calculada a partir das outras variáveis medidas em tempo real, i. e:

$$\dot{m}_{ent(calc)}^G = EE\left[\dot{m}_{ent(med)}^L, \dot{m}_{sai(med)}^L, \dot{m}_{sai(med)}^G, P_{ent(med)}, P_{sai(med)}, T_{ent(med)}, T_{sai(med)}\right] \quad (6.25)$$

onde EE é estimador de estados aplicado nas condições de contorno que chegaram para aquela varredura específica. Na Eq. (6.25), $\dot{m}_{ent(med)}^G$ é a vazão mássica medida na entrada para a fase gás, $\dot{m}_{ent(med)}^L$ para a fase líquida, $\dot{m}_{sai(med)}^G$ é a vazão mássica medida na saída para a fase gás, $\dot{m}_{sai(med)}^L$ para a fase líquida, $P_{ent(med)}$ e $P_{sai(med)}$ são as pressões medidas respectivamente na entrada e saída do segmento monitorado, tal como $T_{ent(med)}$ e $T_{sai(med)}$ são as temperaturas nesses mesmos contornos. Com base nessas variáveis pode-se calcular qualquer variável nos contornos, como é o caso de $\dot{m}_{ent(calc)}^G$ abordada na Eq. (6.25). Assim, diferenças entre o dado calculado e o dado medido podem ser estabelecidas:

$$\Delta \dot{m}_{ent}^G = \left| \dot{m}_{ent(med)}^G - \dot{m}_{ent(calc)}^G \right| \quad (6.26)$$

onde $\Delta \dot{m}_{ent}^G$ é a diferença das vazões mássicas medida e calculada para a fase gás, na entrada do segmento monitorado. Dessa forma, uma comparação pode ser feita entre o dado medido, e o calculado, i. e., a diferença calculada na Eq. (6.26) pode ser comparada contra um limiar específico.

A diferença se dá no número de comparações possíveis nesta abordagem. Considerem as definições:

$$\dot{m}_{ent(calc)}^k = EE\left(\dot{m}_{ent(med)}^j, \dot{m}_{sai(med)}^j, \dot{m}_{sai(med)}^k, P_{ent(med)}, P_{sai(med)}, T_{ent(med)}, T_{sai(med)}\right) \quad (6.27)$$

$$\dot{m}_{sai(calc)}^k = EE\left(\dot{m}_{ent(med)}^j, \dot{m}_{sai(med)}^j, \dot{m}_{ent(med)}^k, P_{ent(med)}, P_{sai(med)}, T_{ent(med)}, T_{sai(med)}\right) \quad (6.28)$$

onde o índice j descreve a fase complementar à fase k , partindo de uma presunção de escoamento bifásico. Desta forma podem-se ter as oito comparações abaixo descritas:

- Duas vazões na entrada, uma para cada fase

$$\Delta \dot{m}_{ent}^k = \left| \dot{m}_{ent(med)}^k - \dot{m}_{ent(calc)}^k \right| \quad (6.29)$$

- Pressão na entrada

$$\Delta P_{ent} = \left| P_{ent(med)} - P_{ent(calc)} \right| \quad (6.30)$$

- Vazão mássica total na entrada

$$\Delta \dot{m}_{ent} = \left| \dot{m}_{ent(med)} - \dot{m}_{ent(calc)} \right| \quad (6.31)$$

- Duas vazões na saída, uma para cada fase

$$\Delta \dot{m}_{sai}^k = \left| \dot{m}_{sai(med)}^k - \dot{m}_{sai(calc)}^k \right| \quad (6.32)$$

- Pressão na saída

$$\Delta P_{sai} = \left| P_{sai(med)} - P_{sai(calc)} \right| \quad (6.33)$$

- Vazão mássica total na saída

$$\Delta \dot{m}_{sai} = \left| \dot{m}_{sai(med)} - \dot{m}_{sai(calc)} \right| \quad (6.34)$$

6.10.3. Algoritmo de detecção de vazamento - ADV

Assim uma ou mais funções lógicas podem ser criadas para teste de existência de vazamentos (FUKUSHIMA ET AL.^[185]). Essas funções lógicas retornam valores lógicos ou booleanos, i. e., 0 ou 1, sendo 1 a presença ou existência do vazamento. Os argumentos dessas funções são exatamente as diferenças descritas através das Eqs. 6.29 a 6.34:

$$\Lambda_{comp} = \Lambda_{comp}(\Delta \dot{m}_{ent}^k, \Delta P_{ent}, \Delta P_{ent}^k, \Delta \dot{m}_{sai}^k, \Delta P_{sai}, \Delta P_{sai}^k) \quad (6.35)$$

A mais trivial delas é a comparação de todas ou algumas das diferenças contra limiares específicos para cada diferença:

$$\Lambda_{comp} = \left[\left(\Delta \dot{m}_{ent}^k \geq \varepsilon_{\dot{m}_{ent}}^k \right) \otimes \left(\Delta \dot{m}_{sai}^k \geq \varepsilon_{\dot{m}_{sai}}^k \right) \otimes \left(P_{ent}^k \geq \varepsilon_{P_{ent}}^k \right) \otimes \left(\Delta P_{sai}^k \geq \varepsilon_{P_{sai}}^k \right) \right] \quad (6.36)$$

Observa-se por oportuno que a notação empregada na Eq. (6.36) é adequada a funções lógicas, i. e., há um produto de condições testadas o que representa o operador lógico “E”. Assim, outra forma de se declarar a mesma função é:

$$\Lambda_{comp} = \left[(\Delta \dot{m}_{ent}^k \geq \varepsilon_{\dot{m}_{ent}}^k) e (\Delta \dot{m}_{sai}^k \geq \varepsilon_{\dot{m}_{sai}}^k) e (P_{ent}^k \geq \varepsilon_{P_{ent}}^k) e (\Delta P_{sai}^k \geq \varepsilon_{P_{sai}}^k) \right] \quad (6.37)$$

O ADV então é igualmente trivial, onde Λ_{comp} é a variável lógica que define o disparo do alarme de uma maneira geral. Um exemplo típico pode ser declarado da seguinte forma: caso por dez varreduras consecutivas tenha-se a condição ($\Lambda_{comp}=1$), então se declara um vazamento. O valor dez é arbitrário e deve ser calibrado para cada duto.

Diversas variações de Λ_{comp} podem ser criadas para dar maior ou menor importância à fase ou ao contorno. Por exemplo, se antecipadamente houver uma indicação que o contorno de saída é o mais importante, o de entrada pode nem ser testado (KAM^[186]). O teste é feito a cada varredura. Todas as variáveis de contorno vêm da medição de vazão em tempo real. BILLMANN & ISERMANN^[166] descrevem esse método de forma acoplada com um estimador de estados monofásico. Por sua vez GEIGER ET AL.^[165] propõem o uso de um algoritmo baseado em dois modelos de observador de estados para dutos bifásicos, o primeiro baseado em linearização com parâmetros distribuídos, e o segundo com parâmetros do tipo “*lumped*”. Em ambos observadores são definidas funções de transferência direta e cruzada para a comparação dos eventuais desbalanceamentos. AL-KHOMAIRI^[187] propõe uma metodologia estatística limitada com base em desvios padrões para melhorar a sensibilidade de detecção em dutos de líquidos com grande espaçamento entre tomadas de medição. TURNER^[188] propõe tecnologia semelhante para a sensibilidade em gasodutos monofásicos.

Os limiares de uma maneira geral obedecem às limitações de suas respectivas incertezas de medição, acrescidas das incertezas inseridas pelo modelo usado pelo EE. Assim, pode-se dizer que:

$$\varepsilon_{\dot{m}}^k > \max \left[U(\dot{m}_{ent}^k), U(\dot{m}_{sai}^k) \right] \quad (6.38)$$

$$\varepsilon_P^k > \max \left[U(P_{ent}^k), U(P_{sai}^k) \right] \quad (6.39)$$

Ou seja, teoricamente é mais sensível que os balanços de inventário, que seguem a limitação da Eq. (6.24). Sua sensibilidade se aproxima mais ao tempo de trânsito da onda de pressão.

6.10.4. Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130^[1]

Essa tecnologia é descrita no API RP 1130^[1] como categoria B.2, “*Real Time Transient Model CPM*”.

6.10.5. Principais virtudes

Apresentam alta robustez, pois caso determinados instrumentos tornem-se indisponíveis (e. g., vazão num dos contornos), podem continuar operando ainda que de forma degradada. Por se basearem em EE de formulação transiente, apresentam maior sensibilidade que os balanços de inventário nesta situação, em especial quando o espaçamento entre tomadas de medição de vazão é grande (e. g., maior que 100 km).

6.10.6. Principais limitações

Os modelos fluidodinâmicos de tempo real são integralmente dependentes de medição de vazão das duas fases, dentro de limites aceitáveis de qualidade e desempenho, nos dois contornos do segmento monitorado. À medida que o espaçamento entre tomadas de medição vai aumentando, a sensibilidade cai.

Sua confiabilidade é aleatória para vazamentos pequenos, uma vez que seu ADV é trivial, não se baseia em qualquer fundamentação estatística ou de probabilidade, e pode flutuar ao sabor das flutuações das incertezas da medição de vazão para vazamentos pequenos. Essa característica pode provocar falsos alarmes quando o vazamento estiver próximo da incerteza da medição de vazão.

6.11. Modelos estatísticos de tempo real

6.11.1. Introdução

É uma variação dos modelos fluidodinâmicos de tempo real, especialmente aqueles que lidam com balanços de inventário, com a introdução de dois elementos novos: (i) uma preocupação maior com o parâmetro confiabilidade, especificamente, ou seja, é apresentada uma metodologia estatística que assegura uma probabilidade de vazamento, antes que o alarme seja emitido (em outras palavras, seu ADV não é trivial); (ii) eventos de escoamento de difícil caracterização fluidodinâmica podem ser estatisticamente modelados, desde que ocorram de forma repetitiva.

6.11.2. Descrição

A partir da Eq. (6.5), pode-se introduzir um ou mais parâmetros estatísticos conforme Eq. (6.40) abaixo:

$$\dot{m}_c[t] = \dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} - \frac{dm_{total}}{dt} \quad (6.40)$$

onde $\dot{m}_c[t]$ é uma função que leva em conta todas as diferenças entre o lado direito e o lado esquerdo da Eq. (6.9) que não estejam associadas a incertezas de medição. Todos os outros elementos são os mesmos da modelagem fluidodinâmica de tempo real apresentada na seção anterior.

De forma a ilustrar a importância de uma abordagem capaz de diferenciar vazamentos pequenos, considere a **Figura 6.11** que traz a emulação de um gráfico usual de vazão volumétrica padrão de um duto que opera de forma estabilizada buscando a vazão de 1000 Sm³/h. Em tal exemplo a incerteza da medição de vazão é de 1% e foi gerada aleatoriamente com um gerador de números randômicos.

Na seqüência, a **Figura 6.12**, mostra um vazamento de 1% da vazão nominal do duto, artificialmente introduzido e que ocorre apenas por 200 s, a partir do segundo 150, ilustrada em escala adequada à fácil visualização do vazamento.

A **Figura 6.13** traz uma escala que se aproxima um pouco mais da tela que o operador usa.

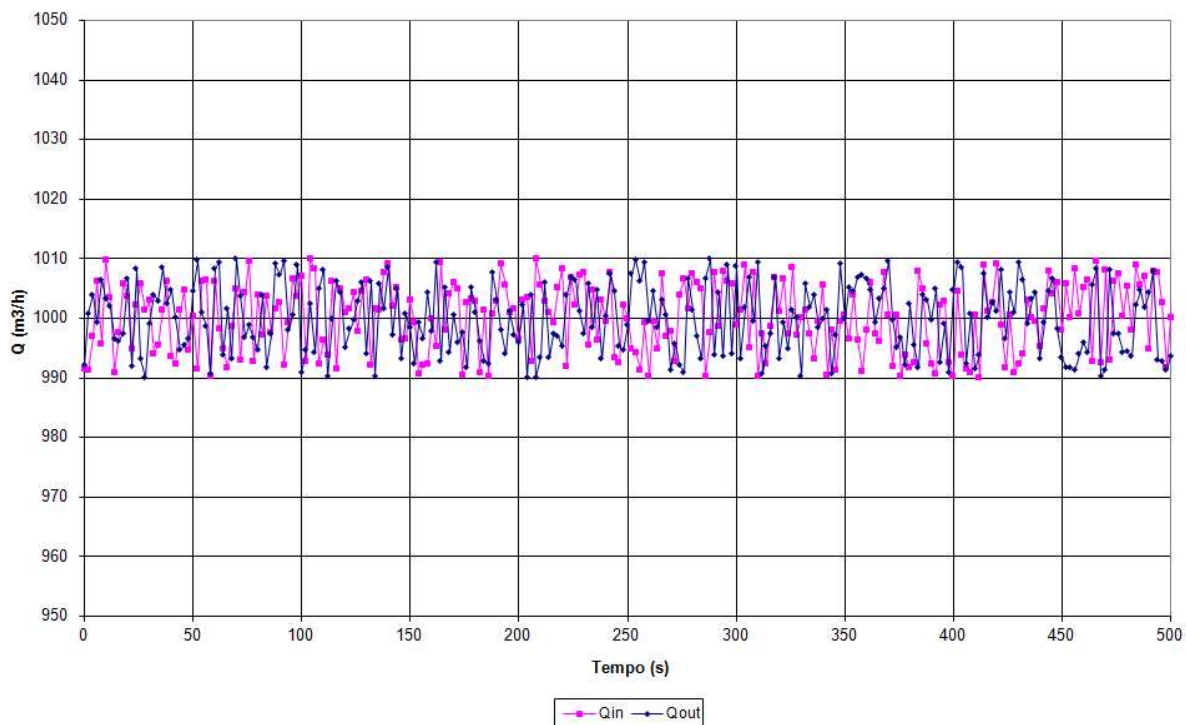


Figura 6.11 – Operação normal de um duto monofásico de líquidos

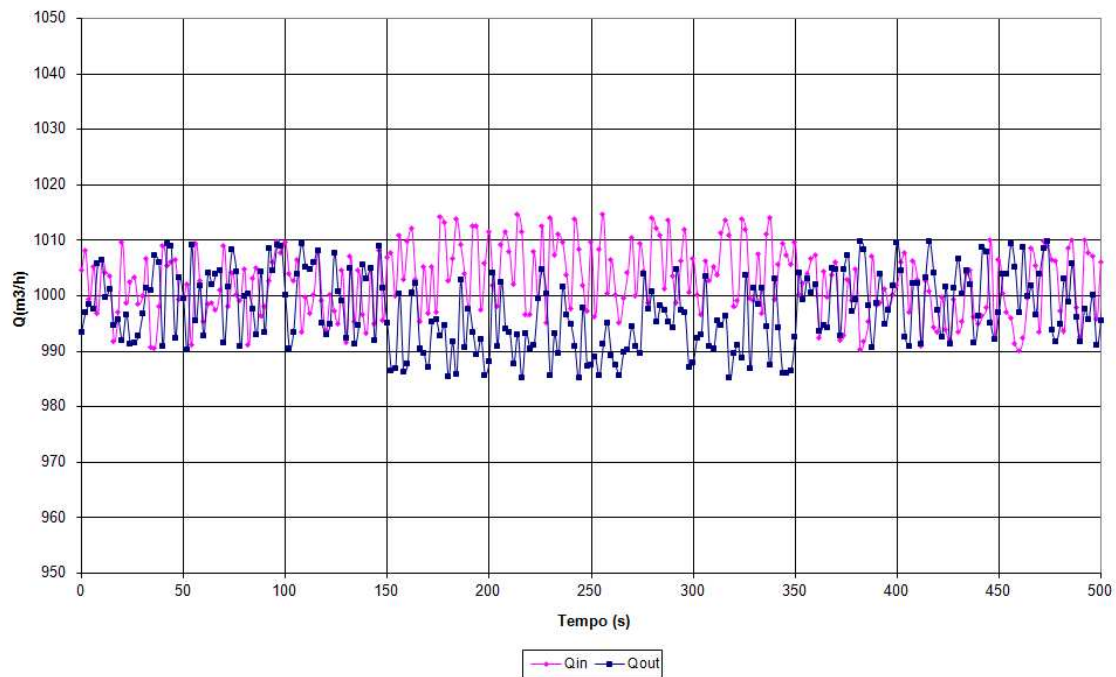


Figura 6.12 – Emulação de operação com vazamento de 1% por apenas 200 s

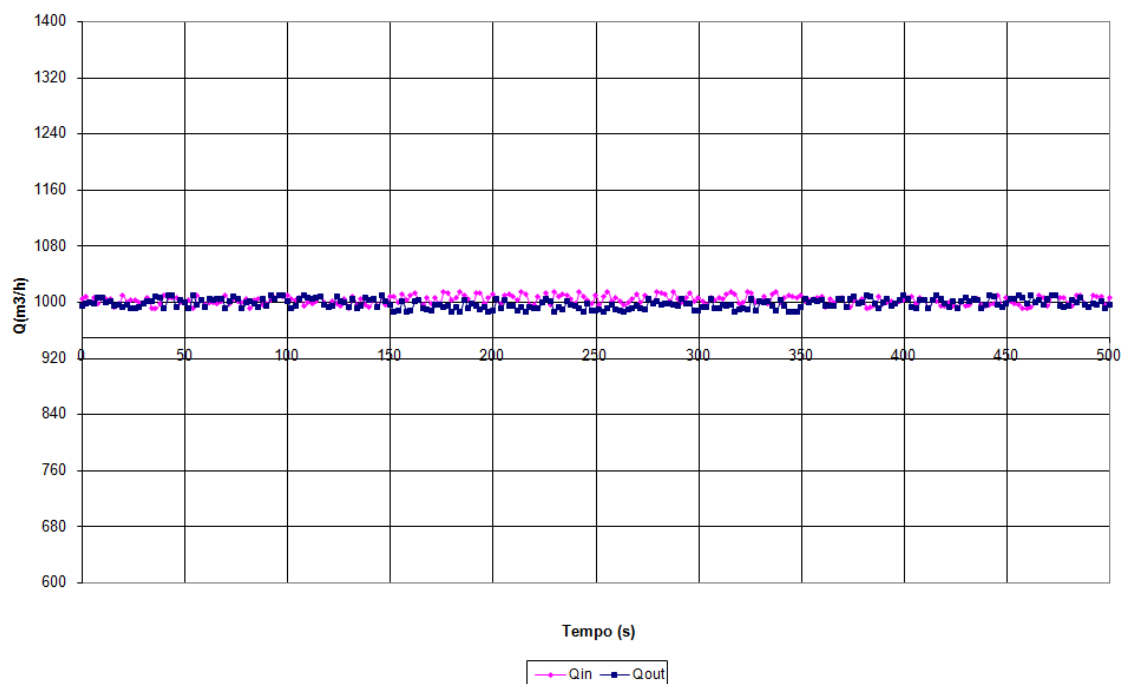


Figura 6.13 – Operação com vazamento de 1% na escala usada pela operação

Aí reside a grande diferença entre os modelos estatísticos, e os fluidodinâmicos: os modelos estatísticos inferirão uma probabilidade mínima de vazamento, e. g., 99%, para alarmarem, com base num modelo. E quando alarmam são bastante confiáveis. As modelagens fluidodinâmicas convencionais alarmarão ou não aleatoriamente neste exemplo.

No entanto, o modelo estatístico tem um custo: sua sensibilidade é quase sempre inferior àquela dos modelos fluidodinâmicos convencionais, com algoritmos triviais, especialmente no regime transiente, bem como nos vazamentos menores, próximos à incerteza da medição de vazão. No entanto estes últimos quase sempre apresentarão confiabilidade baixa.

A decisão acerca do uso de um ou outro, é sempre em função do requisito ambiental. Se a sensibilidade requerida pelo organismo ambiental regulador for pouco exigente a opção pelo modelo estatístico é a mais indicada, pois preserva os interesses da companhia operadora, somente parando a linha em casos estatisticamente confirmados.

Os organismos ambientais por sua vez dificilmente informam ou exigem requisitos de sensibilidade, preferindo se focar nos requisitos mínimos de inspeção, para evitarem vazamentos. Usualmente a operadora é que atribui seus riscos a tais parâmetros de sensibilidade.

No caso da **Figura 6.12** e da **Figura 6.13** os algoritmos convencionais poderiam apresentar três comportamentos de forma completamente aleatória: (i) simplesmente não detectariam o vazamento; (ii) poderiam levar um tempo grande até que a aleatoriedade da incertezas da medição de vazão de entrada e saída apontassem para lados opostos e provocassem um alarme; (iii) Poderiam contar com a sorte e a aleatoriedade da medição de vazão promover uma detecção rápida.

6.11.3. Algoritmo de detecção de vazamentos - ADV

Assim, DI BLASI^[189] sugere associar os testes de probabilidade seqüencial propostos por WALD^[156] e WALD & WOLFOWITZ^[190], aos desbalanceamentos de inventário que ocorrem sequencialmente à medida que as varreduras vão ocorrendo. Ressalva-se que DI BLASI^[189] teve como alvo os dutos de escoamento monofásicos de líquidos.

Trata-se de um teste estatístico criado no final da década de 1940 cujo objetivo era bastante distinto do aqui empregado: visava identificar produtos defeituosos em linha de produção de forma automatizada, e parar o processo toda vez que este se mostrasse estatisticamente variável de acordo com um limiar ou batente de probabilidade predefinido.

A título de ilustração, imagine uma fábrica de pães de forma de 500 g. Quer-se identificar, com uma probabilidade alta (e. g., 99%), o momento em que os elementos fabricados apresentem um desbalanceamento mássico de acordo com um limiar de

5%, e pare o processo toda vez que isso acontecer de forma consistente e repetitiva. Essa foi a motivação de WALD^[156] nos anos 40.

Sua aplicação então à detecção de vazamentos se dá da seguinte forma: tomando a igualdade da Eq. (6.40) tem-se:

$$\dot{m}_c[t] = \dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai} - \frac{dm_{total}}{dt} + U(\dot{m}_{med}) \quad (6.41)$$

Parte-se de duas hipóteses definidas abaixo, em função dos limiares de detecção de vazamentos, já empregando a notação proposta por WALD^[156]:

$$\dot{m}_c[t] < \varepsilon \rightarrow H_0 \quad (6.42)$$

$$\dot{m}_c[t] \geq \varepsilon \rightarrow H_1 \quad (6.43)$$

onde H_0 é a hipótese de operação normal sem vazamento, e H_1 é a hipótese da existência de um vazamento. Uma suposição se faz no sentido de considerar a distribuição da variável aleatória $\dot{m}_c[t]$ como sendo normal ou Gaussiana. É trivial observar que tal variável é função forte da incerteza da medição de vazão, a única componente sua de natureza aleatória, e assim se considera baixa a possibilidade de um dado medidor apresentar distribuição de erros que não sejam normais. Considerada a premissa, têm-se as densidades de probabilidade já escritas na notação de WALD & WOLFOWITZ^[190] de acordo com as Eqs. (6.44) e (6.45):

Condição sem vazamento:

$$f(\dot{m}_c[t]/H_0) = N(\dot{m}_c[t]; 0; \sigma_{\dot{m}_c}^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\dot{m}_c}^2}} \exp\left(-\frac{\dot{m}_c[t]^2}{2\sigma_{\dot{m}_c}^2}\right) \quad (6.44)$$

Condição com vazamento:

$$f(\dot{m}_c[t]/H_1) = N(\dot{m}_c[t]; \dot{m}_{vaz}; \sigma_{\dot{m}_c}^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\dot{m}_c}^2}} \exp\left\{-\frac{(\dot{m}_c[t] - \dot{m}_{vaz})^2}{2\sigma_{\dot{m}_c}^2}\right\} \quad (6.45)$$

Trata-se de uma notação estatística onde f é a densidade de probabilidade que tem como variável aleatória $\dot{m}_c[t]$, no dado que chegou no tempo t , referente a qualquer hipótese H . A função N que caracteriza a função normal é dada pela Eq. (6.46):

$$N(\dot{m}_c[t]; \bar{m}; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{(\dot{m}_c[t] - \bar{m})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6.46)$$

onde $\dot{m}_c[t]$ é a variável independente discreta, $\bar{m}$ é a medida de valor central e σ é a medida de dispersão.

Através do uso de testes sequenciais é possível embasar a decisão acerca da existência de vazamento em um número maior de amostras do balanço sem a necessidade de recorrer a filtragens, pelo menos no regime permanente.

O teste proposto por WALD^[156] é na realidade uma técnica de controle estatístico da qualidade. Nesse tipo de teste a quantidade de amostras do balanço material não é constante, mas uma variável que será determinada no mesmo processo de decisão. Neste caso, PEREZ & PLIEGO^[192] definem as seguintes hipóteses e probabilidades:

- A hipótese da existência de falsos alarmes, associada à probabilidade P_{FA} é obtida a partir da função densidade de probabilidade de $\dot{m}_c[t]$, tendo como parâmetros uma vazão vazada esperada $\dot{m}_{vaz}$ como medida de valor central, bem como o desvio padrão de $\dot{m}_c[t]$, ou seja $\sigma_{\dot{m}_c}$ como parâmetro de dispersão. A condição se dá quando $\dot{m}_{vaz} > \varepsilon$. Na notação de PEREZ & PLIEGO^[192] tem-se:

$$P_{FA} = P_{H_0}(H_1) \quad (6.47)$$

- A hipótese da negativa da detecção de vazamento ($1 - P_D$) se dá através da mesma função densidade de probabilidade, no entanto tendo como parâmetro de medida central o valor nulo, uma vez que se quer testar a hipótese de não vazamento, $\dot{m}_{vaz} = 0$. Usando a mesma notação tem-se:

$$1 - P_D = P_{H_1}(H_0) \quad (6.48)$$

O teste proposto na citada referência define a razão de verossimilaridade, como o quociente das densidades de probabilidade para cada hipótese, definido pela Eq. (6.49):

$$\lambda_1 = \frac{f(\dot{m}_c[1]; \dot{m}_{vaz} \geq \varepsilon; \sigma_{\dot{m}_c}^2 / H_1)}{f(\dot{m}_c[1]; 0; \sigma_{\dot{m}_c}^2 / H_0)} \quad (6.49)$$

A partir do primeiro dado recebido de campo ao iniciar o teste, calcula-se λ_1 . Tal razão é comparada com a variação do valor médio da distribuição de $\dot{m}_c[t]$ com relação a um valor de vazão mínima detectável ε , i. e., o limiar. Nos testes de alarme, em princípio, se usa o balanço corrigido sem a filtragem sobre $\dot{m}_c[t]$.

O algoritmo se baseia na determinação do valor de duas constantes A , B onde $B < A$ da seguinte forma:

- se $\lambda_1 \leq B$ então se aceita a hipótese H_0 , ou seja o duto opera na normalidade, sem vazamentos;
- se $B < \lambda_1 < A$ não se toma decisão e parte-se para uma nova amostra em função de λ_2 (calculado da mesma forma para $\dot{m}_c[2]$, i. e., para o dado que chega na próxima varredura);
- se $\lambda_1 \geq A$ se rejeita H_0 e, por conseguinte se declara um vazamento e emite-se um alarme.

No caso da tomada de t amostras independentes sucessivas a regra de decisão é análoga, obtida através do produto das funções densidade de probabilidade para todos os elementos da sequência de dados que chegou desde o início da amostragem, de acordo com a Eq. (6.50):

$$\lambda_t = \frac{\prod_{i=1}^{n_t} f(\dot{m}_c[i]; \dot{m}_{vaz} \geq \varepsilon; \sigma_{\dot{m}_c}^2)}{\prod_{i=1}^{n_t} f(\dot{m}_c[i]; 0; \sigma_{\dot{m}_c}^2)} \quad (6.50)$$

onde n_t é o número atual de elementos da sequência. Caso $\lambda_t \leq B$, H_0 é aceita; se $B < \lambda_t < A$, não se toma decisão e parte-se para uma nova amostra; se $\lambda_t \geq A$, H_0 é rejeitada e, por conseguinte se gera um alarme.

DI BLASI^[189] desenvolveu os produtórios de numerador e denominador da Eq. (6.50) transformando-os em somatórios de logaritmos e através de manipulações algébricas demonstrou que:

$$A = \frac{P_D}{P_{FA}} \quad (6.51)$$

$$B = \frac{1 - P_D}{1 - P_{FA}} \quad (6.52)$$

Essa foi a razão pela qual estas duas probabilidades foram definidas. Pode-se desta forma definir uma probabilidade de vazamento P_D . Aplicando logaritmos nos dois lados da Eq. (6.50) tem-se:

$$\begin{aligned}
\ln[\lambda_t] &= \ln[\lambda_{t-\Delta t}] + \ln \left[\frac{f(\dot{m}_c[t]; \dot{m}_{vaz} \geq \varepsilon; \sigma_{\dot{m}_c}^2)}{f(\dot{m}_c[t]; 0; \sigma_{\dot{m}_c}^2)} \right] \\
&= \ln[\lambda_{t-\Delta t}] + \ln \left\{ \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\dot{m}_c}^2} \exp \left[-\frac{(\dot{m}_c[t] - \dot{m}_{vaz})^2}{2\sigma^2} \right]}{\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\dot{m}_c}^2} \exp \left[-\frac{(\dot{m}_c[t])^2}{2\sigma^2} \right]} \right\}
\end{aligned} \tag{6.53}$$

Definindo $g[t] = \ln[\lambda]$ e operando sobre as Eqs. (6.51) e (6.52) tem-se:

$$\ln \left[\frac{1 - P_D}{1 - P_{FA}} \right] \leq g[t] \leq \ln \left[\frac{P_D}{P_{FA}} \right] \tag{6.54}$$

o que implica em:

$$g[t] = g[t - \Delta t] + \left(\frac{\dot{m}_{vaz}}{\sigma_{\dot{m}_c}} \right)^2 \left(\frac{\dot{m}_c[t]}{\dot{m}_{vaz}} - 0,5 \right) \tag{6.55}$$

Busca-se na prática $P_D \cong 1$ e $P_{FA} \cong 0$, embora com estes valores o limite inferior $\ln(B)$ seja negativo.

Observa-se que quando $\dot{m}_c[t] < \dot{m}_{vaz}/2$, $g[t]$ tenderá ao valor do limite $\ln(B)$, o que em caso de vazamento aumentará o espaço amostral até alcançar o limite A . Por essa razão DI BLASI^[189] propõe uma simplificação do teste da seguinte forma:

$$0 \leq g[t] \leq \ln \left[\frac{1}{P_{FA}} \right] \tag{6.56}$$

O que uma vez operado sobre a Eq. (6.55) obtém-se a versão final da expressão proposta para o teste seqüencial de alarme:

$$g[t] = g[t - \Delta t] + \frac{1}{\ln \left[\frac{1}{P_{FA}} \right]} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{vaz}}{\sigma_{\dot{m}_c}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\dot{m}_c[t]}{\dot{m}_{vaz}} - 0,5 \right) \tag{6.57}$$

Essa simplificação, além de tornar o método mais rápido, permite a inserção de um parâmetro de grande utilidade que é a probabilidade de falsos alarmes.

O alarme de vazamento é habilitado quando na seqüência $g[t] \geq 1$, bem como quando $g[t] \leq 0$ o teste deve ser reiniciado. O início do processo se dá com $g[0] = 0$.

O menor vazamento detectável por esse modelo obedece à desigualdade abaixo (desenvolvimento da Eq. 6.57):

$$\dot{m}_f[t] \geq \frac{\dot{m}_{vaz}}{2} \quad (6.58)$$

Este é um limite teórico do algoritmo, desvinculado da medição de vazão. Na prática a incerteza da medição de vazão é a variável mais importante, e uma correlação que demonstre o vazamento mínimo em função de tais incertezas prevalece. Assim, essa desigualdade é inferiormente limitada pelo valor proposto por RACHID ET AL.^[119], Eqs. 6.20 e 6.21, **seção 6.9.2**.

6.11.4. Múltiplas expectativas de vazamento – testes simultâneos

Na Eq. (6.57) $\dot{m}_{vaz}$ na realidade é a variável a partir da qual $\dot{m}_c[t]$ convergirá em direção ao valor real da vazão vazada de sorte que quão próximo $\dot{m}_{vaz}$ estiver da vazão real vazada, mais rápido será o processo de convergência. Assim, recomendam-se testes simultâneos a partir de diferentes valores de $\dot{m}_{vaz}$, de sorte a obter uma convergência mais rápida. Este trabalho usará três valores de $\dot{m}_{vaz}$, 10%, 5% da vazão nominal do duto, bem como o valor mínimo previsto pela Eq. (6.20), que no caso de 3% na entrada e 2% na saída retorna um valor de 3,61%.

6.11.5. Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130^[1]

Essa tecnologia é descrita no API RP 1130^[1] como categoria B.3, “*Statistical Analysis CPM*”.

6.11.6. Principais virtudes

A principal virtude do modelo estatístico é a alta confiabilidade associada à detecção, que é exatamente o parâmetro de desempenho mais importante segundo o API RP 1130^[1]. Ou seja, visa atender interesses das operadoras que somente se dispõem a parar o duto no caso de uma grande probabilidade de vazamento, probabilidade esta configurável.

Outra virtude, num momento pós-vazamento, é permitir a regressão do crescimento do primeiro limiar de alarme a atingir o critério de alarme ($g[t] \geq 1$), e assim ter uma estimativa do momento real em que o vazamento ocorreu. Observe-se por oportuno que ainda assim é necessário aguardar o tempo de seu crescimento com base na probabilidade requerida de falsos alarmes. Dentre as metodologias baseadas em modelos fluidodinâmicos, aqui descritas, nenhuma outra permite tal

análise, e informarão apenas o momento da detecção e não o real momento do vazamento.

6.11.7. Principais limitações

A depender do tamanho do vazamento, e especialmente do regime de escoamento, transiente ou não, o custo dessa confiabilidade maior pode ser alto em termos de decréscimo de sensibilidade, o que na prática além de demorar mais que os modelos baseados em algoritmos triviais, haverá um volume vazado maior até a detecção. O equilíbrio deve ser alcançado por sintonia, com base em dados reais de operação.

6.12. **Análise de pressão de ponto em tempo real**

6.12.1. Introdução

Trata-se de uma análise estatística de um único ponto de pressão ao longo do segmento monitorado, e assume que tal ponto é representativo do comportamento de um dado trecho. Permite detectar vazamentos apenas quando o duto encontra-se em regime permanente.

Assume que todo vazamento gera uma queda de pressão a jusante do mesmo (conforme descrito na **seção 6.4.1**), e que todo e qualquer outro evento fluidodinâmico que venha a causar uma queda semelhante deve ser identificado e ter o algoritmo desabilitado ao longo de sua duração, do contrário poderá haver emissão de um falso positivo.

Parte de um princípio simples de que o escoamento pode ter seu sinal de pressão em regime permanente caracterizado por quatro variáveis estatísticas elementares: duas medidas de valor central (na realidade duas médias simples, uma anterior, e uma atual), e duas medidas de dispersão (na realidade dois desvios padrões, um anterior e um atual). Tão somente estas variáveis irão inferir acerca da existência de um vazamento de maneira significativa.

6.12.2. Descrição

Considere uma amostragem com um número significativo de pressões ao longo do tempo (n_p), grande o suficiente para ser dividido em duas partes ou conjuntos, que podem ou não ter o mesmo número de elementos, números estes configuráveis. Como a divisão é feita ao longo do tempo, na sequência de chegada, os dois conjuntos resultantes são respectivamente chamados de anterior (contendo $n_{anterior}$ elementos) e atual (contendo $n_p - n_{anterior}$ elementos). O que se quer testar é se a

média de pressão atual variou de maneira significativa, em relação à anterior. Para tal, usa-se a distribuição t de Student (MARKOWSKI & MARKOWSKI^[193]), para teste de significância de duas médias de variáveis aleatórias independentes.

O critério de definição dos conjuntos anterior e atual é configurável e leva em consideração usualmente um múltiplo do tempo de trânsito que a onda de pressão leva para ir de um contorno ao outro do duto.

Considere as definições das Eqs. 6.59 a 6.62 que trazem as médias anterior e atual respectivamente, bem como dos desvios padrões, onde n_p é o número total de pressões amostradas:

$$\bar{P}_{anterior} = \frac{1}{n_{anterior}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{anterior}} P_i \right) \quad (6.59)$$

$$\bar{P}_{atual} = \frac{1}{n_p - n_{anterior}} \cdot \left(\sum_{i=n_{anterior}+1}^{np} P_i \right) \quad (6.60)$$

$$\sigma_{anterior}^2 = \frac{1}{n_{anterior} - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_{anterior}} (P_i - \bar{P}_{anterior})^2 \quad (6.61)$$

$$\sigma_{atual}^2 = \frac{1}{n_p - n_{anterior} - 1} \cdot \sum_{i=n_{anterior}+1}^{np} (P_i - \bar{P}_{atual})^2 \quad (6.62)$$

O parâmetro t_{std} da distribuição de Student é então calculado (Eq. 6.63):

$$t_{std} = \sqrt{\frac{n_{anterior} \cdot (n_p - n_{anterior}) \cdot (np - 2)}{n_p}} \cdot \frac{\bar{P}_{atual} - \bar{P}_{anterior}}{\sqrt{\sigma_{anterior}^2 \cdot (n_{anterior} - 1) + \sigma_{atual}^2 \cdot (n_p - n_{anterior} - 1)}} \quad (6.63)$$

O número de graus de liberdade do experimento é então estipulado com base em duas amostras independentes, Eq. (6.64):

$$n_{std} = n_p - 2 \quad (6.64)$$

Assim, a probabilidade de haver uma alteração significativa entre uma média e outra é definida pela probabilidade do teste de Student (Eq. 6.65):

$$P_{vazam} = P_{std}(t_{std}, n_{std}) \quad (6.65)$$

onde P_{std} é calculado a partir da Eq. (6.66):

$$P_{std}(t_{std}, n_{std}, \bar{P}_{anterior} > \bar{P}_{atual}) = P_{vazam} =$$

$$= \int_{-\infty}^{t_{std}} \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot n_{std}}} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n_{std}+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_{std}}{2}\right)} \cdot \left(1 + \frac{t^2}{n_{std}}\right)^{-\left(\frac{n_{std}+1}{2}\right)} dt \quad (6.66)$$

sendo a função Gamma definida por (MARKOWSKI & MARKOWSKI^[193]):

$$\Gamma(m) = \int_0^{+\infty} t^{m-1} \cdot e^{-t} \cdot dt = (m-1)! \quad (6.67)$$

6.12.3. Limiares/batentes:

Devido à simplicidade da técnica, quase não há processo de sintonia, havendo sim a determinação dos valores considerados “representativos” das médias e dos desvios padrões do sinal da pressão termodinâmica de escoamento no ponto. A probabilidade na qual um vazamento é declarado também é objeto de alguma sintonia, e de um balanço entre confiabilidade e sensibilidade.

6.12.4. Algoritmo de detecção de vazamentos - ADV

O ADV é trivial e consiste então na amostragem sistemática da pressão, no cálculo das diferentes médias de forma sistemática também, emitindo um alarme toda vez que a probabilidade de alteração ultrapassar um limiar configurado, ou seja:

$$Se(P_{std} > \varepsilon) \Rightarrow \Lambda \equiv 1 \quad (6.68)$$

onde Λ é a variável lógica que define o disparo do alarme de vazamento.

6.12.5. Categoria e nomenclatura de acordo com API RP 1130^[1]

Essa tecnologia é descrita no API RP 1130^[1] como categoria B.4, “*Pressure/Flow monitoring CPM*”.

6.12.6. Principais virtudes

A grande virtude dessa tecnologia é poder ser usada em dutos de líquidos e gás de maneira praticamente indistinta além de lançar mão da instrumentação já existente no duto.

Não necessita do sinal de vazão, bem como evita as complexidades típicas de tal sinal, tais como variação na incerteza, manutenção em campo muito limitada e

particularização por cenário de aplicação, i. e., o medidor de vazão para gasodutos é dedicado e não pode ser usado em oleodutos.

Apresenta um conceito relativamente simples, apesar de usar equações tanto complexas sob o ponto de vista de sua resolução.

6.12.7. Principais limitações

Devido à ausência de outras variáveis importantes de escoamento para análise, como vazão ou velocidade, não cobre importantes eventos de escoamento transiente, como partida e parada de bombeamento, o que compromete de forma definitiva sua confiabilidade no parâmetro **C2**, descrito na **seção 6.6.1**.

Apresenta confiabilidade questionável, já que qualquer outro transiente que não o próprio vazamento, será apontado como vazamento, o que caracterizará um falso positivo ou falso alarme comprometendo o parâmetro C1 descrito na **seção 6.6.1**.

Apresenta sensibilidade questionável, já que a resposta do sinal de pressão será fortemente impactada pelo tamanho do trecho que se quer monitorar, e pelos batentes de probabilidade.

Esta tecnologia não apresenta virtudes no cenário objeto deste trabalho, embora possa ser usada de forma auxiliar em outros cenários.

6.13. **Tecnologias acústicas**

6.13.1. Introdução

Existem dois grandes conjuntos de tecnologias acústicas para detecção de vazamentos em dutos. Aquelas que analisam o sinal que se propaga pelo fluido (aqui intitulada tipo I), e aquelas que analisam o sinal que se propaga pela estrutura do duto, tipo II (GAO ET AL.^[194] e AHADI & BAKHTIAR^[195]). Apenas a primeira será aqui abordada, uma vez que a segunda apresenta poucos casos de indústria conhecidos, onde estes estão mais associados à distribuição urbana de água, e alguns poucos relatos da rede urbana de baixa pressão de gás.

Embora o problema a rigor esteja todo acoplado, i. e., o material do duto e a vibração da estrutura influenciam nos fenômenos ondulatórios que acontecem no fluido e vice versa, essa simulação completamente acoplada ainda não é viável em termos de modelagem e de tempo computacional requerido (i. e., deve acontecer no máximo em tempo real) para caracterizá-la plenamente.

Há que se diferenciar também o conceito de monitoração do conceito de inspeção. Por exemplo, pig de localização de vazamentos, que pode utilizar tecnologia acústica, não é uma ferramenta de monitoração.

As tecnologias do tipo I partem todas do princípio de que no momento que um específico tipo de vazamento, qual seja, o vazamento abrupto, é aberto, ele gera um pico de pressão que se propaga pelo fluido em direção aos contornos do segmento monitorado.

A discussão acerca de qual vazamento é abrupto o suficiente para ser detectado pelas tecnologias acústicas é subjetiva: a maior parte dos vazamentos provocados por corrosão interna e externa podem gerar pits, que se desenvolvem sabidamente de forma lenta podendo levar alguns minutos para atingirem seu formato final. Algumas trincas também se propagam lentamente, ao passo que outras são propagadas de forma praticamente instantânea. Outro exemplo são as soldas mal feitas ou com imperfeições que podem igualmente gerar vazamentos de abertura lenta ou abrupta. O fato objetivo é que essa tecnologia deixa de fora um conjunto relevante de causas de vazamentos, sendo a corrosão a principal delas.

As estatísticas sobre causas de vazamentos foram comentadas na **seção 6.3**, e a título de exemplo, tomando as estatísticas do PHMSA^[196] para o ano de 2006, as duas corrosões (interna e externa) representam a maior parte das causas dos vazamentos ocorridos em gasodutos americanos naquele ano.

Por outro lado, alguns sinais de pressão presentes no dia a dia operacional de dutos podem tanto mascarar quanto induzir falsos positivos e, desta forma, precisam ser objetivamente filtrados (e. g., a vibração de válvulas).

A tecnologia acústica é uma das mais antigas tecnologias para detecção de vazamentos conhecida, estando presente na indústria de dutos de água, pelo menos desde o final da década de 60, início dos anos 70 (FUCHS & RIEHLE^[197], BAGHDADI & MANSY^[198]). O fundamento físico básico, qual seja, a identificação de um pico de pressão gerado pelo vazamento, que se propaga em direção aos contornos, permanece o mesmo.

6.13.2. Descrição

Sensores de pressão são montados de forma intrusiva no duto, e interligados a uma estação local de campo, usualmente proprietária, distinta do CLP convencional usado para todas as outras funções de automação relativas ao duto. Esses sensores são especiais, de grande sensibilidade (e normalmente baixa exatidão), capazes de amostrar centenas ou até mesmo milhares de dados por segundo. Tais estações se comunicam com uma estação central ou mestra, através do sistema de comunicação usado pelo duto. A estação mestra pode estar localizada na sala de operação do

duto, ou, a depender da arquitetura e do fabricante, ter uma ou mais estações de campo desempenhando o papel duplo de estação mestra e de campo, sendo assim necessário apenas o envio do alarme à sala de operação. As estações (inclusive a mestra) devem estar sincronizadas através de algum procedimento rigoroso (e. g., alguns fornecedores usam antenas de GPS para tal). Considere a **Figura 6.14**.

As estações de campo são capazes apenas de informar um tempo de um evento de pico de pressão passando. A tecnologia se encarrega de identificar o pico principal (ou primário) da onda de pressão gerada pelo vazamento.

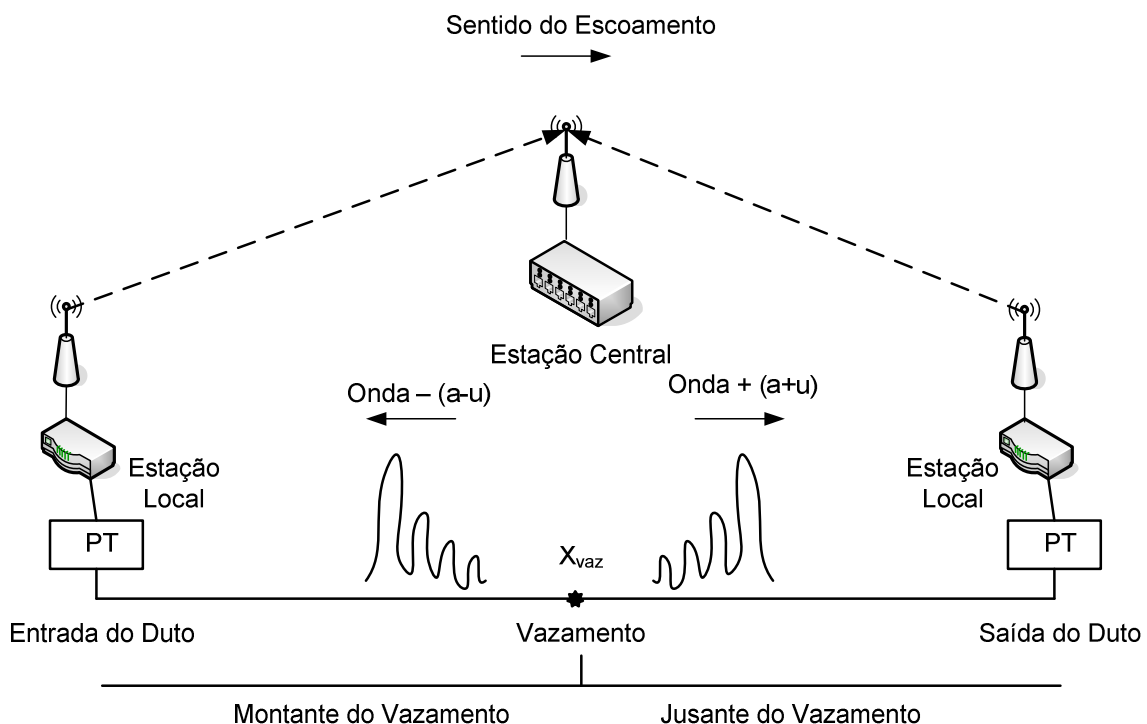


Figura 6.14 – Descrição esquemática da tecnologia acústica de LDS

Duas nomenclaturas na literatura se referem ao mesmo fenômeno físico, qual seja a onda acústica se propagando no duto: NPW (“*Negative Pressure Wave*”, onda de pressão negativa, numa referência ao trem de ondas que se propaga contra fluxo i. e., em direção à entrada do duto) ou onda de rarefação (“*rarefaction wave*”).

Algumas tecnologias empilham eventos suspeitos na memória da estação de campo e os enviam à estação mestra somente quando necessário, fazendo uso otimizado do sistema de comunicação da automação do duto. Já outras tecnologias enviam informações à estação mestra ou mesmo a outra estação de campo, a cada varredura do sistema de comunicação da automação do duto.

Conforme já citado, o sistema de comunicação é o único componente de automação comum usado pela tecnologia acústica de detecção de vazamentos e a automação do duto como um todo. Usualmente todos os outros elementos integrantes de tal tecnologia são proprietários e nem sempre seguem a arquitetura ilustrada na **Figura 5.1**.

6.13.3. Algoritmo de detecção de vazamentos - ADV

O ponto de maior diferenciação se dá na forma com a qual cada tecnologia identifica o pico de pressão relativo ao vazamento. Algumas tecnologias se utilizam de frequência característica do evento, afirmando que o pico de pressão característico do vazamento tem faixa de frequência típica, ou pelo menos o evento vazamento pode ser caracterizado através de autocorrelação de sua frequência ou seu ruído (WATANABE ET AL.^[199], SOUSA ET AL.^[200] e KIM & LEE^[201]). Análise de harmônicos e sua caracterização são preconizadas por FERRANTE & BRUNONE^[202]. Já as Transformadas *Wavelet* são analisadas por FERRANTE & BRUNONE^[203], GE ET AL.^[204], XU ET AL.^[171] e ZHANG ET AL.^[159].

6.13.4. Consequências físicas do paradigma utilizado

Como citado, existe a dependência de um evento abrupto, i. e., a tecnologia não é capaz de captar vazamentos que se desenvolvam lentamente.

A propagação do sinal no trajeto que parte do local de sua geração (ponto do vazamento) até os sensores posicionados nos contornos do segmento monitorado, é atenuada por duas propriedades de fluidos: compressibilidade de gases, e viscosidade de líquidos. Nenhum obstáculo deve existir no referido trajeto, e. g., pigs. A captação do sinal a jusante do pig, no sentido da propagação da onda de pressão, é apenas teoricamente possível embora improvável, subjetivo, bastante atenuado e dependente do tipo de pig. Na prática o pig inviabiliza a passagem do sinal na maioria das vezes. Golfadas podem ser atravessadas, mas alteram significativamente a velocidade de propagação da onda de pressão, além de serem mais um forte atenuador dessa propagação.

Ainda sob o ponto de vista da propagação em linhas de gás, existe o fato da velocidade sônica de propagação da onda de pressão ser uma propriedade de estado, sendo, por conseguinte variável com P e T , ρ_G , ρ_L e principalmente o padrão de escoamento.

A **Figura 6.15** ilustra tal variação num gasoduto bifásico nacional. No exemplo ilustrado o valor da velocidade sônica (curva preta) varia de 150 a 900 m/s a

depender da posição ao longo do duto, a qual determina as condições comentadas no parágrafo anterior. A mesma figura ilustra o perfil de elevação (curva vermelha) de tal duto o qual determina o padrão de fluxo.

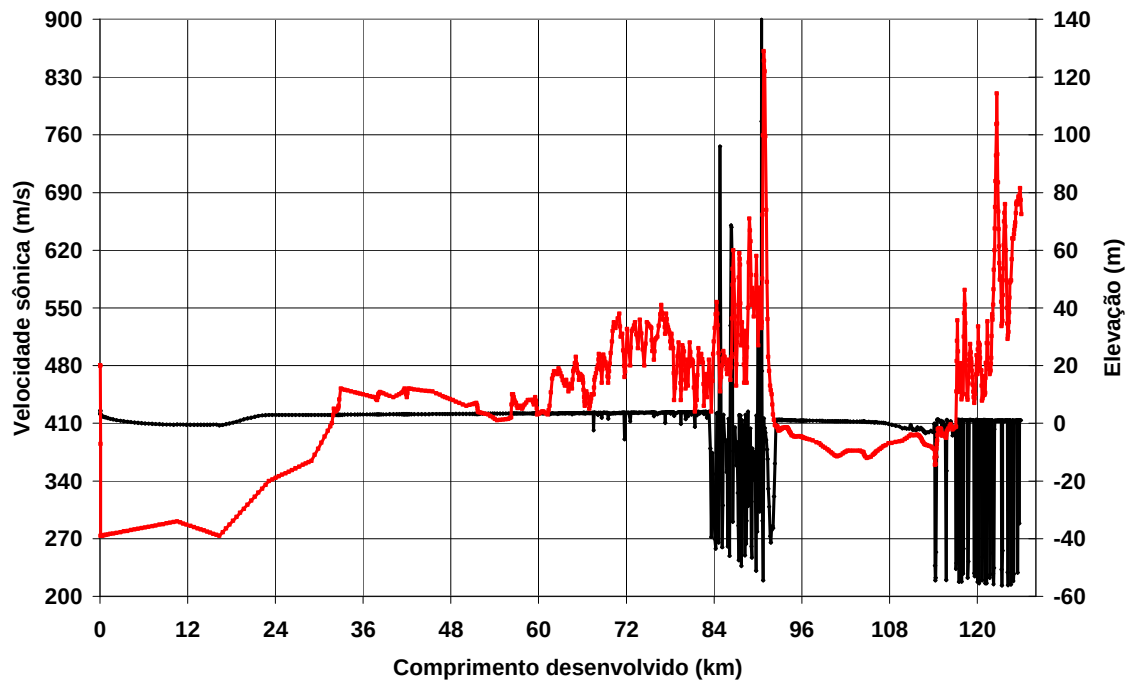


Figura 6.15 – variação de velocidade sônica ao longo de um gasoduto bifásico

6.13.5. Eguacionamento

Para o caso de gasodutos bifásicos *offshore*, com enormes espaçamentos entre tomadas de medição, a localização do vazamento (que é a única forma de confirmar se o mesmo foi detectado, em tal tecnologia) é função de diferentes fatores e variáveis. Neste caso a velocidade sônica a montante do vazamento difere daquela de jusante. Nestes dutos, é comum uma perda significativa de temperatura e de pressão ao longo do segmento monitorado, além da constante mudança de padrão de escoamento ilustrada na **Figura 6.15**.

Em adição, neste cenário, além da velocidade sônica a montante do vazamento diferir daquela de jusante, a velocidade de escoamento pode ser relevante quando comparada com a velocidade sônica. Alguns gasodutos podem apresentar um aumento de até cinco vezes na velocidade do escoamento, entre sua entrada (onde usualmente é baixa) e sua saída (onde usualmente é alta).

Neste caso, a localização é dada pela Eq. (6.69)^{[170][171][201]}, a qual leva em consideração duas velocidades sônicas médias, uma no segmento a montante do vazamento, e outra a jusante do mesmo, e também duas velocidades médias de escoamento.

$$x_{vaz} = \frac{L_{seg}}{1 + \frac{(a_{mon} - u_{mon})}{(a_{jus} + u_{jus})} \cdot \frac{t_{ent}}{t_{sai}}} \quad (6.69)$$

Nesta equação, os tempos t_{ent} e t_{sai} são os tempos registrados pelos sensores posicionados respectivamente na entrada e na saída do segmento monitorado. As velocidades sônicas a_{mon} e a_{jus} são respectivamente as velocidades sônicas médias (usualmente sintonizadas) à montante e à jusante do ponto do vazamento, o mesmo valendo para os subscritos das velocidades de escoamento u_{mon} e u_{jus} . L_{seg} é a distância entre os dois sensores acústicos, e x_{vaz} é a posição estimada do vazamento, sendo a posição do sensor de entrada o zero de referência.

6.13.6. Categoria e nomenclatura de acordo com API 1130^[1]

Essa tecnologia é descrita no API RP 1130^[1] como categoria B.5, “Acoustic/negative pressure wave”.

6.13.7. Principais virtudes

Podem ser usadas em dutos de líquidos e gás de maneira praticamente indistinta sob o ponto de vista da instalação, embora com desempenhos de sensibilidade e confiabilidade relevantemente diferentes, i. e., o desempenho nas linhas de líquidos é notadamente superior.

Não necessita do sinal de vazão, ou seja, evita as complexidades típicas de tal sinal, tais como variação na incerteza, manutenção em campo muito limitada, e particularização por cenário de aplicação, i. e., o medidor de vazão para gasodutos é dedicado em não pode ser usado em oleodutos.

Apresenta boa sensibilidade quando instalada em cenário adequado, qual seja, dutos com escoamento monofásico de líquidos com baixo espaçamento entre tomadas de medição.

6.13.8. Principais limitações

É uma tecnologia que exclui uma parte relevante dos vazamentos apontados pelas estatísticas, quais sejam, aqueles que se desenvolvem lentamente, uma vez que exige um pico de pressão gerado pelo vazamento. O comentário feito no antepenúltimo parágrafo da **seção 6.13.1**, referente às estatísticas de 2006, é um bom exemplo de tal limitação. Assim, comprometerá de maneira relevante o item de confiabilidade **C2**, descrito na **seção 6.6.1**.

Apresenta também o baixo item de confiabilidade **C3**, conforme descrito na **seção 6.6.1**, uma vez que caso não seja possível identificar o pico principal ou primário do sinal de pressão gerado pelo vazamento, dificilmente indentificará um pico secundário, perdendo assim a integralidade da função detecção. É o chamado “*one shot approach*” ou, mais tecnicamente definido “*onset LDS*”, ou seja, tem apenas uma chance de identificar o vazamento.

À medida que a pressão da linha cai, o desempenho cai de forma relevante, a depender do algoritmo e dos filtros empregados. O ponto de corte experimental é de 10 bara, onde o desempenho passa a cair em limites não comerciais.

A presença de pigs na linha, em especial o pig do tipo espuma, atenuará parte do sinal de pressão e refletirá a outra parte, degradando fortemente o sinal de pressão gerado pelo vazamento e na prática inviabilizado sua detecção pelo sensor posicionado após o pig no sentido da propagação do sinal.

Uma parte relevante dessas tecnologias trabalha com a configuração de uma velocidade sônica constante, obtida através de processo de sintonia durante a instalação do sistema. Num gasoduto, a velocidade sônica muda de forma imprevisível, a depender das variáveis já comentadas (P , T e padrão de escoamento), além da componente da velocidade de escoamento.

Há dúvidas quanto a sua confiabilidade no critério **C1** descrito na **seção 6.6.1**, uma vez que a eliminação de falsos positivos são funções diretas da qualidade da filtragem e da suavização dos dados de pressão, bem como do algoritmo empregado por cada fornecedor. A única forma de avaliá-la é sua apreciação por um tempo longo em operação, algo a ordem de meses, o que permitirá a observação de todas as variantes operacionais do duto, inclusive os transientes de partida e parada da linha.

A maior parte dessas tecnologias é proprietária e dedicada, tanto no hardware quanto no software, sendo este último usualmente encapsulado em pastilhas de memória PROM, causando ampla dependência do fornecedor, com seus impactos diretos em custos não somente de aquisição, mas também operacionais.

Ainda devido ao fato de ser uma tecnologia proprietária e dedicada, não aproveita praticamente nenhum elemento de automação do duto além de seu sistema de comunicação. Em adição há necessidade de posicionar no campo toda sua estrutura, incluindo remota de conversão A/D, estação de campo, etc., os quais podem competir por espaço físico em sítios operacionais restritos, como é o caso das plataformas *offshore*.

Sobre o parâmetro de desempenho sensibilidade, CHUANHU ET AL.^[205] descrevem um procedimento de cálculo teórico, i. e., da vazão do menor vazamento detectável ao se empregar a tecnologia acústica, num oleoduto de 32 km de comprimento, a uma vazão de 600 t/h. O ponto de melhor sensibilidade se dá cerca de 4 km da entrada do duto, onde o menor vazamento detectável é de cerca de 10 t/h ou aproximadamente 2% da vazão nominal do duto, sendo o pior no contorno de saída onde o menor vazamento detectável é de cerca de 80 t/h ou 13% da vazão nominal do duto. O aumento do espaçamento entre tomadas de medição, bem como o aumento da compressibilidade do fluido (e. g., um gasoduto) apresentariam um efeito degradador (i. e., abaixariam) ainda mais essa sensibilidade.

Finalmente é uma tecnologia de difícil análise de sensibilidade teórica, a priori, i. e., sem testes de campo, baseada apenas em simulação numérica, para uma gama abrangente de situações operacionais. A simulação da propagação da onda de pressão é possível, embora computacionalmente cara e de complexa depuração. Não é trivial interagir tais dados simulados com tecnologias encapsuladas em *firmware* (para que estas possam atestar desempenho), aumentando em muito o tempo e o gasto de atividades pré-contratuais de estimação de desempenho, quando possível (e. g., longos gasodutos bifásicos levam tal estimação para além dos limites do estado da arte tanto da modelagem, quanto dos equipamentos de computação). Como exemplo, considere a geração de 10 min de dados simulados numa taxa de 500 Hz, num gasoduto de 100 km com a presença de pigs e golfadas.

Assim, esta tecnologia não se adéqua ao cenário objeto deste trabalho, embora possa ser usada em outros cenários, tais como oleodutos de baixo espaçamento entre tomadas de medição, caso seu custo seja competitivo em relação às demais.

6.14. Solução escolhida e seus elementos constitutivos

6.14.1. Introdução

Observado o cenário de gasodutos bifásicos e grandes espaçamentos entre tomadas de medição, as tecnologias de análise de pressão no ponto, e acústica são descartadas pelo grande comprimento dos dutos alvo, além das outras limitações citadas nas **seções 6.12.7 e 6.13.8**.

Quanto aos modelos fluidodinâmicos, a única certeza é a presença do estimador de estados. São diversas as possibilidades de algoritmos, bem como combinações destes, embora a preferência inicial seja apenas por um único algoritmo, por questões de confiabilidade.

Dentre as opções, a escolha inicial se dá numa sequência lógica e necessária que são os balanços de inventário, num primeiro momento com um ADV trivial, visando, num segundo momento, incorporar o balanço de inventário com algoritmo estatístico baseado em testes de probabilidade seqüencial.

Assim a primeira escolha, que aborda os critérios de desempenho confiabilidade e sensibilidade, definidos na **seção 6.6** envolve os seguintes módulos:

- balanço de inventário total, usando o estimador de estados bifásico definido nos capítulos 2, 3 e validado no 4, i. e., a formulação SPM-4;
- algoritmo de teste de probabilidade seqüencial para assegurar confiabilidade.

Considere o caso exemplo que demonstra o algoritmo estatístico de probabilidade seqüencial em comparação a um modelo fluidodinâmico que empregue um algoritmo trivial de comparação.

6.14.2. Caso exemplo

O caso teórico descrito na **seção 6.4** (que envolve escoamento bifásico), ilustrado nas **Figuras 6.3 e 6.4**, foi usado de acordo com os passos citados na sequência:

- Incertezas nas medições foram introduzidas através de um gerador aleatório normal de erros^[208]. A incerteza de vazão foi estabelecida em 2% da vazão momentânea medida, ao passo que a incerteza do inventário calculado foi também aleatoriamente estabelecida em 2%;
- Embora sejam duas vazões, uma para gás e outra para líquidos, a incerteza foi inserida diretamente na vazão total, por uma questão de praticidade;
- O simulador comercial OLGA foi usado para calcular tanto as condições de contorno quanto a variação de inventário, uma vez que o objetivo é apenas demonstrar o algoritmo de detecção;
- Uma taxa de varredura de 10 s foi usada, o que se enquadra dentro da normalidade em gasodutos onde os instrumentos estejam geograficamente distribuídos;
- Embora seja possível sua simulação, não foram introduzidas falhas de comunicação, congelamento de dados, dados fora de faixa ou dados ruidosos, o que certamente impacta de forma relevante o desempenho do algoritmo de detecção de vazamentos;
- Dois casos serão ilustrados: com e sem a utilização do processo de suavização.

- A vazão mínima detectável seguiu o parâmetro conservativo estabelecido por RACHID ET AL.^[119], Eq. (6.20), **seção 6.9.2**, qual seja, 2,82%, com base na incerteza de vazão de 2% nos contornos do duto;
- O desvio padrão $\sigma_{\dot{m}_c}$ foi mantido igual ao valor da vazão mínima detectável;
- O algoritmo estatístico foi configurado para alarmar quando uma probabilidade de falsos alarmes for de 1% ou menor;
- Conforme sugerido na **seção 6.11.4**, foram inseridos testes simultâneos para 10%, 5% e 2,82 % da vazão nominal do duto;
- O algoritmo de balanço trivial de inventário foi também aplicado para comparação;
- Todos os vazamentos desse exemplo foram posicionados no centro do duto, i. e., no posição 50 km.

6.14.3. Vazamento de magnitude relevante

Inicialmente foi simulada a abertura de um vazamento através de um furo de 1,0 in, no tempo $t = 2h$ (7200 s), o qual forneceu uma vazão vazada imediata de 14% da vazão nominal, a qual, no longo tempo (46 h), se estabiliza ao redor de 21% da vazão nominal. Esse vazamento é basicamente detectado em tempo da ordem do tempo sônico, i. e., o tempo da onda de pressão transitar do ponto do vazamento aos contornos do segmento monitorado. A **Figura 6.16** ilustra as vazões obtidas em tal vazamento.

A **Figura 6.17** ilustra $\dot{m}_c[t]$ com e sem o processo de suavização (descrito na **seção 5.6.2**). A **Figura 6.18** ilustra o comportamento dos alarmes do algoritmo trivial (curva rosa) e trivial com vazões suavizadas (média móvel de 15 varreduras).

Chama à atenção a confiabilidade: ambos alarmam aproximadamente no mesmo tempo, mas o teste sem a suavização oferece uma série de indicações espúrias (alarmes falsos). Uma ampliação do momento da detecção segue na **Figura 6.19**.

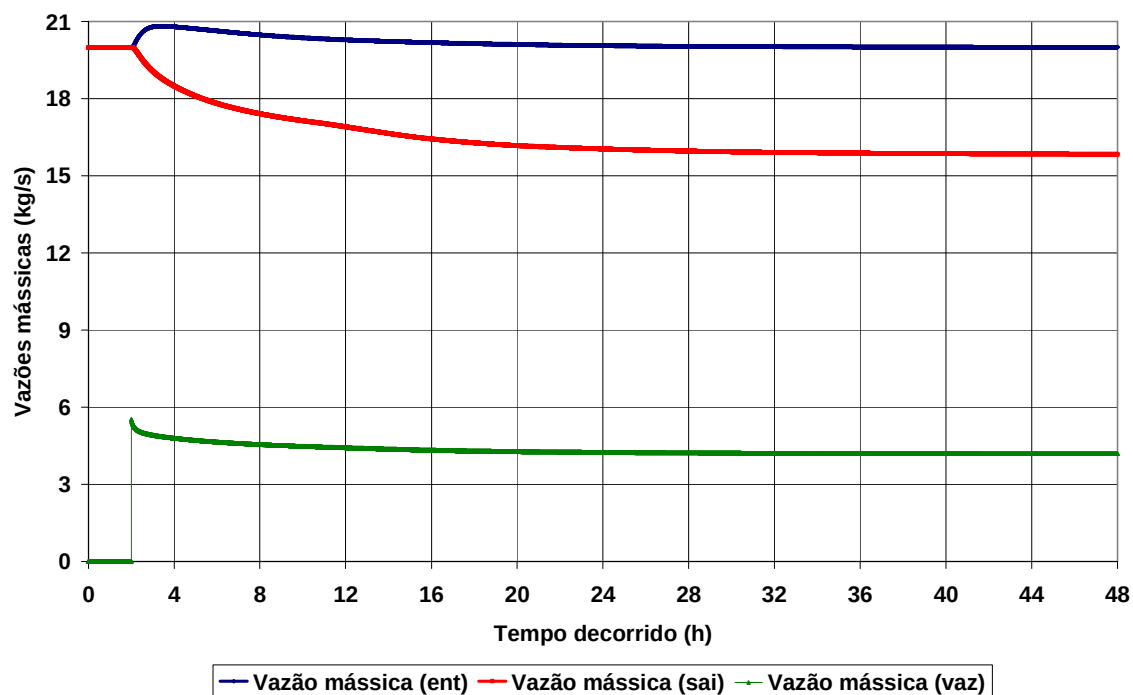


Figura 6.16 – Vazões de entrada, saída e de vazamento para furo de 1 in

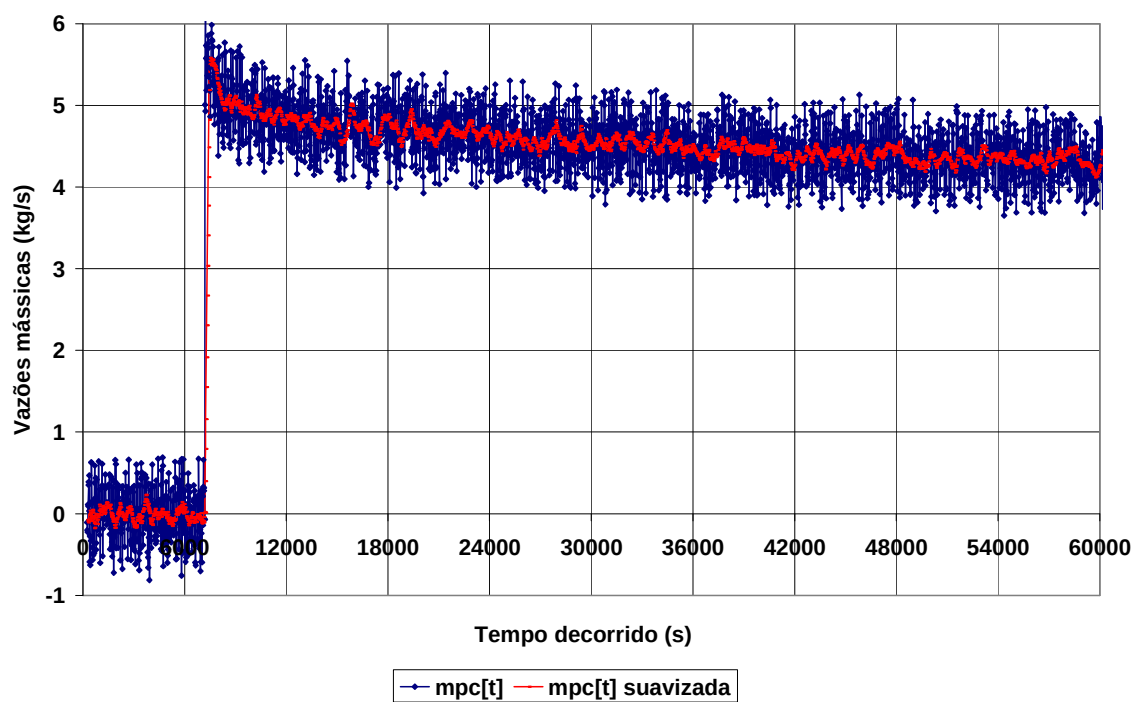


Figura 6.17 – Funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem o processo de suavização, furo de 1,0 in

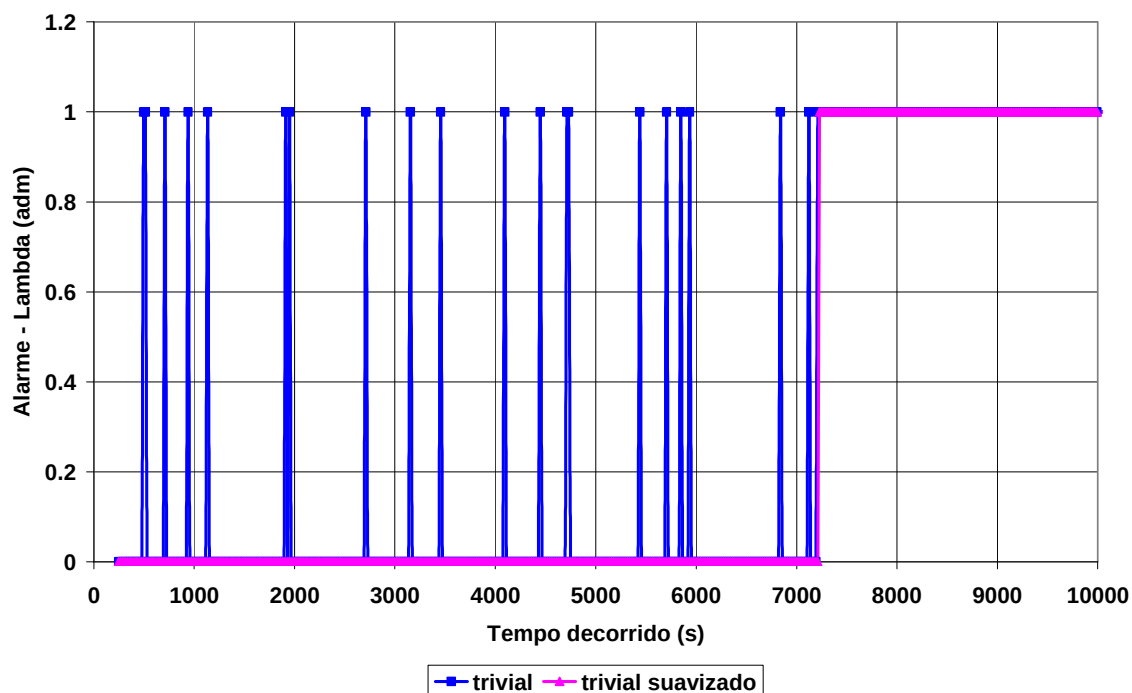


Figura 6.18 – Alarmes para algoritmo trivial e trivial suavizado, furo de 1,0 in

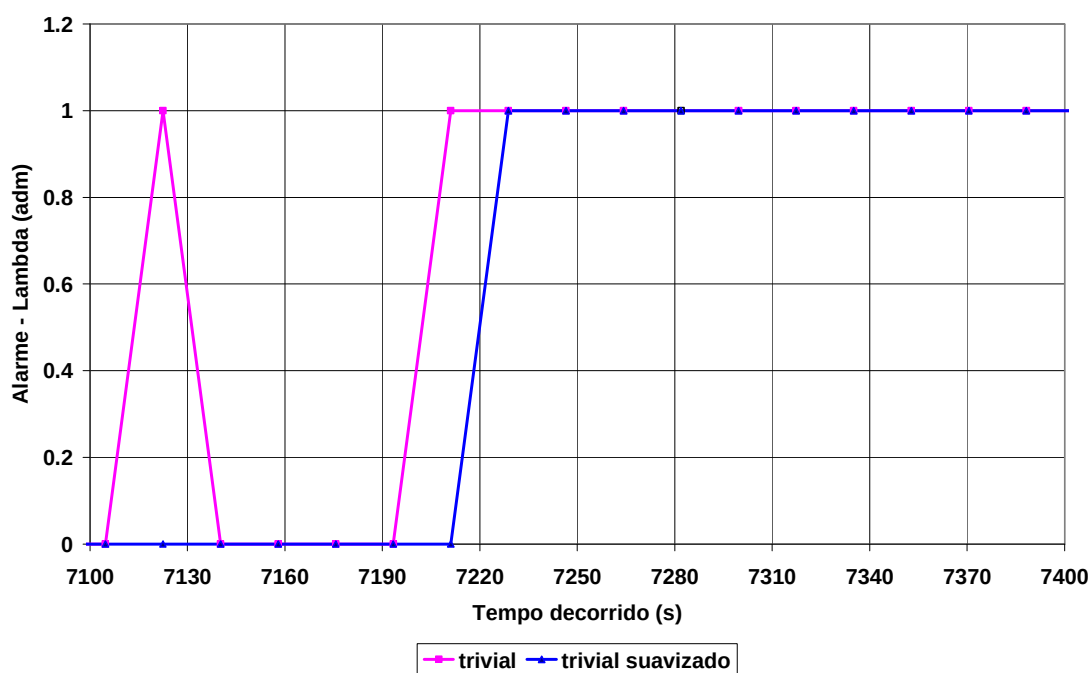


Figura 6.19 – Ampliação do momento da detecção da **Figura 6.18**

A **Figura 6.20** mostra quatro curvas com o algoritmo que realiza o teste de probabilidade seqüencial. A curva vermelha usa o batente mínimo de 2,82 % sem suavização, ao passo que as curvas marrom (batente de 10%), verde (batente de 5%) e azul (batente de 2,82%) são suavizadas com média móvel de 15 varreduras. A **Figura 6.21** traz a ampliação do momento da detecção.

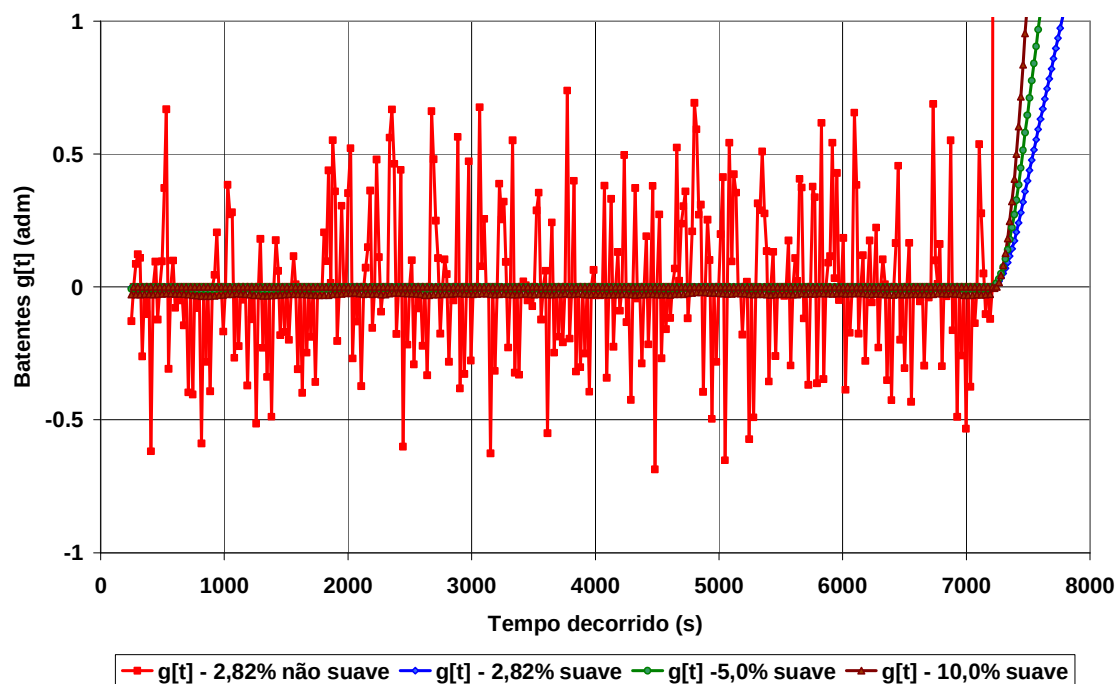


Figura 6.20 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 1,0 in

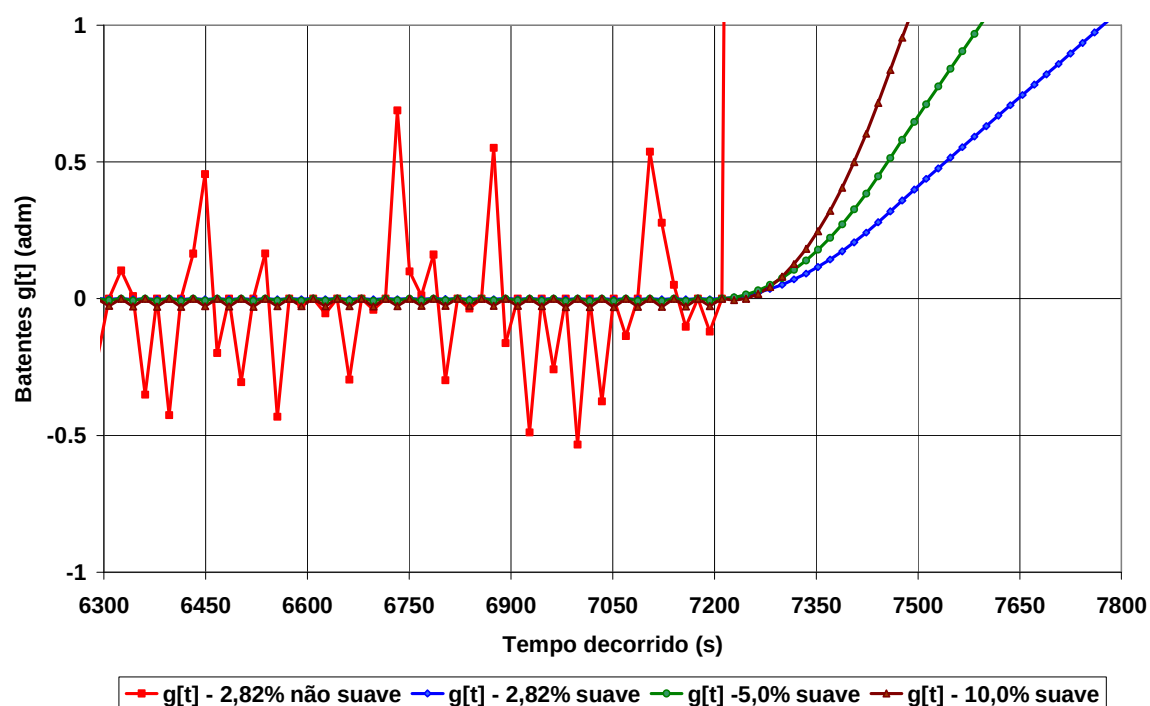


Figura 6.21 – Ampliação do momento da detecção da **Figura 6.20**

A curva vermelha, sem suavização, é a primeira a alarmar uma vez que não foi atenuada pela média móvel e se trata de um vazamento grande. Uma média móvel de 15 varreduras implica num atraso de 150 segundos e numa alteração substantiva do formato da curva. Em vazamentos pequenos a suavização fará diferença. Quanto às outras curvas, a marrom foi a primeira a alarmar, pois é o batente (10%) mais próximo

do vazamento real (14 a 20%). As outras alarmam na seqüência de proximidade ao valor vazado.

6.14.4. Vazamento de magnitude pequena

Um segundo exemplo foi realizado com um vazamento de um furo de 0,30 in, o que fornece uma vazão vazada de aproximadamente 2,4% da vazão nominal do duto, por conseguinte, marginalmente inferior ao limite de 2,82%, porém superior à incerteza da vazão no contorno que é de 2%. Foram mantidos os mesmos batentes de 2,82%, 5% e 10% para o teste de probabilidade seqüencial, bem como de 2,82% para o algoritmo trivial.

A **Figura 6.22** ilustra as vazões nos contornos do gasoduto, bem como a **Figura 6.23** mostra a vazão vazada.

A **Figura 6.24** ilustra as funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem o processo de suavização. Diferentemente do vazamento maior, neste caso o algoritmo trivial leva a uma situação descontrolada sob o ponto de vista da identificação do vazamento, que pode ser ilustrada na **Figura 6.25**.

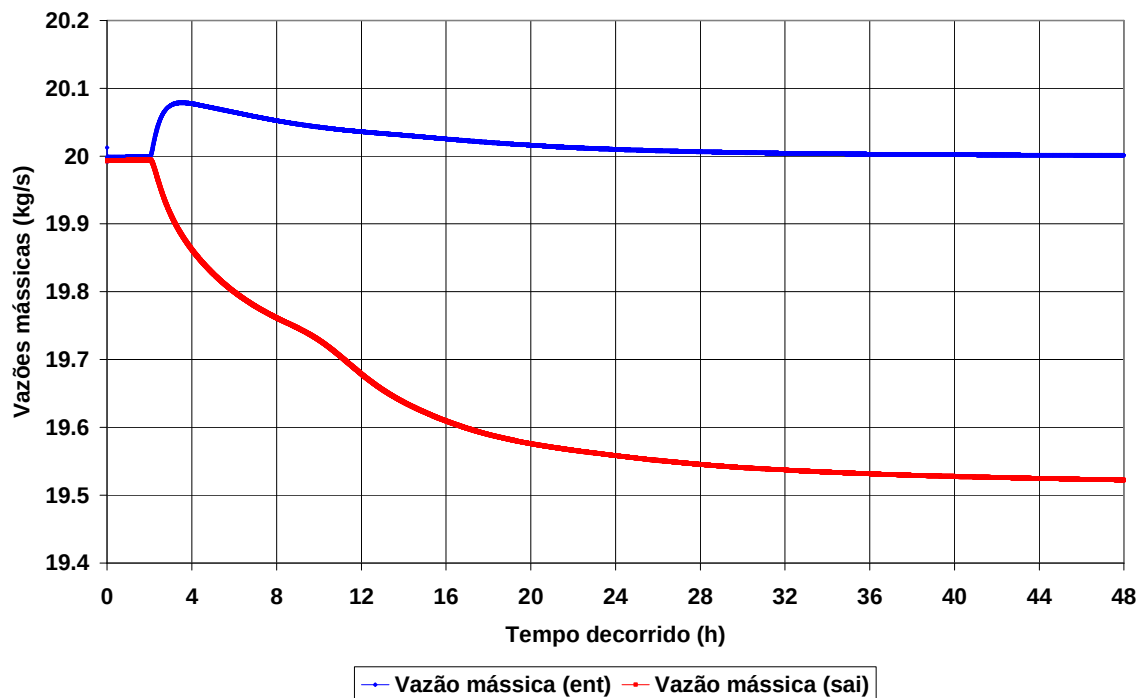


Figura 6.22 – Vazões nos contornos do duto para o furo de 0,30 in

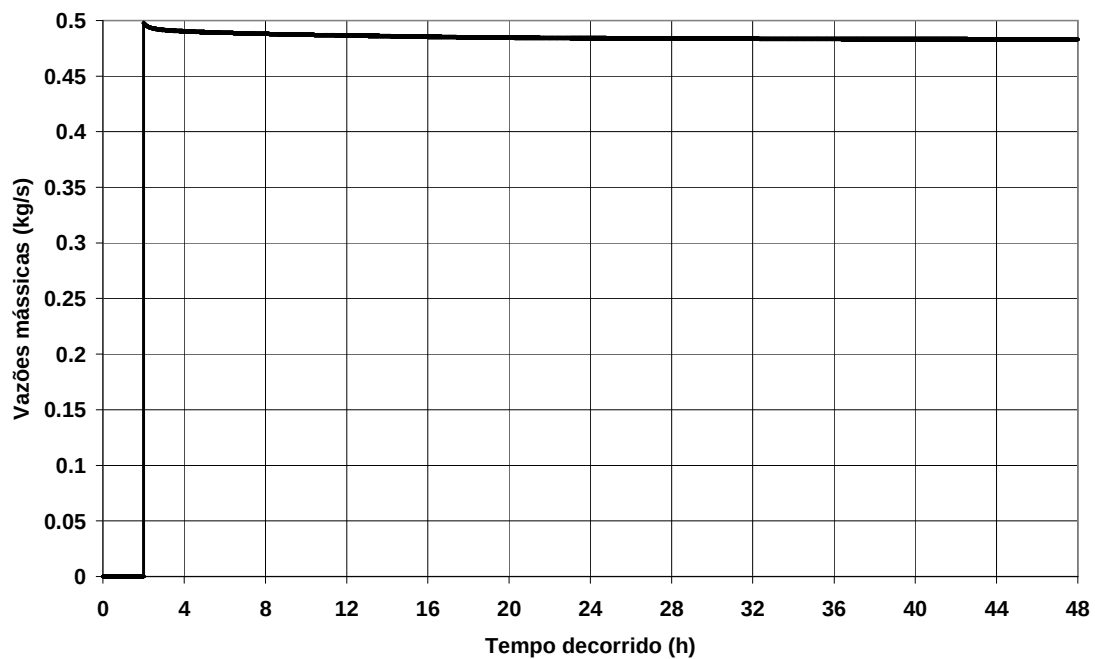


Figura 6.23 – Vazão vazada para o furo de 0,30 in

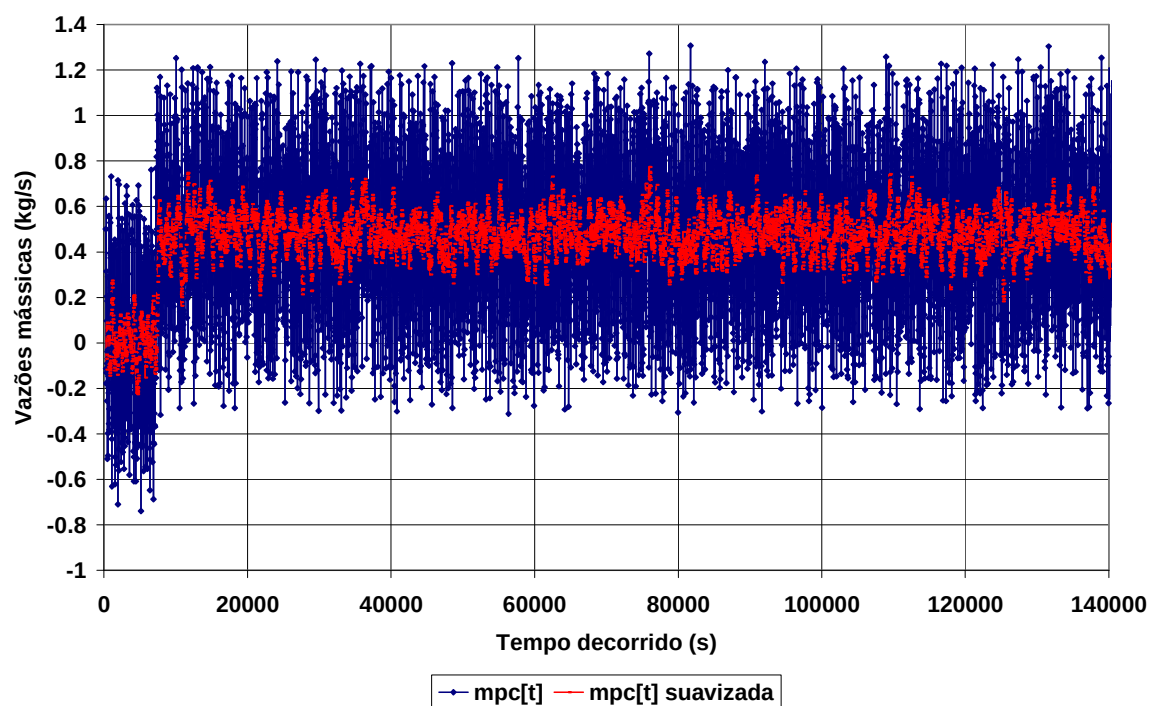


Figura 6.24 – Funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem suavização, furo de 0,30 in (2,4%)

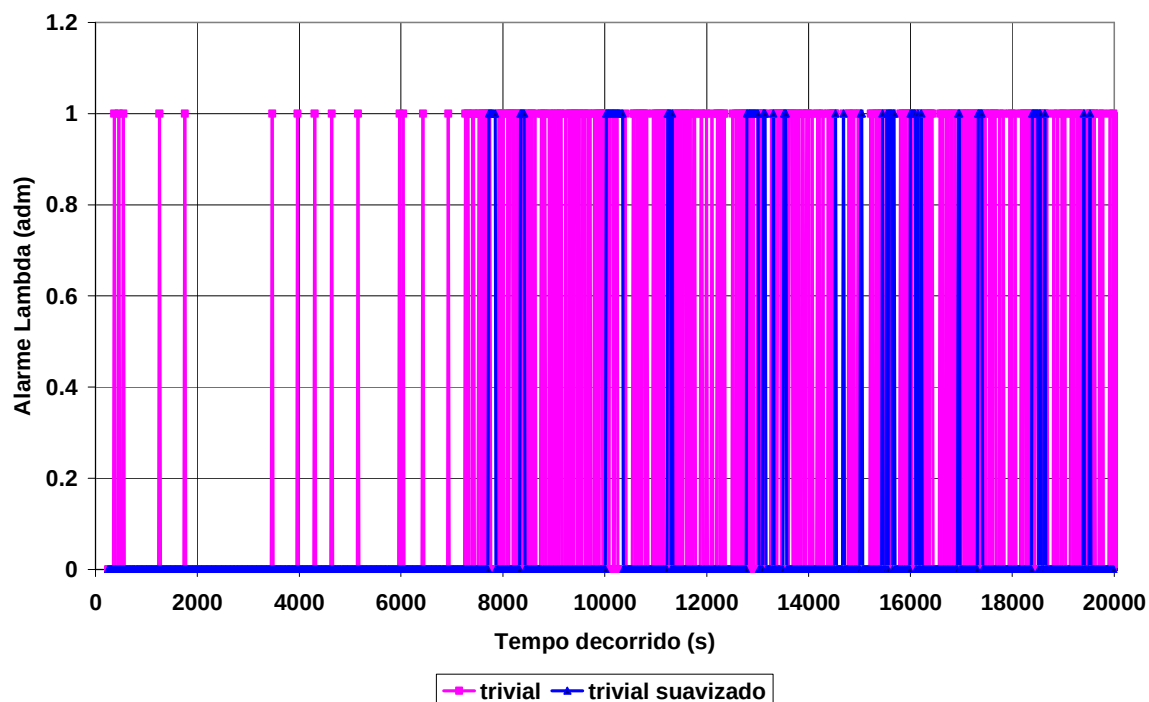


Figura 6.25 – Alarmes para algoritmo trivial e trivial suavizado, furo de 0,30 in (2,4%)

Observa-se que mesmo em pleno vazamento o algoritmo não consegue definir uma tendência, seja com o dado suavizado, seja com o dado bruto. Há uma sequência de alarmes seguidos de anulações do alarme. Manteve-se a virtude do dado suavizado apenas durante o período onde não há vazamento. Neste exemplo o teste de probabilidade seqüencial apresenta o seu maior valor. Os desbalanceamentos vão se acumulando, até que um alarme de 1% de probabilidade de falsos alarmes seja emitido em torno de 20.000 s, ou seja, quase 3 h e quinze minutos após o início do vazamento (**Figura 6.26**).

Respeitadas as proporções o comportamento foi semelhante ao vazamento de maior magnitude: o batente mais próximo do valor real do vazamento, no caso de 2,82% foi o que convergiu, indiferentemente de ser suavizado ou não.

Uma pergunta surge dessa análise: qual o benefício de um alarme tão tardio? Uma situação possível é um segmento de duto *offshore*, e imaginando que essa situação aconteça durante a noite. Esse tempo ganho é importante uma vez que qualquer detecção somente ocorrerá com a identificação visual pelo piloto do helicóptero no dia seguinte. Observe-se que a vazão de 2,4% da vazão nominal é pequena, e está sendo detectada com 99% de probabilidade de acerto.

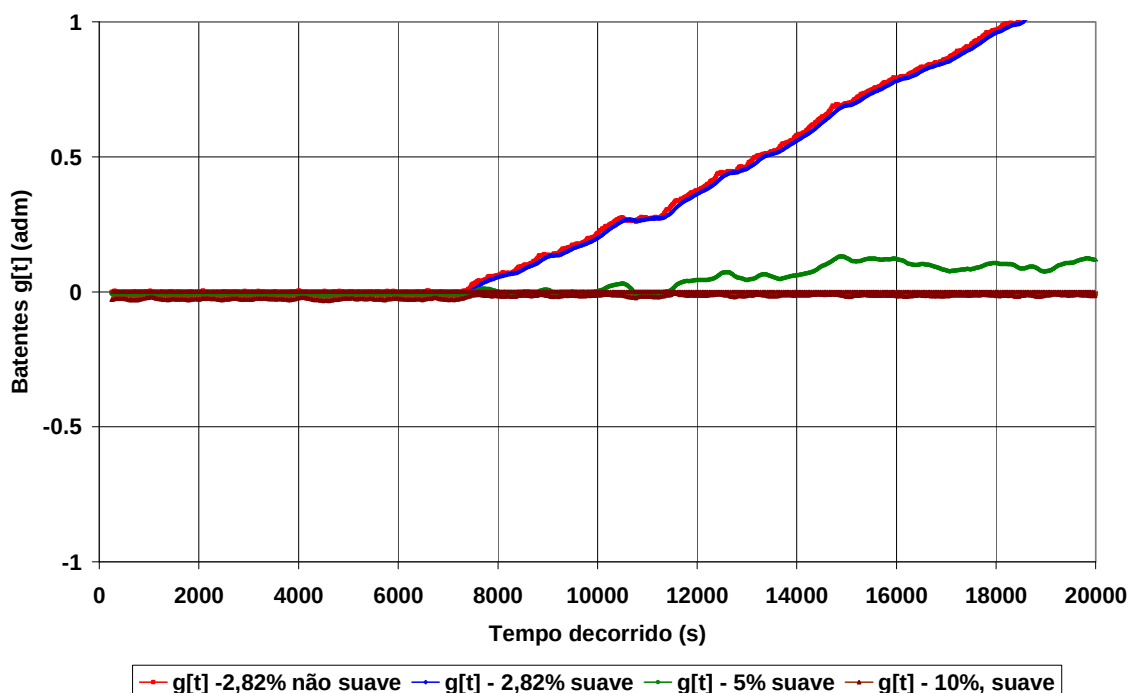


Figura 6.26 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 0,30 in (2,4%)

É importante ressaltar que se trata de um ensaio teórico, com incertezas de medição artificialmente introduzidas, que fez uso de um simulador comercial de gasodutos bifásicos apenas para ilustrar o algoritmo. Elementos de relevância não foram considerados, tais como os erros do modelo do simulador comercial.

6.14.5. Investigando os limites da metodologia

O novo limite a ser testado é uma vazão vazada inferior à incerteza da medição de vazão, porém maior que a condição explicitada na Eq. (6.58), na **seção 6.12.4**:

$$\dot{m}_{vaz}[t] \geq \frac{\dot{m}_{min}}{2} \quad (6.58)$$

Assim escolheu-se um furo de 0,25 in (1,7% da vazão nominal), i. e., maior que a metade do batente mínimo, 1,41%, e menor que a incerteza fixada em 2% nos contornos. A **Figura 6.27** ilustra as funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem o processo de suavização.

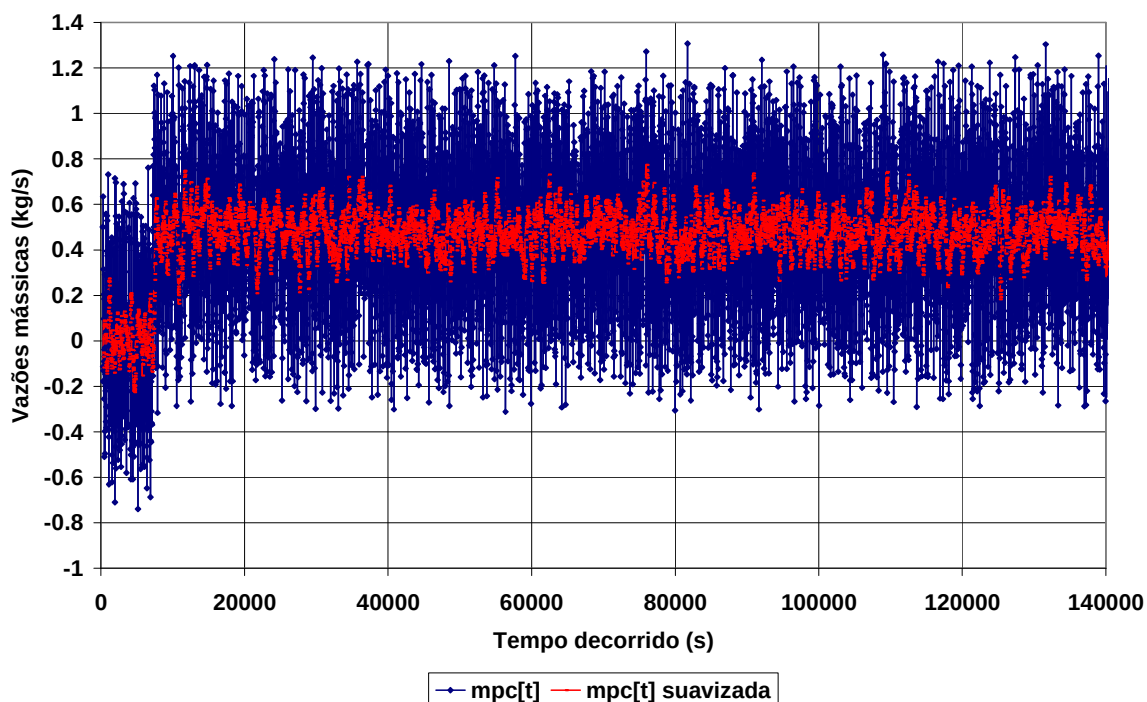


Figura 6.27 – Funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem suavização, furo de 0,25 in (1,7%)

A **Figura 6.28** ilustra que de fato há a detecção, embora num tempo muito grande (12 h e 45 min.). A explicação vem da demonstração do método da probabilidade seqüencial (**seção 6.12.4**).

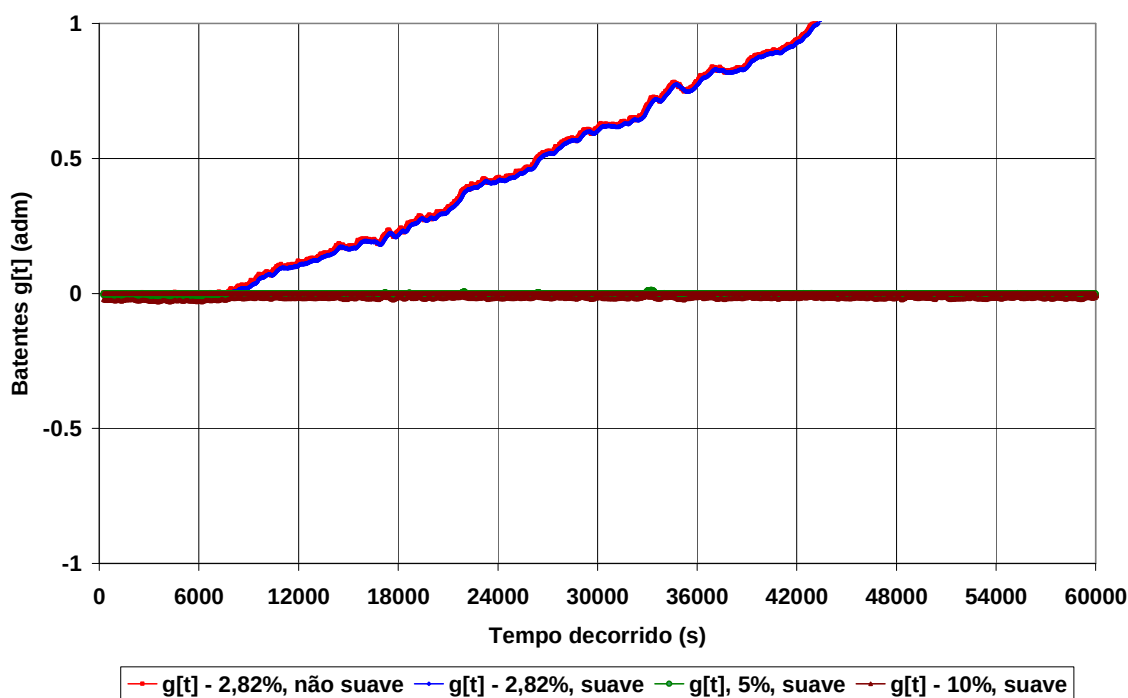


Figura 6.28 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 0,25 pol (1,7%)

Se $\dot{m}_{vaz}$ for realista, i. e., não violar os limites da medição de vazão, essa detecção, ainda que tardia, estará assegurada com 99% de probabilidade. O uso da Eq. (6.20), **seção 6.9.2**, (RACHID ET AL.^[119]), qual seja, 2,82%, com base na incerteza de vazão de 2% nos contornos do duto, é suficientemente conservativo, e, desvinculado do limite do método em si.

Finalmente faltou testar uma vazão vazada inferior àquela da condição explicitada na Eq. (6.58), na **seção 6.12.4**. Para tanto se escolheu um furo de 0,20 in (1,1% da vazão nominal), i. e., menor que a metade do batente mínimo, 1,41%, e também menor que a incerteza fixada em 2% nos contornos.

A **Figura 6.29** ilustra as funções $\dot{m}_c[t]$ com e sem o processo de suavização. Conforme esperado, não houve detecção, uma vez que a vazão vazada (1,1%) foi inferior à metade o batente mínimo estipulado (2,82%). É o que ilustra a **Figura 6.30**.

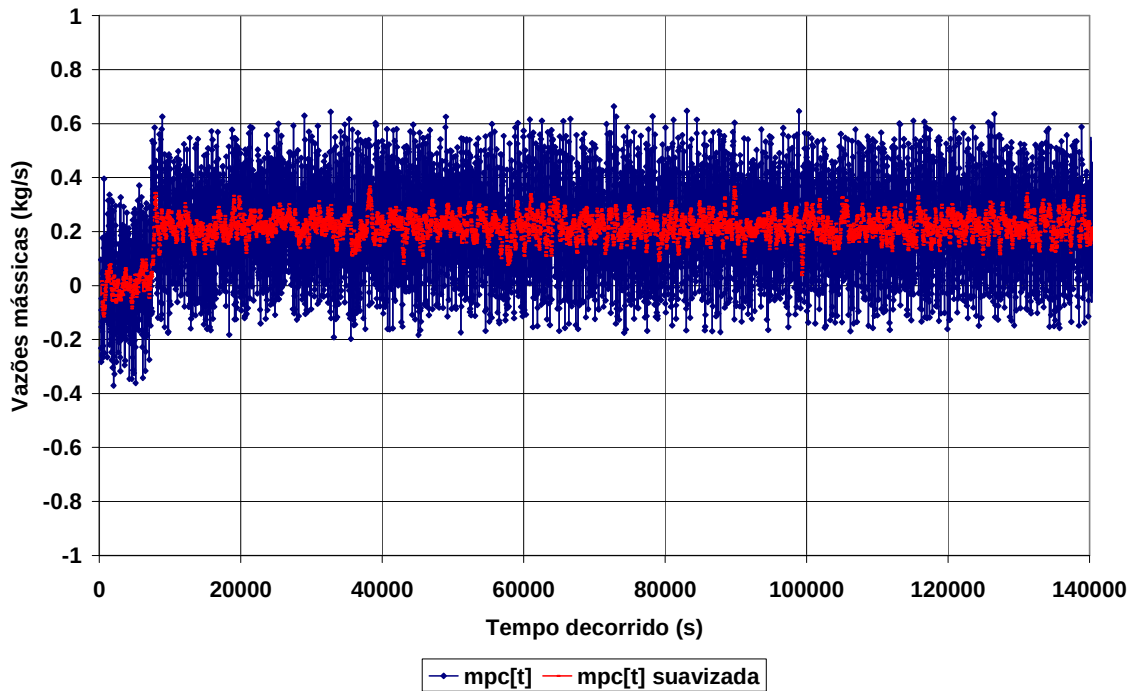


Figura 6.29 – $\dot{m}_c[t]$ com e sem suavização, furo de 0,20 in (1,1%)

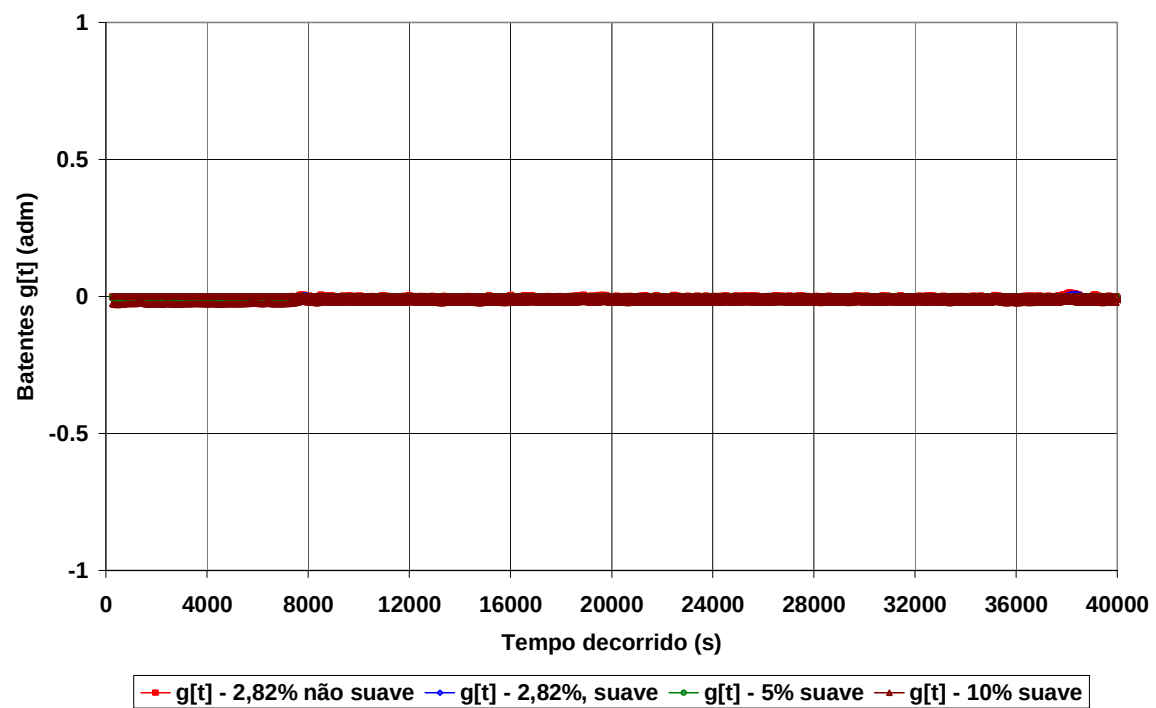


Figura 6.30 – Alarmes do teste de probabilidade seqüencial, furo de 0,20 in (1,1%)

7. Validação da solução proposta

7.1. Introdução

O aceite de um sistema comercial de detecção de vazamentos em dutos somente pode se dar através de testes de campo. É uma prática universalmente aceita na indústria que visa dar garantias à empresa operadora que o adquire de que o sistema efetivamente opera dentro de parâmetros de desempenho previamente acordados e especificados contratualmente.

Entretanto, um conjunto de testes de campo abrangente e conclusivo, para uma tecnologia de detecção de vazamentos no cenário deste estudo, onde normalmente mais de 80% do comprimento do duto é submarino, não é algo trivial. Exige uma complexa logística no ponto de teste, onde alguns de seus elementos integrantes são:

- equipamentos e procedimentos para vazar o gasoduto atendendo a padrões restritos de segurança, meio ambiente e saúde (SMS);
- instrumentação para medir as variáveis relevantes ao teste;
- automação para registrar tais variáveis bem como sincronizar a instrumentação do ponto do teste com a instrumentação convencional do duto, dentre outros recursos e procedimentos.

Outras dificuldades, além da logística, se impõem. São poucos os gasodutos bifásicos existentes, o que restringe o teste de diferentes parâmetros importantes a uma análise abrangente, i. e., não há muitas opções de comprimentos, diâmetros, vazões, pressões, padrões de escoamento, bem como a maior ou menor presença de líquidos. Finalmente, a maior restrição prática, são as posições do duto disponíveis para teste, as quais são usualmente inadequadas sob o ponto de vista da real aferição de parâmetros de desempenho do sistema que se quer testar. A entrada do duto é a plataforma de produção onde por razões de segurança não se pode vazar o duto. Usualmente há apenas um curto comprimento em terra próximo à saída do duto

(quando há) disponível para teste, sendo o restante do duto submerso. Na prática essas limitações impõem um teste muito próximo às medições de saída o que não permitirá avaliar seu desempenho no pior cenário posicional: um vazamento que ocorra próximo à metade do segmento monitorado.

Foram duas as alternativas avaliadas para validar o modelo sem o uso de testes de campo:

- (i) Pilotos ou protótipos de dutos;
- (ii) Simulação numérica do escoamento bifásico do duto, através do uso de ferramenta comercial de grande aceitação na indústria, bem como através da sintonia ou calibração da simulação com base em dados reais históricos de campo, para a operação normal do duto (sem vazamentos). Uma vez sintonizado o duto, os dados de vazamento são gerados através de simulação numérica.

O uso de pilotos ou protótipos foi descartado por duas razões básicas:

- (i) Operam com água e ar, por razões de segurança, para estudar o comportamento das fases líquido e gás. Entretanto, um importante parâmetro a ser analisado é a surgência de líquidos, i. e., a recondensação/desolubilização próxima à saída do duto, devida a efeitos de pressão e temperatura, o que não pode ser conseguido com ar e água. A modelagem SPM-4 não aborda transferência de massas entre fases, então a validação deve ser feita contra algo que a aborde, justamente para permitir a avaliação dessa simplificação;
- (ii) Não foi encontrado na literatura um parâmetro que reproduzisse valores confiáveis de campo com base nos valores obtidos no protótipo, ou seja, o ensaio não apresenta similaridade completa.

Assim, optou-se por usar o simulador comercial OLGA em sua versão 7.2. Foram obtidos dados reais de operação normal (i. e., sem vazamentos) de dois gasodutos bifásicos nacionais que se enquadram adequadamente ao cenário aqui estudado. Os dutos foram configurados e os dados operacionais obtidos foram empregados para sintonizar as simulações dos dois dutos selecionados, i. e., seus resultados foram validados, reproduzidos em tais simulações.

Na sequência, dados de vazamentos foram gerados com as configurações validadas no simulador OLGA em diferentes posições dos dutos, vazões e demais variáveis de interesse de teste, as quais serviram para validar o modelo de detecção de vazamentos proposto no capítulo anterior.

Observa-se que o modelo numérico de escoamento proposto nos **capítulos 2 e 3** não aborda golfadas de terreno nem as movimentações de pigs dentro dos dutos. Assim, segmentos dos dutos onde tais eventos não ocorrem, em janelas de tempo identificadas, puderam ser convenientemente escolhidos.

Finalmente, em conformidade com a política de propriedade de informação da operadora que cedeu os dados, os dutos serão tecnicamente descritos, mas informações que claramente os identifique, tais como nomes de localidades geográficas que atravessam, campos cujas produções exportam ou mesmo a própria identificação da operadora, serão omitidas.

7.2. Dutos selecionados

7.2.1. Característica operacional

Os dois dutos aqui empregados seguem o padrão descrito no primeiro capítulo. São divididos em dois segmentos sequenciais: (i) o primeiro, caracterizadamente *offshore*, onde a entrada é a plataforma e a saída encontra-se na primeira locação de terra no sentido do escoamento do duto; (ii) o segundo normalmente é inteiramente de terra ou pode alternar trechos de terra e mar, sendo a sua maior característica um perfil de elevação de grande variação. Ambos operam corridas de pig regulares. Entretanto, os testes aqui executados se darão na janela de tempo onde os pigs não estão no segmento.

7.2.2. Primeiro segmento de duto selecionado (duto PL):

Dentro das opções disponíveis no conjunto de gasodutos nacionais, selecionou-se o duto com as seguintes características:

- Curto (32 km);
- Diâmetro de médio a grande (24 in);
- Pouca presença de líquidos na entrada (fração volumétrica média ao redor de 0,8%), bem como baixa formação de líquidos. Por essa razão será aqui referido como duto PL (Pouco Líquido).

Seu comprimento total é de 127 km e corre de uma plataforma *offshore* até uma primeira locação de terra próximo ao km 32, e depois alterna entre segmentos *onshore* e *offshore*. Considere a **Figura 7.1** que traz o perfil de elevação do duto como um todo, bem como o perfil de elevação do segmento a ser empregado, à esquerda da linha vertical posicionada ao redor do km 32. A **Figura 7.2** na sequência ilustra apenas o segmento de duto a ser usado para validação do modelo.

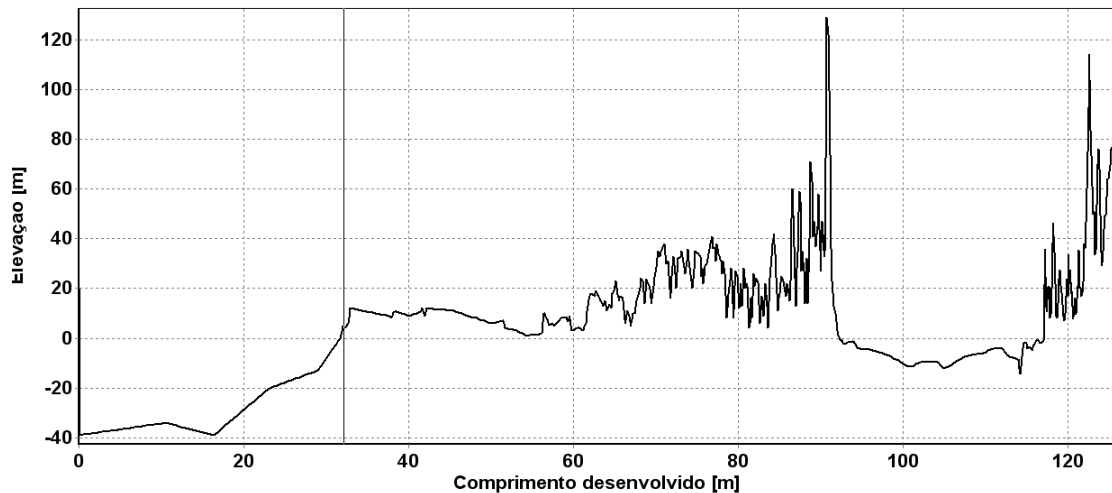


Figura 7.1 – Perfil de elevação completo do duto PL

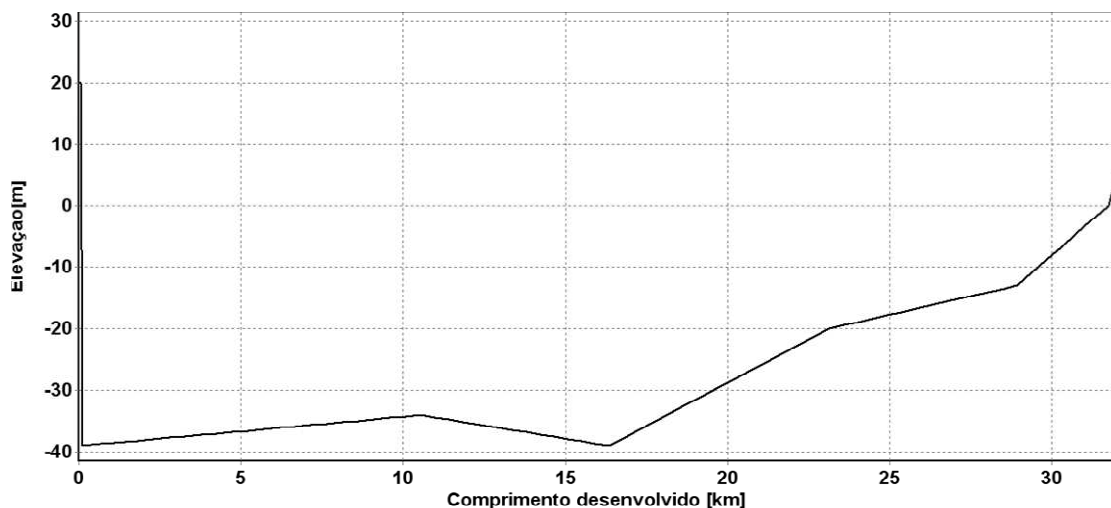


Figura 7.2 – Perfil de elevação do segmento de duto PL

Pode operar numa faixa flexível de vazão, entre 4,0 e 6,0 MM Sm³/d de fase gás, o que produz uma quantidade de líquido associado de 100,0 a 150,0 m³/d *in situ* (água aí incluída numa proporção média volumétrica de 6% na fase líquida) ou 36,0 a 54,0 kg/s de mistura bifásica. Sua pressão usual na entrada é em torno de 80,0

kgf/cm², com uma variação de pressão entre entrada e saída de aproximadamente 13,0 kgf/cm² para o duto inteiro, e um pouco menos de 3,0 kgf/cm² entre entrada e saída do segmento a ser empregado. Sua temperatura na entrada é 37 °C, sendo de 20 °C na saída do segmento, e dos mesmos 20 °C na saída do duto.

Trata-se de um segmento de duto curto com pouca formação de líquido. A **Figura 7.3** ilustra as frações volumétricas típicas de líquido na entrada e saída durante um enchimento simulado as quais atingem valores máximos de aproximadamente 0,008 (um pouco menos de 1,0 %).

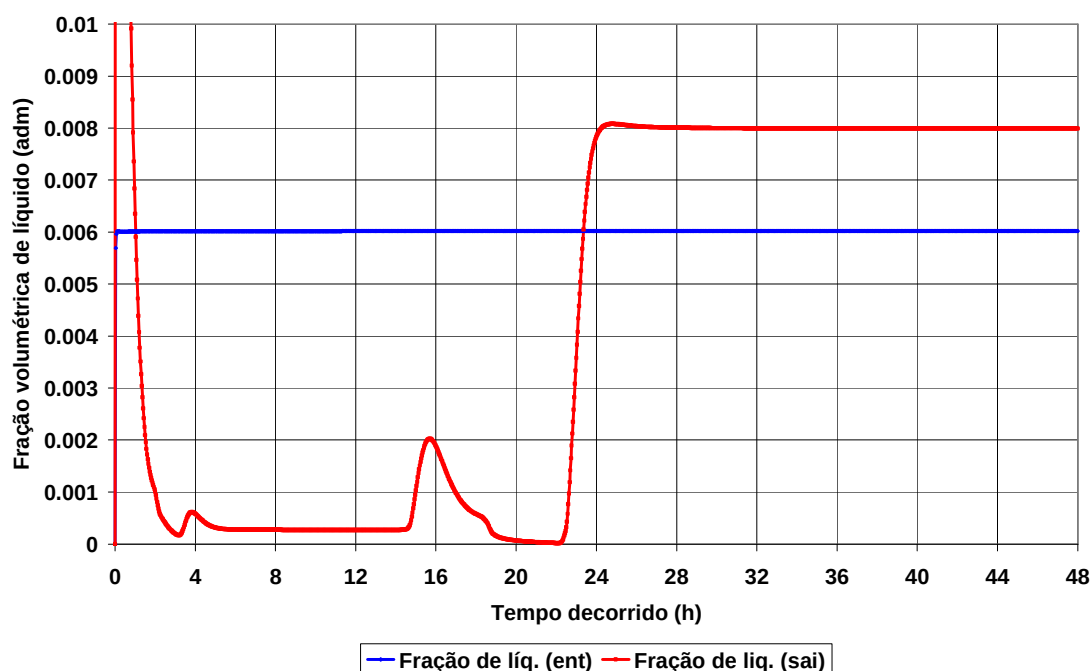


Figura 7.3 – Frações vol. de líquido de entrada e saída no enchimento do duto PL

O enchimento simulado da figura anterior partiu de uma condição inicial com o duto cheio apenas com a fase gás, onde se observa que a frente de líquido atinge a saída do duto em torno de um dia.

A composição que entra no duto apresenta uma fração mássica de gás, bem como massas específicas de gás e líquido representadas na **Figura 7.4**. Na faixa operacional a fração mássica da fase gás fica em torno de 0,985.

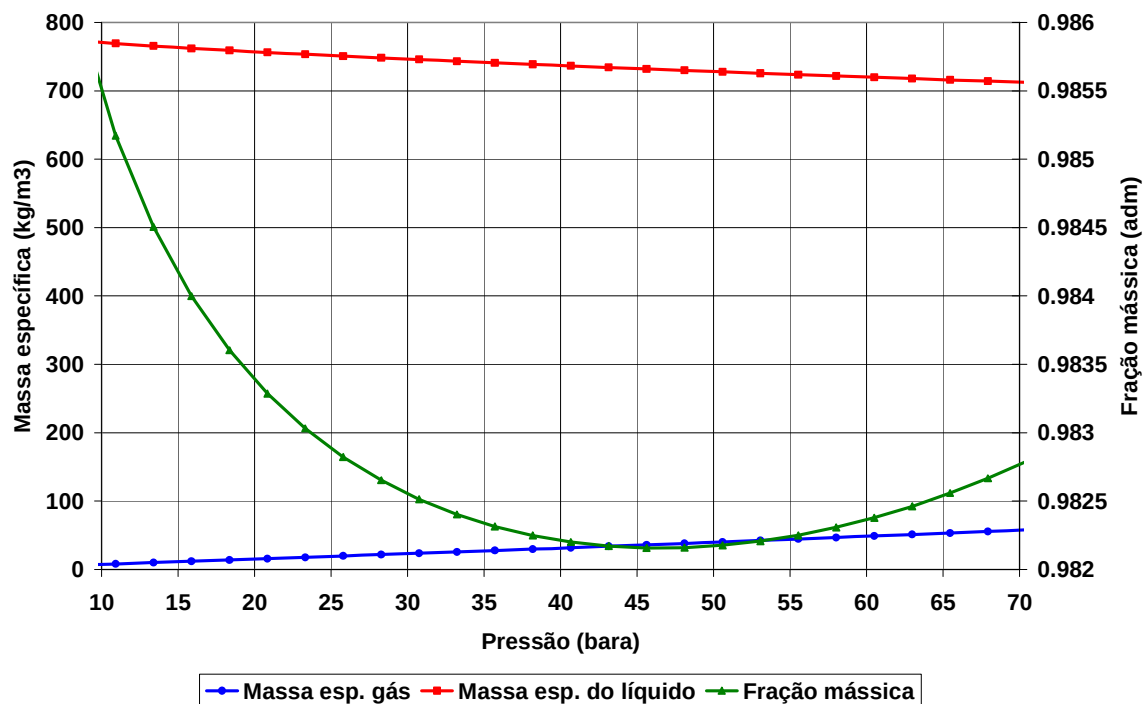


Figura 7.4 – Fração mássica de gás e massas específicas de gás e líquido no duto PL em função da pressão na temperatura de 20 °C.

7.2.3. Segundo duto selecionado (duto ML)

Para o segundo duto, dentre as opções disponíveis no conjunto de gasodutos nacionais, foram escolhidas características que mais contrastassem com o primeiro duto, abaixo descritas:

- Longo (188 km);
- Diâmetro médio (16 in);
- Alta presença de líquidos (fração volumétrica ao redor de 8% na entrada do duto, com alta formação de líquidos à medida que se aproxima da saída do duto, a chamada surgência de líquido). Por essa razão será aqui referido como duto ML (Muito Líquido).

Seu comprimento total aproximado é de 214 km e corre de uma plataforma *offshore* até uma primeira locação de terra em seu km 188, que será o segmento de teste. Apresenta uma grande quantidade de líquido se comparado ao duto PL. Considere a **Figura 7.5** a qual ilustra o perfil de elevação do duto como um todo, bem como o perfil de elevação do segmento a ser testado, à esquerda da linha vertical posicionada ao redor do km 188.

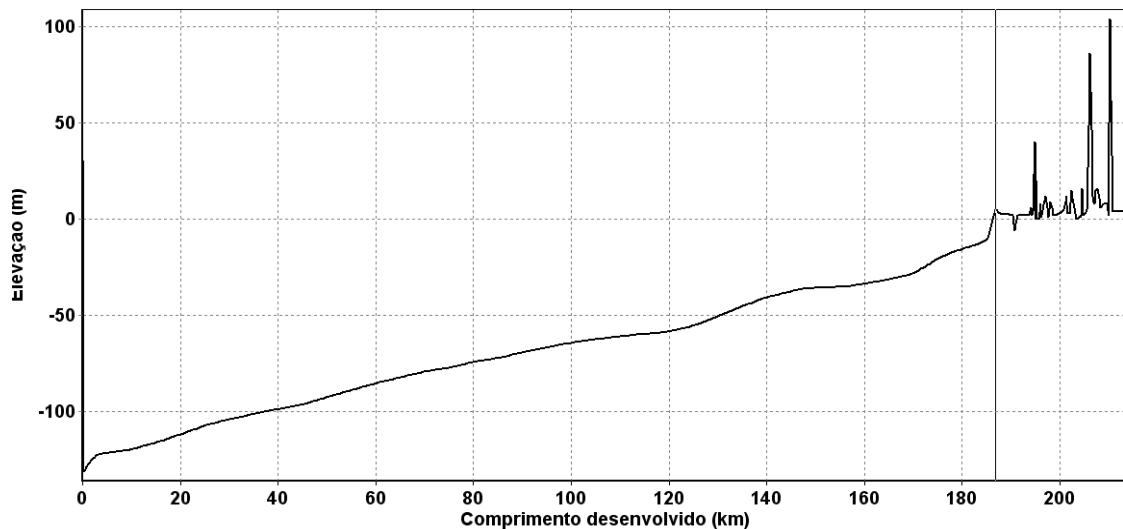


Figura 7.5 – Perfil de elevação completo do duto ML

Desta vez tem-se um segmento de duto longo com muita formação de líquido. Considere a **Figura 7.6** que ilustra as frações volumétricas típicas de líquido na entrada e saída do segmento de duto PL, as quais atingem valores máximos num enchimento de cerca de 0,08 (8%), ou seja uma ordem de grandeza superior ao outro duto.

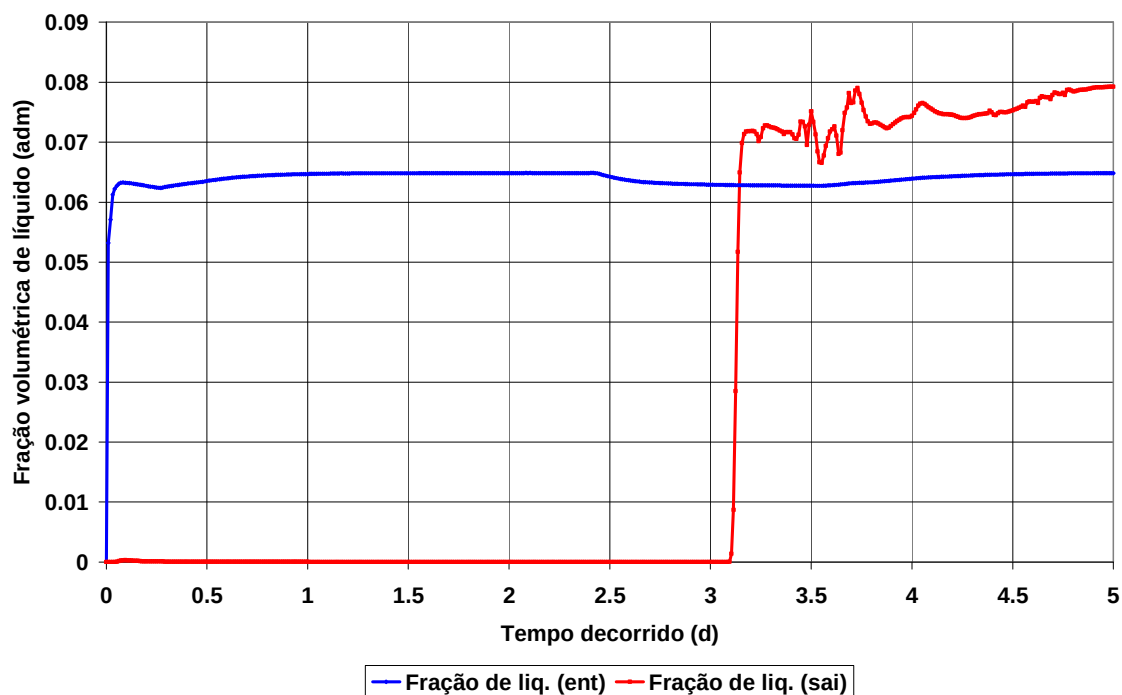


Figura 7.6 – Fração volumétrica de líquido típica de entrada e saída do duto ML

Opera numa faixa menos flexível de vazão, algo em torno de 1,3 milhão de Sm^3/d de fase gás (ou cerca de 17 kg/s de mistura bifásica) com pequenas variações de mais ou menos 10%. A pressão é também média/alta (característica comum nesse tipo de gasoduto), algo em torno de $68,0 \text{ kgf/cm}^2$ na entrada do duto, com uma variação de pressão entre entrada e saída de cerca de $17,0 \text{ kgf/cm}^2$ para o duto inteiro, e aproximadamente $10,0 \text{ kgf/cm}^2$ entre a entrada e a saída do segmento a ser empregado. Sua temperatura na entrada é de 35°C (para ambos, duto e segmento), sendo de 20°C na saída do segmento, e dos mesmos 20°C na saída do duto.

A composição que entra no duto apresenta uma fração mássica de gás, bem como massas específicas de gás e líquido representadas na **Figura 7.7**. Na faixa operacional a fração mássica da fase gás fica em torno de 0,76.

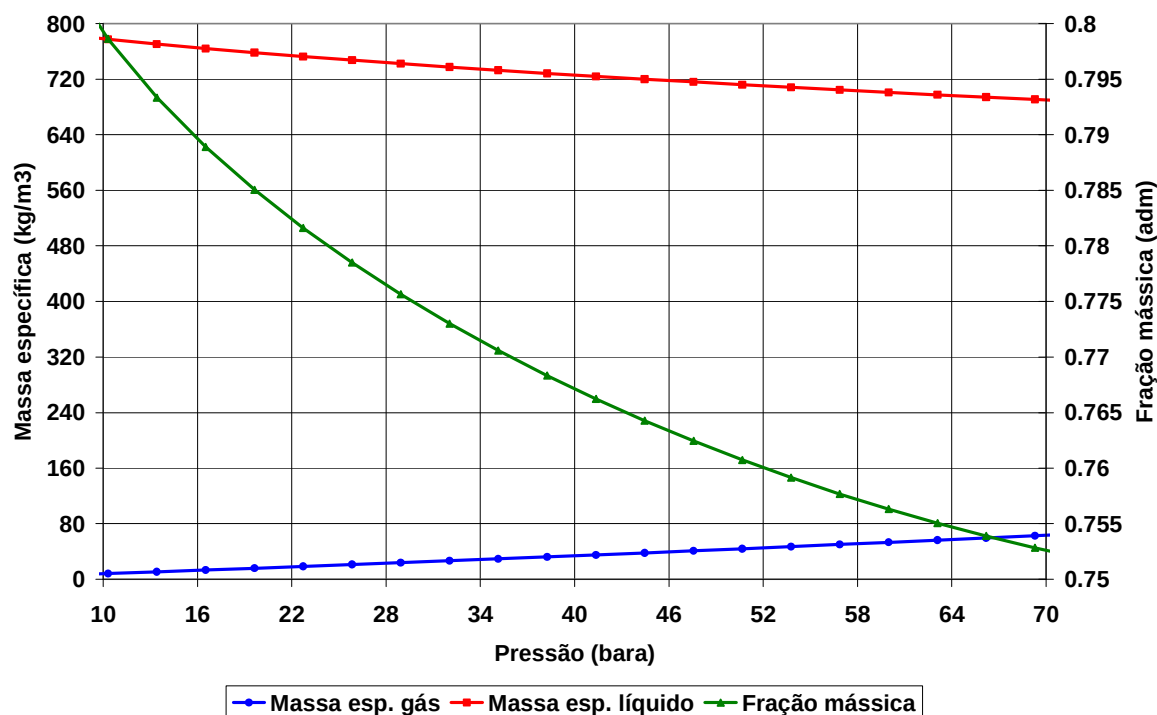


Figura 7.7 – Fração mássica de gás e massas específicas de gás e líquido no duto ML em função da pressão na temperatura de 20°C .

7.2.4. Quadro resumo dos dois dutos seleccionados

A **Tabela 7.1** resume os dados dos dois dutos seleccionados.

Tabela 7.1 – Resumo dos principais dados dos dutos/segmentos selecionados

Variável	Unidade	Duto PL	Seg. Duto PL	Duto ML	Seg. Duto ML
L	km	127,0	32,0	214,0	188,0
D_{nom}	in	24		16	
$Q_{GAS(min)}$	MM Sm ³ /d	2,0		1,10	
$Q_{GAS(máx)}$	MM Sm ³ /d	6,0		1,35	
$\dot{m}_{TOTAL(máx)}$	kg/s	18,0		15,3	
$\dot{m}_{TOTAL(min)}$	kg/s	54,0		18,7	
X_{Gmassa}	adm	NA	0,983	NA	0,76
$P_{entrada}$	barg	78,0	78,0	68,0	68,0
$P_{saída}$	barg	65,0	75,0	51	58,0
T_{amb}	°C	20		20	
$Pass. de pigs$	dias	7 a 9		1	
$\rho_{L(min)}$	kg/m ³	714	714	690	690
$\rho_{L(máx)}$	kg/m ³	770	770	778	778
$\rho_{G(min)}$	kg/m ³	57,0	67,3	54,6	54,6
$\rho_{G(máx)}$	kg/m ³	70,53	70,53	39,7	58,1
α_L	adm	NA*	0,008	NA	0,08
β	graus	NA	0,08	NA	0,04

(*) NA: Não se aplica

7.3. Sintonia dos dutos selecionados no simulador comercial

Foram usados dados de campo dos contornos dos dutos para sintonizá-los no simulador OLGA, obtidos a partir dos históricos de dados em tempo real dos sistemas supervisórios dos dutos. A qualidade, diversidade, quantidade e disponibilidade de dados para cada duto variou e foram os fatores que definiram as estratégias de sintonia. Encontraram-se quase sempre dois extremos: uma quantidade muito grande de dados num curto espaço de tempo ou poucos dados num longo intervalo.

Para cada duto foram feitas duas configurações: (i) o duto inteiro com todos os seus elementos constitutivos, incluindo o separador de saída; (ii) o segmento de duto proposto. Isso foi possível uma vez que dados de pressão nos dois contornos estiveram sempre disponíveis. De uma maneira geral buscou-se usar a vazão da fase predominante (gás) num dos contornos e a pressão no outro contorno em ambas as configurações. A razão para tal é o fato do simulador OLGA abordar a vazão de líquido como uma função da vazão de gás, i. e., a vazão de líquidos é determinada por condição *PVT*, uma vez que a proporção entre as duas fases é um dado fonte do procedimento que gera as propriedades *PVT* por ele usadas. Assim, uma vez disponíveis Q_G , P e T , Q_L pode ser determinado. Observa-se que as vazões presentes nestes dados fazem referência a condição padrão brasileira de 20 °C e 1 atm.

7.3.1. Sintonia do duto PL

Dois conjuntos de dados estiveram disponíveis: (i) cerca de uma semana de dados de 8 a 16/12 (referência genérica apenas para diferenciar os dois conjuntos de dados) e outro de um mês de duração, de 1 a 31/7. A necessidade de dois conjuntos de dados se deu pelo fato que um trazia dados de Q_L na saída do duto.

7.3.1.1. *Conjunto de dados de 8 a 16/12.*

Esse primeiro conjunto de dados oferece uma grande quantidade de dados num período de oito dias, sem corridas de pigs. Considere a **Figura 7.8** a qual traz dados de vazão volumétrica padrão da fase gás no contorno de entrada do duto PL. As variações se devem a dois efeitos: incertezas de medição, uma vez que na entrada a medição é multifásica, e variações de processo. As variações de processo se devem tanto a questões puramente operacionais tais como a entrada ou retirada de um novo poço em operação quanto de natureza logística e de mercado.

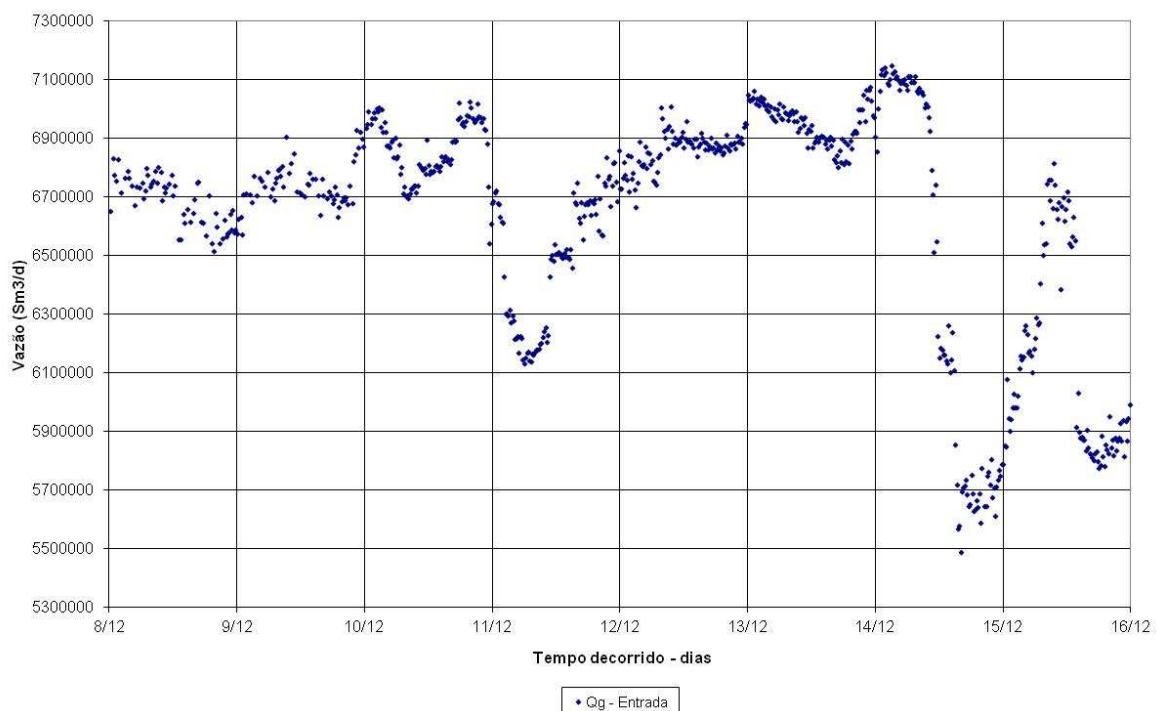


Figura 7.8 – Duto PL, primeiro conjunto: vazão de gás na entrada

A **Figura 7.9** ilustra três pressões de interesse: (i) a entrada do duto e do segmento de duto (que é praticamente a mesma posição, a menos de um riser), a saída do segmento de duto (km 32) e a saída do duto inteiro (km 127). Já a **Figura 7.10** traz as temperaturas apenas na entrada e na saída do duto (ou seja, não houve disponibilidade desse dado na saída do segmento de duto).

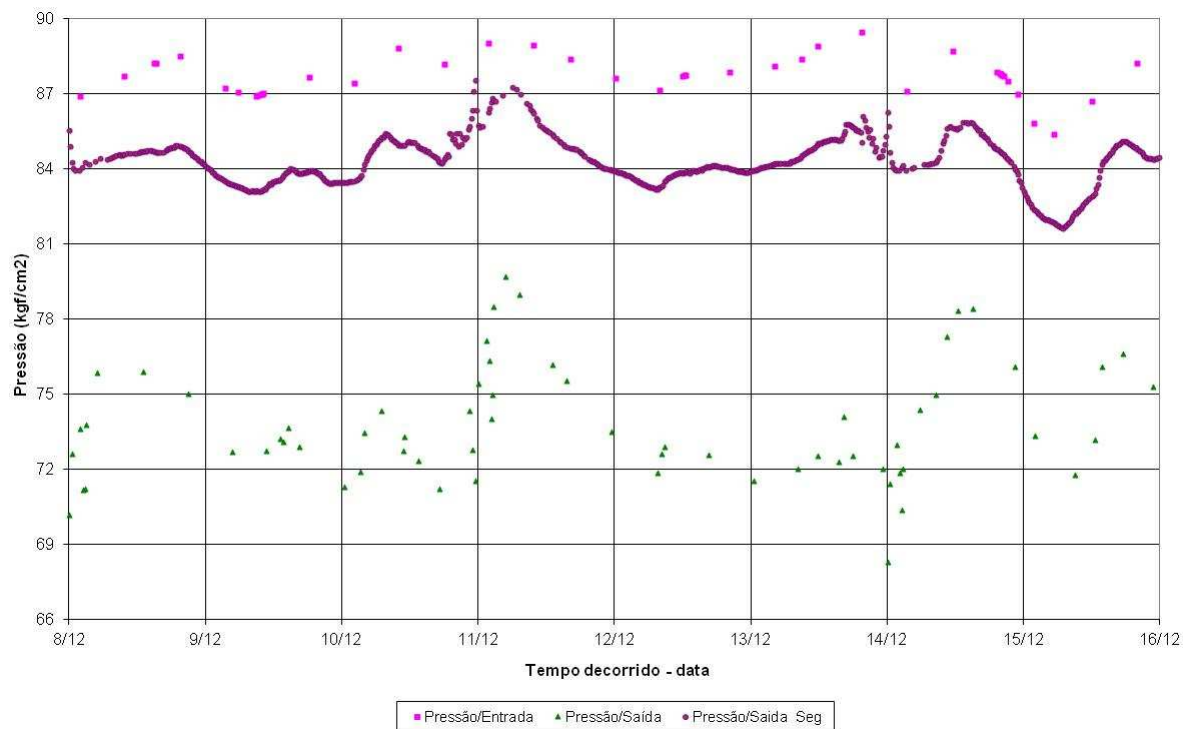


Figura 7.9 – Duto PL, primeiro conjunto: pressões na entrada, saída do segmento e saída do duto

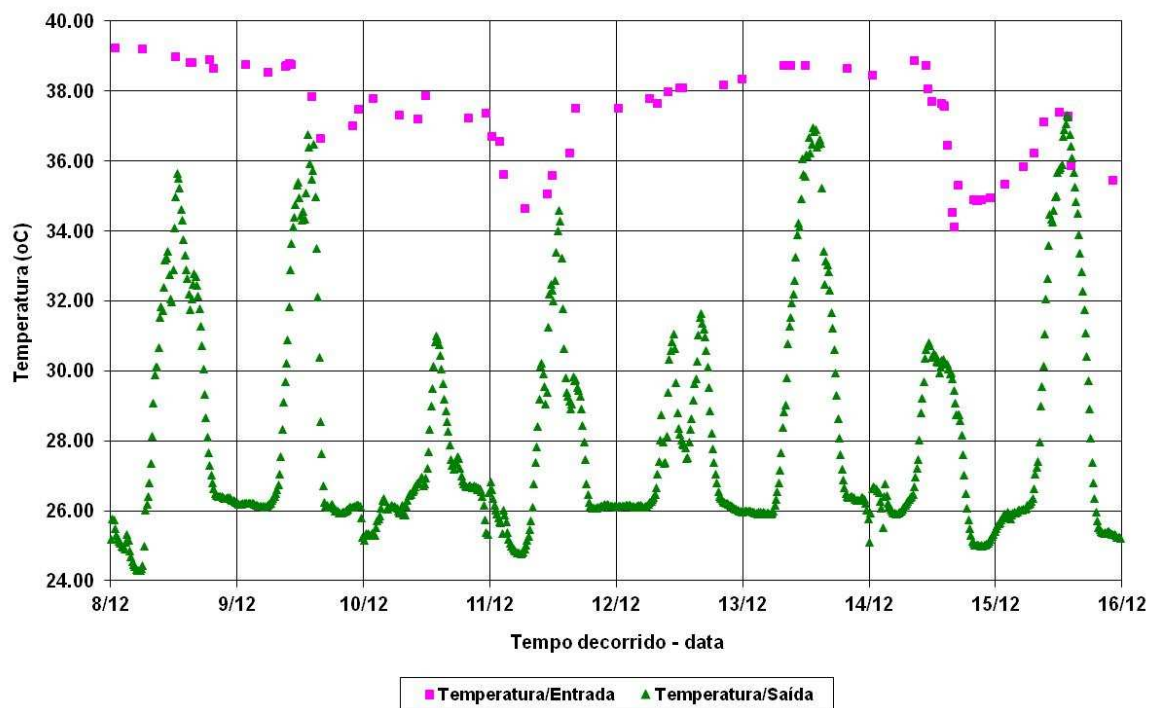


Figura 7.10 – Duto PL, primeiro conjunto: temperaturas na entrada e saída do duto

O comportamento, em princípio anômalo, da temperatura de saída tem explicação: o coletor de golfadas desse duto específico não apresenta isolamento térmico, e se localiza em local de alta temperatura e forte radiação solar. Seu comprimento chega a 200 m por tubulação. Assim, a temperatura estimada na saída é aquela que aparece nos vales da **Figura 7.10**. Os picos da mesma figura se dão devido à radiação solar. O intervalo entre dois picos representa um intervalo entre dia e noite, quando a radiação cessa. Nesse primeiro conjunto de dados, não houve corridas de pig no duto, o que permite testar o duto fora da condição extrema encontrada durante a passagem de pig.

O foco do processo de sintonia, no entanto, foram as pressões e a vazão na entrada do segmento. Para tanto os parâmetros alterados foram a rugosidade da parede do duto, bem como seu diâmetro interno.

De posse desse primeiro conjunto de dados, três exercícios foram possíveis:

- Um alinhamento $P_{ent} \times P_{sai}$, para o segmento, de maneira a validar a vazão de gás na entrada. A validação empregou 30 trincas de P_{ent} , P_{sai} e $Q_{gas-ent}$ medidos, obtidos com o duto operando na vazão nominal de 4 MM Sm³/d (46,3 Sm³/s). A **Figura 7.11** traz a comparação visual medido x calculado e a **Tabela 7.2** os dados estatísticos do ajuste (ou sintonia);

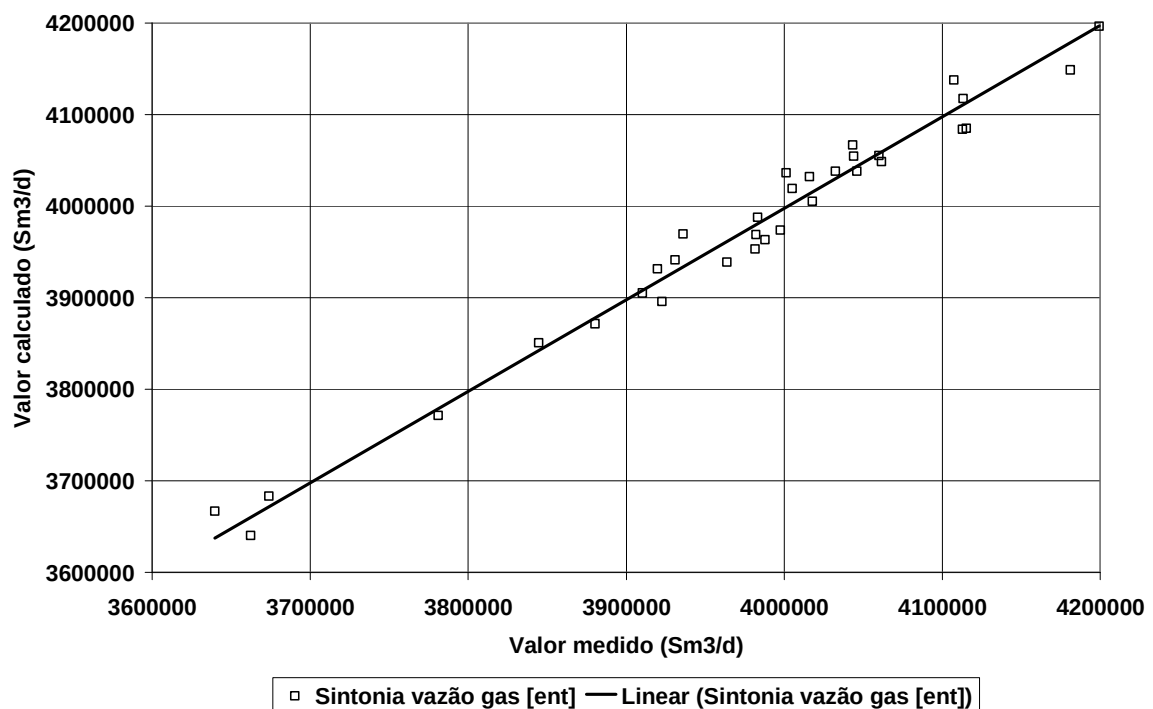


Figura 7.11 – Duto PL - Qualidade da sintonia $P_{ent} \times P_{sai}$ para validar $Q_{gas-ent}$

Tabela 7.2 – Parâmetros da sintonia de $Q_{gas-ent}$

Ajuste	Correlação	Desvio Padrão (Sm ³ /d)	Desvio Padrão (%)	Num. de Observações
$Q_{gas-ent}$	0,999984	23075	0,58	30

- Um alinhamento $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$, também para o segmento, para validar a pressão na entrada, usando dessa vez 37 trincas válidas de pontos experimentais. A **Figura 7.12** ilustra a qualidade do ajuste e a **Tabela 7.3** os parâmetros estatísticos da sintonia;

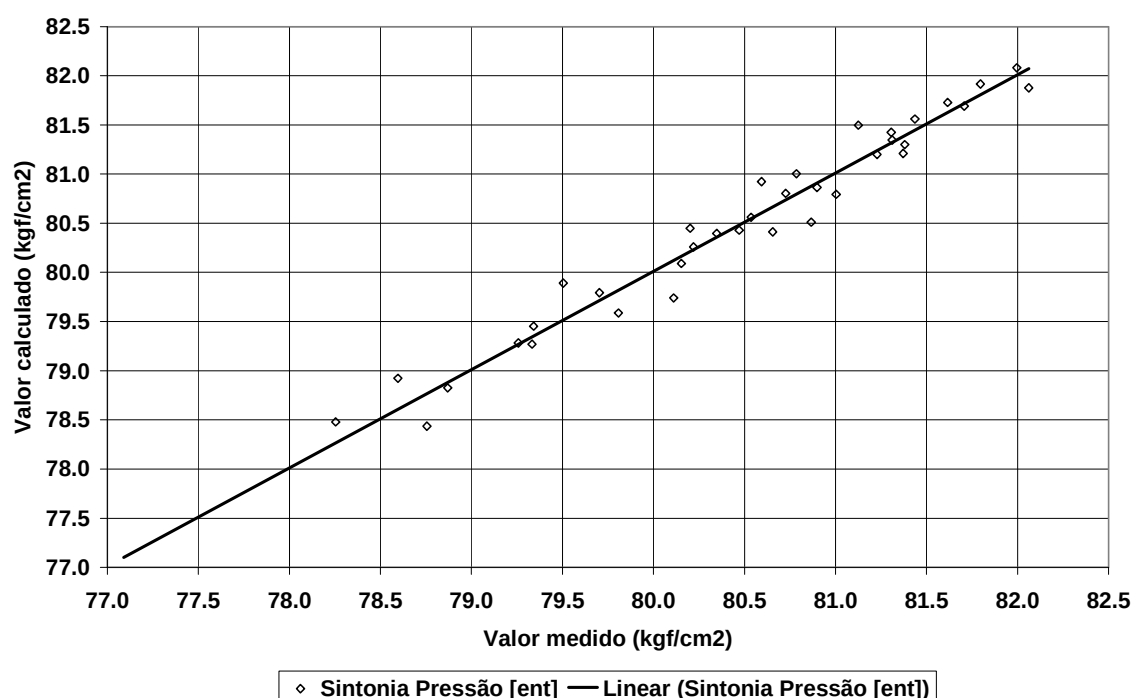


Figura 7.12 – Duto PL – Qualidade da sintonia $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$ para validar P_{ent}

Tabela 7.3 – Parâmetros da sintonia de P_{ent}

Ajuste	Correlação	Desvio Padrão (kgf/cm ²)	Desvio Padrão (%)	Num. de observações
P_{ent}	0,99999	0,24	0,29	37

- Um alinhamento $Q_{gas-sai} \times P_{ent}$ para o segmento, com o objetivo de validar a pressão de saída usando o mesmo conjunto de dados que validou a pressão de entrada. Neste caso foram selecionados apenas pontos bem próximos do regime permanente uma vez que não há medição de vazão na saída do segmento, apenas na saída do duto. No regime permanente, entretanto as vazões compensadas de gás nos contornos são teoricamente iguais. A **Figura 7.13** ilustra a qualidade do ajuste e a **Tabela 7.4** os parâmetros da sintonia.

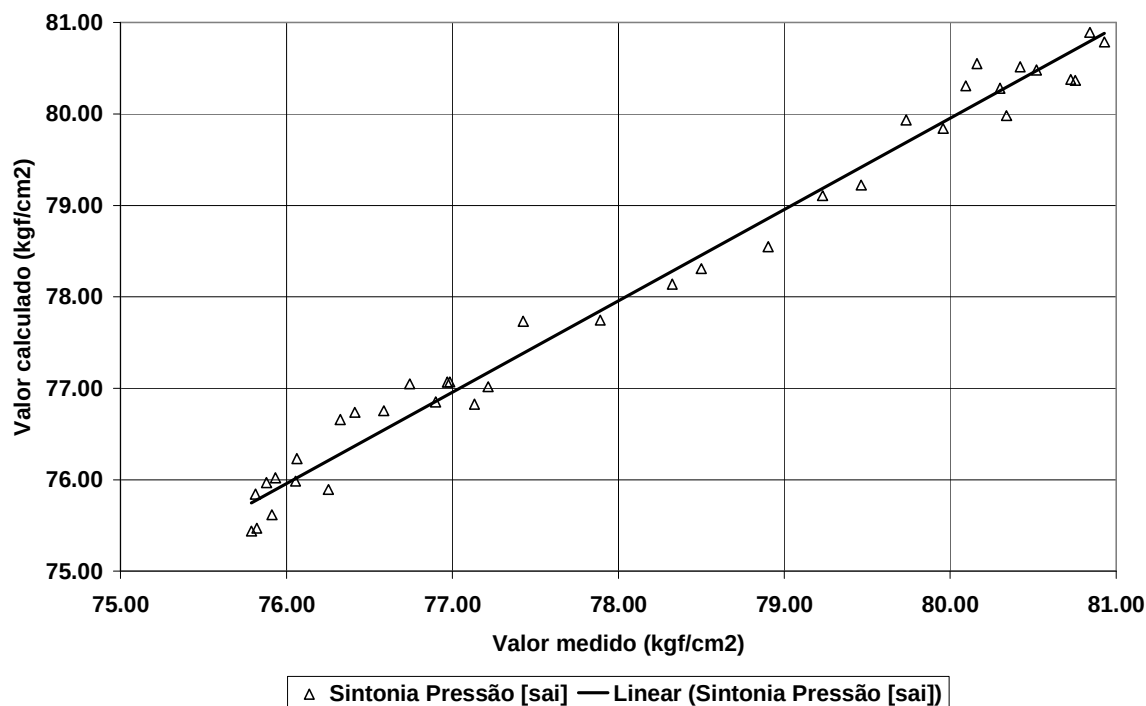


Figura 7.13 – Duto PL – Qualidade da sintonia $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$ para validar P_{ent}

Tabela 7.4 – Parâmetros da sintonia de P_{sai}

Ajuste	Correlação	Desvio Padrão (kgf/cm²)	Desvio Padrão (%)	Num. de observações
P_{sai}	0,99999	0,22	0,27	37

7.3.1.2. Conjunto de dados de 1 a 31/7.

Para a validação da vazão de líquidos, a qual está diretamente associada à passagem de pigs, um segundo conjunto de dados foi usado, uma vez que essa informação não esteve disponível no primeiro. Assim, menos dados estiveram presentes num intervalo maior de amostragem. Além da sintonia da vazão de líquidos, esse segundo conjunto de dados permite avaliar a periodicidade do comportamento operacional do duto.

Considere a **Figura 7.14** a qual, analogamente à **Figura 7.9**, ilustra as pressões na entrada, na saída do segmento e na saída do duto.

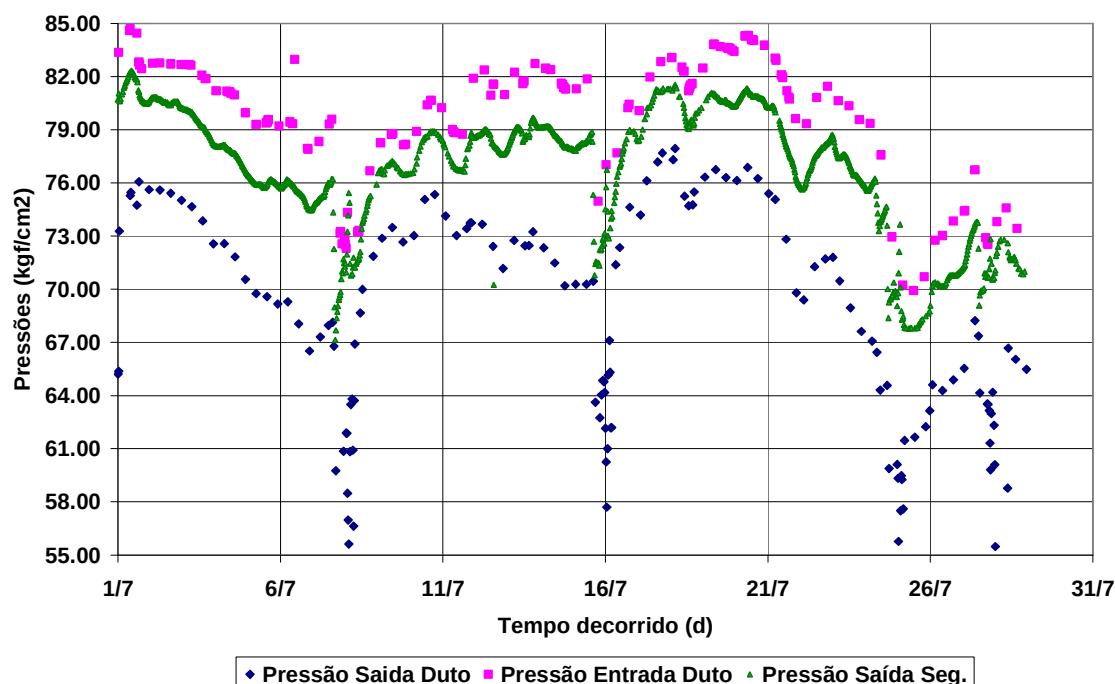


Figura 7.14 – Duto PL, segundo conjunto: pressões na entrada, saída do segmento e saída do duto

A **Figura 7.15** traz a vazão de gás na entrada bem como o volume produzido de líquido na saída do duto. Observe que a vazão está em condições padrão e o volume em condições *in situ*, ou seja, de P e T de separação. O coletor de golfadas acumula líquido ao longo de um período que varia entre 7 e 9 dias, caracterizado pela corrida de pigs. Pela figura observa-se que o pig remove entre 900 e 1200 m³ *in situ* de líquidos do duto, dependendo do intervalo entre corridas. Isso permite estimar uma vazão média de líquidos na saída do duto. Essa vazão média é sintonizada no OLGA. Isso permite simular o duto sem configurar o coletor de golfadas na saída, se preciso for. Finalmente, a **Figura 7.16** traz as temperaturas de entrada e saída do duto. Os picos e vales da temperatura de saída são explicados pelo mesmo efeito daquele encontrado na **Figura 7.10**.

De posse desse segundo conjunto de dados foi possível um exercício de simulação do alinhamento de $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$ visando validar, qualitativamente (sem sintonia) a vazão de líquidos na saída do duto.

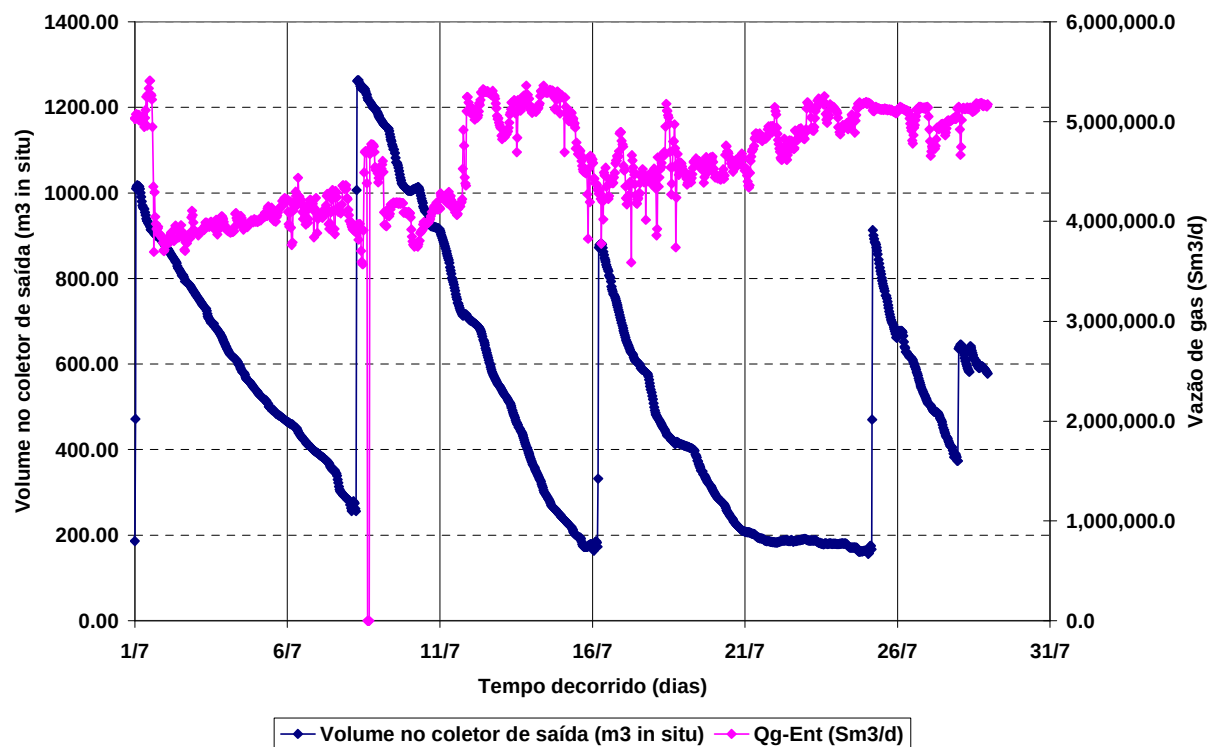


Figura 7.15 – Duto PL, segundo conjunto: vazão de gás na entrada e volume acumulado (*in situ*) de líquido na saída

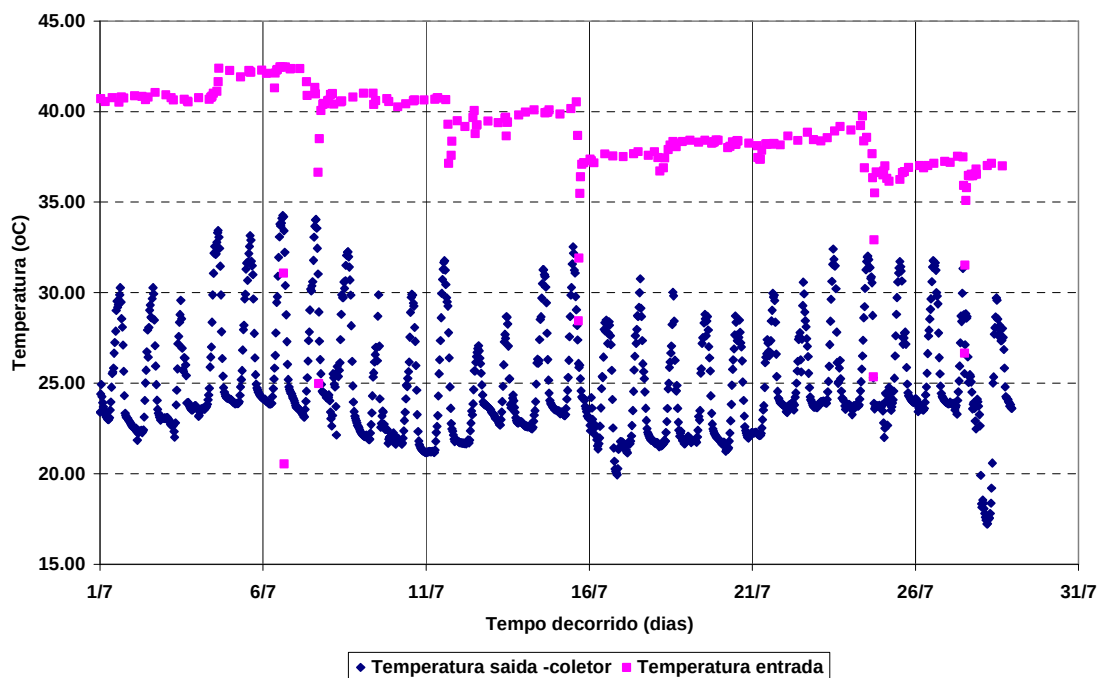


Figura 7.16 – Duto PL, segundo conjunto: temperaturas na entrada, saída do segmento e saída do duto

7.3.2. Sintonia do duto ML

Para o duto ML apenas um conjunto de dados esteve disponível, cerca de uma semana de dados, de 31/7 a 6/8, porém completo, permitindo todas as sintonias. A **Figura 7.17** ilustra as vazões de gás na entrada e na saída do duto.

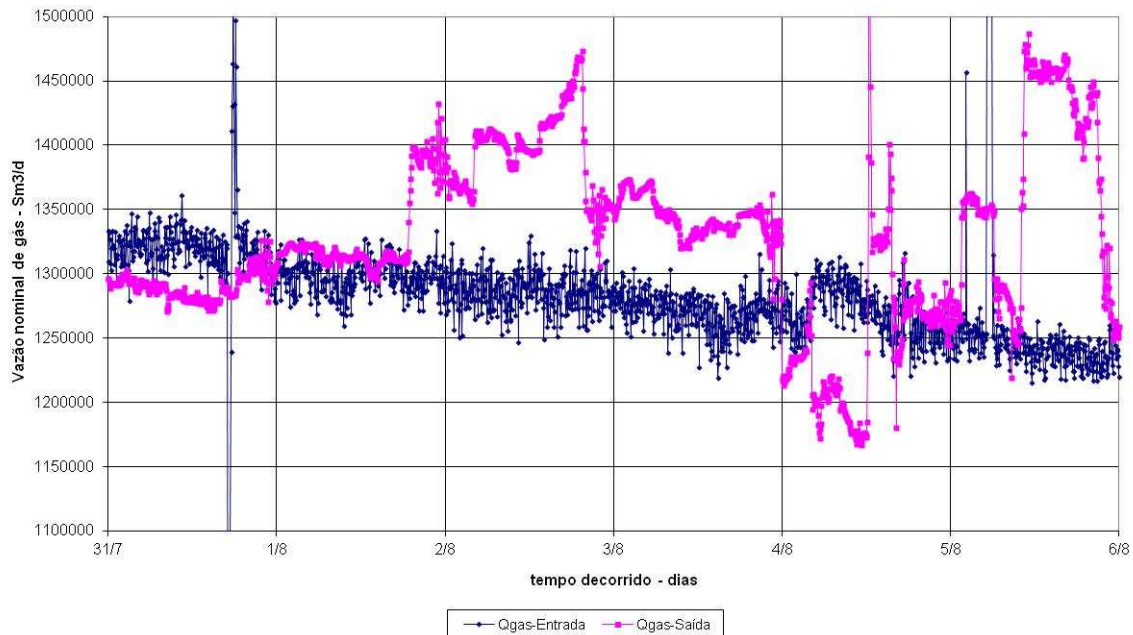


Figura 7.17 – Duto ML: vazões de gás na entrada e saída do duto

Observa-se uma vazão relativamente constante na entrada, com leve tendência de queda e com uma incerteza maior que a de saída, porém estável, visualmente ao redor de 2,5 a 3% (o que pode ser considerado um bom valor para medição multifásica^[93]). Numa primeira análise a vazão de entrada está livre de variações de processo locais, fracamente afetada por variações de demanda, sendo sua fonte de incerteza apenas a instrumentação. Entretanto, a vazão na saída sofre forte variação de demanda do mercado, embora apresente uma pequena incerteza de medição. A razão pela qual a vazão de entrada não sofre influência da vazão de saída está no comprimento do duto (214 km). Os gasodutos, diferentemente dos oleodutos, apresentam duas funções básicas: transportar e estocar fluido. Assim, todas as variações que ocorrem na saída são amortecidas pelo estoque de gás que se formou dentro do duto. Esse comportamento não pôde ser analisado no primeiro duto (PL), pois lá a vazão de saída não está disponível, embora se observem variações de vazão de gás na entrada. Ainda sobre o duto PL, por ser um duto menor em comprimento, porém de diâmetro maior, um efeito anula o outro, podendo assim também estocar gás, o que em princípio sugere que a variação de vazão na entrada seja uma variação na vazão dos poços.

Retomando os dados do duto ML, linhas verticais são observadas na segunda metade do primeiro dia, para a vazão na plataforma, ao redor da metade do quinto dia, para a vazão na saída, e na primeira metade do sexto dia na plataforma. Essas são assinaturas típicas de quedas de comunicação, e ocorrem durante intervalos de tempo relativamente curtos.

A **Figura 7.18** ilustra as vazões de líquidos na entrada e na saída do duto. A medição de saída se dá a jusante do coletor de golfadas, o que implica numa medição monofásica, o que explica sua excelente qualidade.

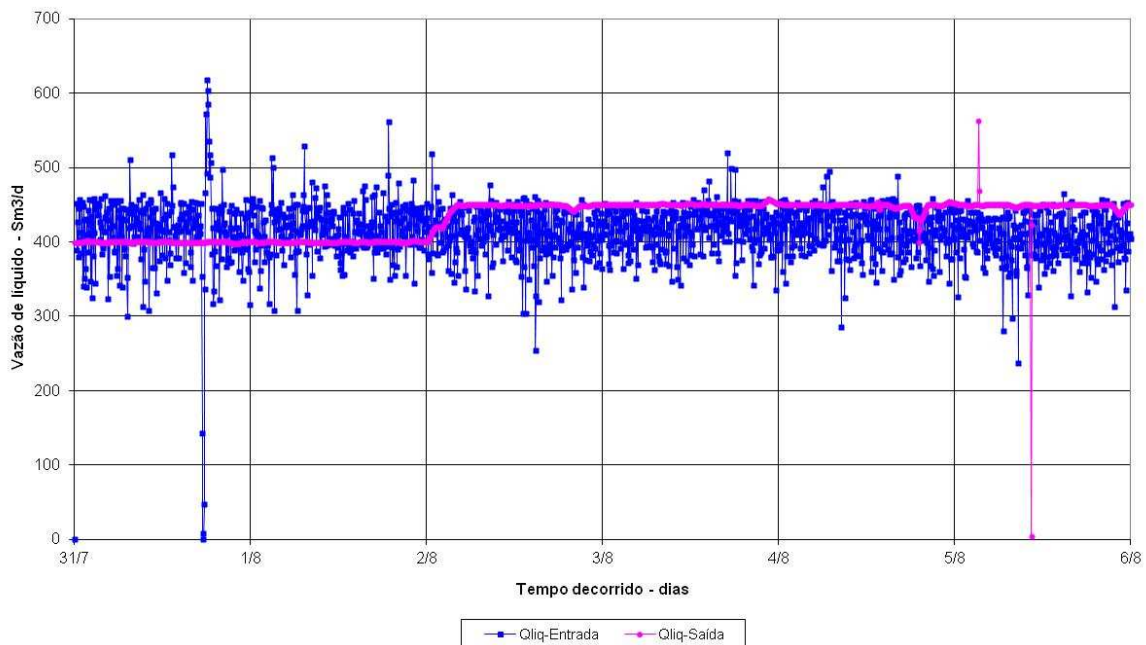


Figura 7.18 – Duto ML: vazões de líquido na entrada e saída do duto

Observa-se no início do terceiro dia um pequeno aumento da vazão de líquidos na saída, explicado pelo aumento de demanda de gás no mesmo instante. A vazão na plataforma varia de forma periódica o que sugere forte variação de processo associada a também relevante incerteza de medição. De fato existem conhecidas limitações de tratamento primário que impõem grandes variações do nível do separador na plataforma, tais como as inconstâncias na vazão dos poços em cada fase, o que explica esse comportamento periódico da vazão de líquidos na entrada.

A suposta queda de comunicação identificada no sinal da vazão de gás na entrada, identificada na segunda metade do primeiro dia, é validada também pelo sinal da vazão de líquidos naquela localidade.

A **Figura 7.19** traz as pressões na entrada e na saída do duto, onde a corrida de um pig de remoção de líquidos por dia é ilustrada pelo sinal da pressão de saída.

Uma diferença relevante entre esse duto e o anterior é o fato de não haver pressão disponível próximo à praia, o que não permite uma estimativa da pressão na saída do segmento. Assim, esse sinal deverá ser inferido a partir da sintonia do duto como um todo.

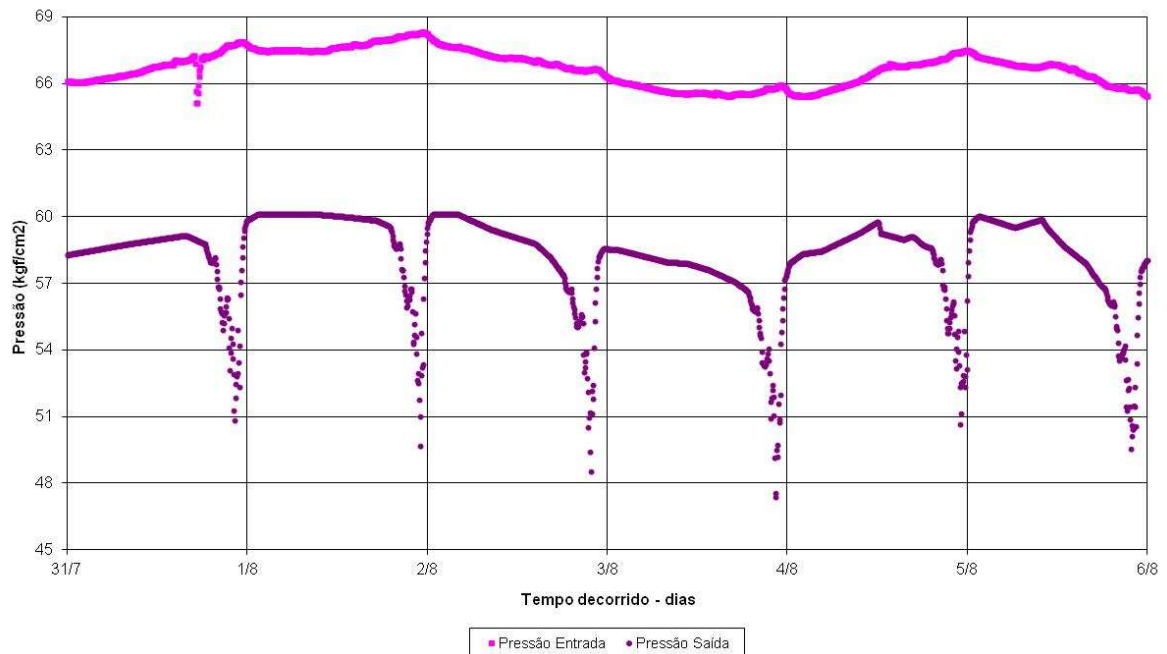


Figura 7.19 – Duto ML: pressões na entrada e saída do duto

Finalmente a **Figura 7.20** traz a temperatura na entrada do duto. Durante o período de observação o transmissor de temperatura da saída esteve em manutenção.

Diferentemente do duto anterior, neste duto nada pode ser sintonizado diretamente para o segmento, uma vez não foram disponibilizados dados da saída do segmento, que seria próxima à praia. Assim todos os dados foram sintonizados para o duto inteiro, e as propriedades do segmento foram determinadas com base nesta sintonia. Foram os seguintes ensaios executados:

- Um alinhamento $P_{ent} \times P_{sai}$ com o objetivo de validar a vazão de gás na entrada. A **Figura 7.21** ilustra a qualidade da sintonia, bem como a **Tabela 7.5** traz os parâmetros estatísticos.

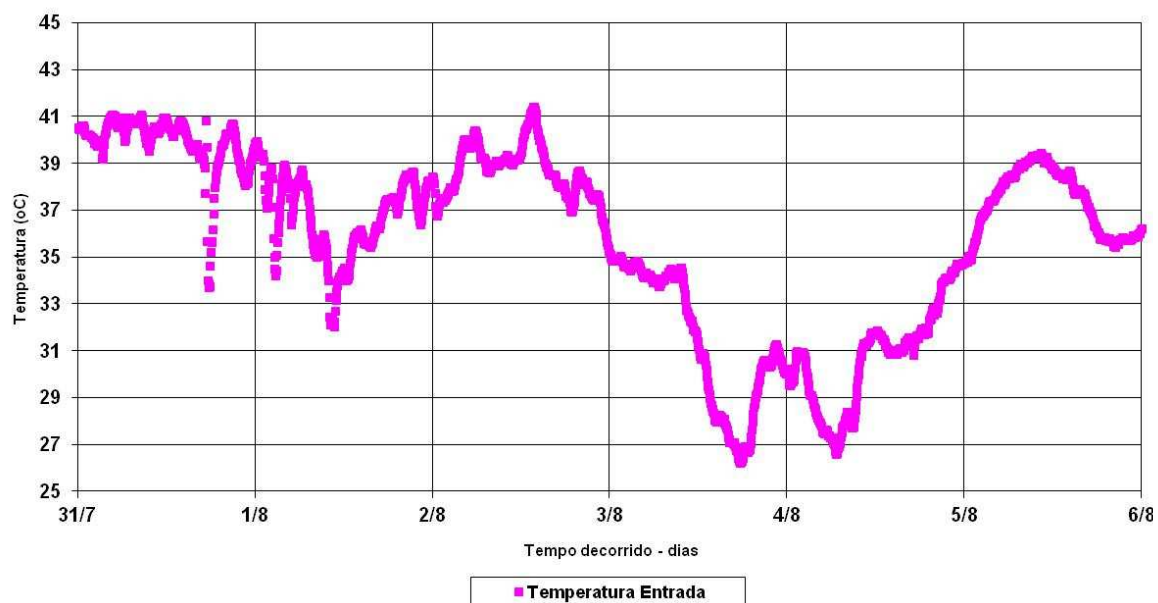


Figura 7.20 – Duto ML: Temperatura do gás na entrada

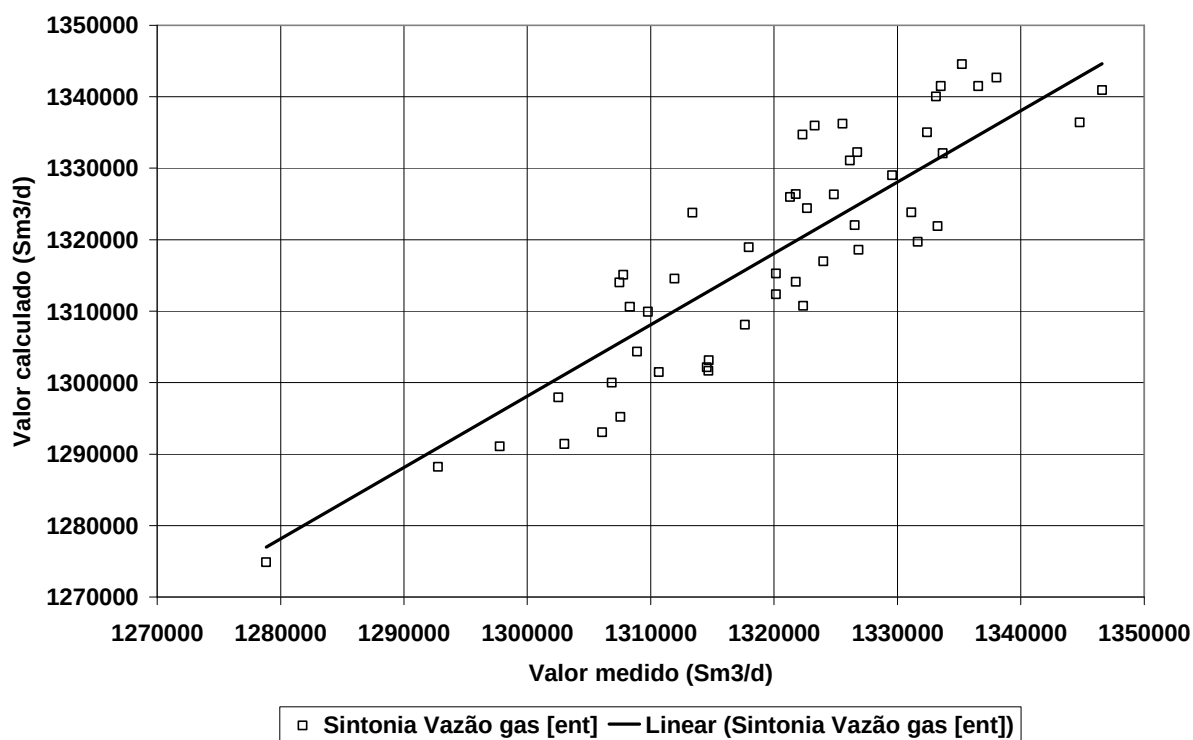


Figura 7.21 – Duto ML - Qualidade da sintonia $P_{ent} \times P_{sai}$ para validar $Q_{gas-ent}$ (duto)

Tabela 7.5 – Duto ML, parâmetros estatísticos da sintonia de $Q_{gas-ent}$

Ajuste	Correlação	Desvio Padrão (Sm³/d)	Desvio Padrão (%)	Num. de observações
$Q_{gas-ent}$	0,99997	7732	0,57	50

- Um alinhamento $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$, para validar a pressão na entrada. A **Figura 7.22** ilustra a qualidade da sintonia, bem como a **Tabela 7.6** traz os parâmetros estatísticos;

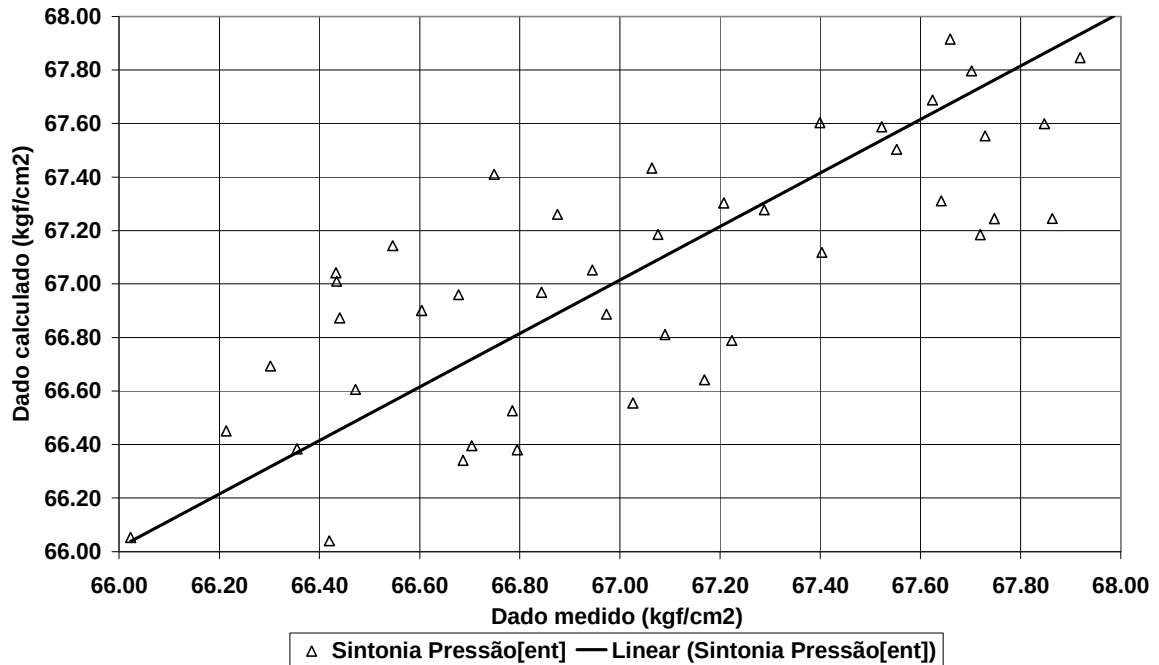


Figura 7.22 – Duto ML – Qualidade da sintonia $Q_{gas-ent} \times P_{sai}$ para validar P_{ent} (duto)

Tabela 7.6 – Duto ML, parâmetros estatísticos da sintonia de P_{ent}

Ajuste	Correlação	Desvio Padrão (kgf/cm²)	Desvio Padrão (%)	Num. de observações
P_{ent}	0,99994	0,35	0,52	50

- E finalmente um alinhamento $Q_{gas-sai} \times P_{ent}$, para validar a pressão na saída. A **Figura 7.23** ilustra a qualidade da sintonia, bem como a **Tabela 7.7** traz os parâmetros estatísticos;

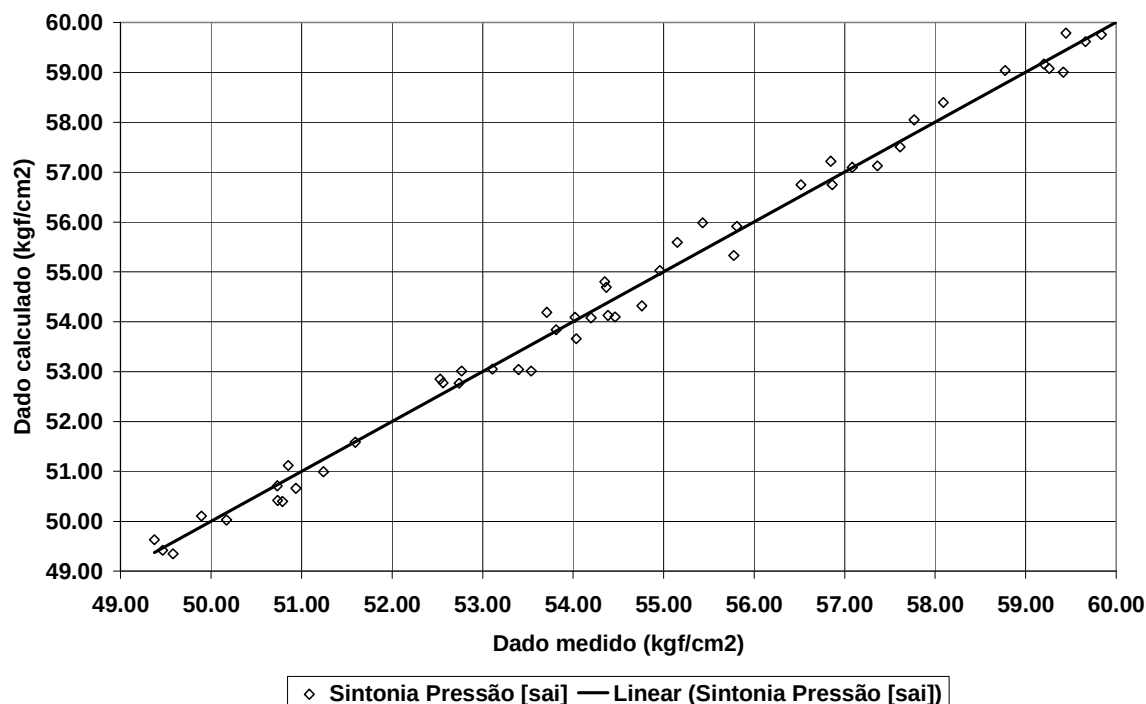


Figura 7.23 – Duto PL – Qualidade da sintonia $Q_{gas-sai} \times P_{ent}$ para validar P_{sai} (duto)

Tabela 7.7 – Duto ML, parâmetros da sintonia de P_{sai}

Ajuste	Correlação	Desvio Padrão (kgf/cm ²)	Desvio Padrão (%)	Num. de observações
P_{sai}	0,99997	0,28	0,42	50

7.4. Adaptações frente às limitações da modelagem SPM-4

7.4.1. Introdução:

O objetivo final deste trabalho é compor uma solução para detecção de vazamentos em dutos bifásicos a qual tenha o estimador de estados com base na formulação SPM-4, descrita na seção 2.5, no método numérico FCT descrito na seção 3.3.2, bem como uma análise de desequilíbrios mássicos baseada em probabilidade seqüencial, conforme descrito nas seções 6.11 e 6.14.

Assim, as limitações já conhecidas da formulação SPM-4 deverão ser contornadas de maneira a permitir seu uso e ao mesmo tempo não se afastar muito da realidade.

7.4.2. Pigs e golfadas

As simulações dos segmentos se darão na janela de tempo onde os pigs estão ausentes.

7.4.3. Variação de temperatura

O modelo SPM-4 é isotérmico, com temperatura base definida. Assim, uma vez sintonizados os casos não isotérmicos com o simulador comercial, novas simulações foram realizadas, com os mesmos parâmetros de sintonia, porém com as temperaturas da entrada e de ambiente alteradas para 20 °C, o que provoca uma temperatura também em torno de 20 °C na saída do segmento simulado.

Assume-se por princípio que, embora sejam condições diferentes sob o ponto de vista térmico, não se afastará em muito de um caso real, sob o ponto de vista da dinâmica do escoamento.

7.4.4. Variação de elevação

A formulação SPM-4 empregada neste trabalho não aborda perfil de elevação variável de sorte que apenas um comprimento inclinado foi adequadamente escolhido em cada duto para seu teste.

7.4.5. Entrada do duto x entrada do segmento

Devido ao exposto no parágrafo anterior, a entrada do duto é a plataforma, mas a entrada do segmento de teste será próxima à base do riser.

7.4.6. Transferência de massa entre fases

A equação genérica da continuidade (Eq. 2.3, **seção 2.4.4**), definida com todos os seus elementos constitutivos, tem no lado direito da igualdade um termo de transferência de massa Γ_k . Esse mesmo termo aparece na equação genérica de balanço de *momentum* (Eq. 2.4, **seção 2.4.5**), em sua quinta parcela do lado direito. Na formulação SPM-4, tanto a equação da continuidade (Eq. 2.50, **seção 2.5.7**) quanto na equação de *momentum* (Eq. 2.51, **seção 2.5.7**) este termo é desprezado, i. e., assume-se que não há transferência de massa entre as fases. Essa limitação será analisada uma vez que traz conseqüências sobre a surgência de líquido na saída do duto.

7.5. **Parâmetros utilizados no código SPM-4**

7.5.1. Introdução

De acordo a **Tabela 7.1**, que define os principais dados dos segmentos selecionados, tais segmentos apresentam inclinações bastante inferiores (0,08 e 0,04 graus respectivamente para os segmentos de PL e ML) àquela testada no **capítulo 4** (1 grau) o que permitiu a execução de todos os casos dentro do conceito de quase horizontalidade.

É igualmente importante ressaltar que **código SPM-4** foi utilizado apenas para o cálculo do termo transiente dm_{total}/dt da Eq. (6.9) oriunda da desigualdade (6.5). Assim o fez através do cálculo do inventário a cada varredura do sistema de acordo com a Eq. (6.11), utilizando o método de Simpson (Eq. 6.12). Na sequência empreende o cálculo da diferenciação numérica regressiva de acordo com a Eq. (6.14) e **Tabela 6.3**, na **seção 6.9**.

7.5.2. Condições de contorno

À semelhança dos casos rodados para validação do **capítulo 4**, todos os casos foram configurados com vazões mássicas de gás e líquido, bem como fração volumétrica de líquidos na entrada e pressão na saída, tal como consta na **Tabela 4.6**. A diferença reside no fato do objetivo ser o inventário, e não a pressão de cabeça.

7.5.3. Discretizações espaciais e temporais

Também com base nos casos rodados no capítulo de validação, procurou-se manter a mesma coerência de discretizações entre 100 e 200 elementos espaciais uniformemente distribuídos. O duto ML exigiu a discretização o número maior de elementos.

Sob o ponto de vista da discretização temporal, o elemento de configuração foi o parâmetro CFL, que variou entre 0,01 e 0,04. Analogamente, observou-se que o duto ML exigiu sempre os CFL menores dentro dessa faixa.

7.5.4. Vazões mássicas nos contornos

As vazões mássicas totais nos contornos foram calculadas a partir das velocidades de cada fase bem como de suas massas específicas na condição *in situ* dos contornos.

$$\dot{m}_{TOTAL} = \frac{\pi}{4} D_I^2 (\rho_G u_G + \rho_L u_L) \quad (7.1)$$

7.5.5. Determinação das massas específicas

A massa específica da fase gás foi determinada a partir da equação de estado da Eq. 7.2:

$$P = C_1 \rho^\gamma \quad (7.2)$$

A qual é sintonizada a partir dos dados da **Tabela 7.4** para o fluido do duto PL e da **Tabela 7.7** para o fluido do duto ML, sempre tomados sobre a isoterma de 20°C conforme feito nas próprias figuras.

Para a massa específica do líquido, a formulação SPM-4 exige um valor constante. Assim foi escolhido o valor de centro da pressão em cada segmento (PL e ML) levando em consideração já os casos de interesse deste trabalho, quais sejam, os de baixa pressão, sendo, por conseguinte diferentes daqueles constantes na **Tabela 7.1**, a qual traz os dados reais de operação dos dutos. A **Tabela 7.8** abaixo descreve os valores empregados.

Tabela 7.8 – Incertezas inseridas nas variáveis de processo

Segmento	$P_{\text{média}}$ (bara)	ρ (kg/m ³)
PL	16,0	762
ML	18,0	764

7.6. Incertezas inseridas nos ensaios

7.6.1. Introdução

De maneira a se aproximar mais da condição real, incertezas foram inseridas nos dados simulados pelo simulador comercial que emulou os dados de campo. As incertezas se deram de acordo com a **Tabela 7.9**, tomaram como base o valor momentâneo lido e serviram indistintamente a ambos os segmentos de dutos testados (PL e ML).

Tabela 7.9 – Incertezas inseridas nas variáveis de processo

	$\dot{m}$ (%)	P (%)
Entrada	3	0,2
Saída	2	0,2

A razão pela qual a incerteza da vazão na entrada foi considerada maior que a de saída se deve ao fato de que na maior parte dos casos tem-se medição multifásica na entrada (plataforma) e monofásica (UPGN) na saída, a jusante do coletor de golfadas.

7.6.2. Geração da incerteza

A questão mais importante na geração da incerteza é assegurar uma seqüência de números aleatórios que seja capaz de oferecer um número grande variações, i. e., de não repetições da seqüência, grande o suficiente para ser aplicado em todo o problema.

A dimensão do problema pode ser estimada para cada ensaio em 06 (seis) variáveis (Q_{Lent} , Q_{Gent} , P_{ent} , Q_{Lsai} , Q_{Gsai} , P_{sai}) adquiridas a uma varredura média de 10 (dez) segundos ao longo de um dia inteiro. Assim, para assegurar que ao longo do ensaio todas as incertezas sejam efetivamente aleatórias, há a necessidade de se

gerar uma sequência contendo ao redor de 52.000 (cinquenta e dois mil) números aleatórios entre 0 e 1 sem repetição.

Em termos de geração de números aleatórios pode ser considerado um espaço amostral pequeno, plenamente atendido pelo algoritmo do gerador de números pseudo-aleatórios existente na planilha Excel 2010 (WICHMANN & HILL^[206]), o qual é capaz de produzir seqüências bem maiores. A planilha Excel guarda até hoje uma má reputação na geração de números aleatórios, o que particularmente foi verdade até a versão anterior à 2003, quando o algoritmo acima citado substituiu um antigo e ineficiente algoritmo.

De acordo com o conceito de número aleatório, tem-se um número existente num conjunto de possíveis valores, cada um com a mesma probabilidade, o que caracterizaria uma distribuição uniforme de valores. Entretanto, tanto o algoritmo de probabilidade seqüencial, que se baseia numa distribuição normal de eventos diretamente associados às incertezas de medição de vazões, quanto as próprias incertezas em si, que seguem predominantemente também uma distribuição normal, não se adéquam a distribuições uniformes. A transformada de BOX & MULLER^[207] permite a conversão de uma seqüência aleatória uniforme numa seqüência aleatória Guassiana ou normal.

Este trabalho, no entanto, obteve suas seqüências de números aleatórios diretamente do sítio de internet sem fins lucrativos RANDOM.ORG^[208], que fornece gratuitamente seqüências Gaussianas aleatórias, geradas através de um verdadeiro gerador de números aleatórios, cuja semente é o ruído atmosférico, captado através de antenas de rádio. A característica de genuíno gerador de números aleatórios do citado sítio é certificada pelo organismo regulador britânico independente eCOGRA^[209].

Uma vez de posse da sequência real de números aleatórios Gaussianos a incerteza em cada variável de acordo com a **Tabela 7.9**, para cada varredura do sistema foi determinada a partir da Eq. (7.3) abaixo:

$$\langle X \rangle = X \cdot (1 - \varepsilon + 2\varepsilon\eta) \quad (7.3)$$

onde $\langle X \rangle$ é a variável já com a incerteza incorporada, X é a variável gerada pelo simulador comercial, ε é a incerteza absoluta para cada tipo de variável de acordo com a **Tabela 7.9.**, e η é o elemento da seqüência aleatória gerado pelo gerador aleatório random.org^[208].

7.7. Cenários testados

7.7.1. Introdução

Os desempenhos dos sistemas de detecção de vazamentos baseados em desbalanceamentos materiais, de acordo com a posição do furo (dentro do intervalo monitorado) foram abordados na **seção 6.7**. Entretanto, aquela análise desconsidera a aleatoriedade dos erros associados às medições, especialmente à medição de vazão. Assim, na abordagem de probabilidade seqüencial, cada ensaio de vazamento, na mesma localidade, com a mesma vazão vazada, apresentará um tempo de detecção que é função de: (i) a probabilidade assumida de falsos alarmes (P_{FA}); (ii) a aleatoriedade dos erros das medições.

Assim, mesmo empregando a mesma probabilidade de falsos alarmes, bem como instrumentos apresentando a mesma exatidão associada de medição, os tempos de detecção poderão variar substancialmente. Isso ocorre uma vez que a probabilidade é seqüencial, i. e., dependerá da ordem de chegada de cada dado com seu erro associado. A possibilidade de duas seqüências iguais de dados e respectivos erros acontecer é praticamente nula. Ou seja, embora seja uma metodologia altamente confiável, confiabilidade esta vinculada a uma probabilidade, é paradoxalmente pouco repetitiva.

7.7.2. Ensaio com o duto em regime permanente

São os ensaios onde os vazamentos são abertos em pontos específicos, com o duto em regime permanente. Teoricamente, nessa condição não há necessidade de testar a variação de inventário que consta na Eq. (6.14) uma vez que, a menos das incertezas de medição de vazão na entrada e saída do duto, tais vazões permanecem constantes. Assim, nestes ensaios há necessidade apenas de aplicar o algoritmo de detecção descrito na **seção 6.11**, o que permite uma gama maior de testes.

Na prática a variação do inventário será testada também em regime permanente por duas razões básicas: (i) para verificar sua variação; (ii) para verificar sua contribuição na detecção, uma vez que a partir do momento que o vazamento abre, o duto entra em regime transiente.

Decidiu-se então por testar vazamentos próximos a entrada (10%), meio (50%) e saída (90%) do segmento de duto monitorado, de forma a analisar sua tendência. A posição de 10% deve ser aquela com melhor (ou menor) tempo de detecção uma vez que se encontra próximo a um dos contornos e é um ponto de pressão alta.

A posição de 50% é esperada como aquela de pior tempo de detecção (ou seja, maior) por ser a que está mais distante dos contornos.

A posição de 90% deve ter um desempenho ligeiramente inferior àquele da posição de 10%.

No que diz respeito às vazões vazadas buscou-se diâmetros que forneçam vazões próximas aos limites de interesse, i. e., aqueles abordados nos casos teóricos da seção 6.14.2. Ou seja, a métrica a ser avaliada será uma vazão vazada e não um diâmetro de furo, o qual servirá apenas de meio para que se alcance esse fim. A **Tabela 7.10** a traz posições e diâmetros no regime permanente.

Tabela 7.10 – Posições e diâmetros de falha a serem testados em regime permanente

Proximidade	Diâm.(in) Duto PL	Diâm.(in) Duto ML	Posição (%)	Posição Duto PL (km)	Posição Duto ML (km)
Entrada	0,5	0,3	10	3,70	18,80
	1,0	0,5			
	2,0	1,0			
	3,0	1,5			
Meio	0,5	0,3	50	18,50	94,00
	1,0	0,5			
	2,0	1,0			
	3,0	1,5			
Saída	0,5	0,3	90	33,33	169,20
	1,0	0,5			
	2,0	1,0			
	3,0	1,5			

7.7.3. Ensaio com o duto em regime transiente

Para o duto operando em regime transiente apenas o ponto de pior desempenho é empregado, i. e., o meio do segmento. Dois cenários transientes serão abordados, quais sejam: (i) transiente ascendente, onde pressão e inventário aumentam na linha ao longo do tempo, também conhecido como empacotamento; (ii) transiente descendente, onde pressão e inventário diminuem na linha ao longo do tempo, também conhecido como desempacotamento. As mesmas quatro vazões serão testadas. A motivação aqui é verificar a degradação do desempenho em função do duto estar operando em regime transiente. A **Tabela 7.11** traz tais posições e os diâmetros de furo empregados no regime transiente.

Tabela 7.11 – Posições, diâmetros e transiências sob teste no regime transiente

Duto	Diâmetro (in)	Posição	Tipo de transiência	
PL	0,5	Meio (50%)	Ascendente	Descendente
	1,0			
	2,0			
	3,0			
ML	0,3	Meio (50%)	Ascendente	Descendente
	0,5			
	1,0			
	1,5			

Já a **Tabela 7.12** descreve o número total de casos, 56, divididos em regimes, posições e diâmetros de falha (ou vazões de falha).

Tabela 7.12 – Descrição do número de casos testados

Segmento	Posições				Diâmetros	Total
	Permanente	Transiente ascendente	Transiente descendente	Total Pos.		
PL	3	1+1 ⁽¹⁾	1+1 ⁽¹⁾	7	4	28
ML	3	1+1 ⁽¹⁾	1+1 ⁽¹⁾	7	4	28
Total	6	4	4	14	4	56

⁽¹⁾ Os transientes foram executados para ref. de vazão nominal e instantânea

7.7.4. Estratégia para a pressão

Este trabalho busca abranger cenários onde outras metodologias não apresentem desempenhos satisfatórios. Assim, abaixou-se propositalmente a pressão de operação do duto para apenas 10 bara na sua saída, de forma a testar o desempenho do método a baixas pressões, o que impacta também as vazões vazadas. É importante observar que não é comum um gasoduto operar em pressão tão baixa, mas o foco se dá no método de detecção de vazamentos em si.

7.7.5. Estratégia para a velocidade de abertura do vazamento

Pela mesma razão colocada na seção anterior, os vazamentos foram abertos de forma bastante lenta. O critério usado foi metade do tempo médio de trânsito da onda de pressão de um contorno ao outro, para o duto mais longo. Um acréscimo de 20% foi permitido para acomodar imprecisões. Assim, os vazamentos nos dois dutos foram abertos em 6 min.

7.8. Metodologia empregada na validação

A metodologia empregada na validação do modelo segue resumida na **Figura 7.24**, dividida em dados (D) e processos (P). Os dados são ainda divididos em dados de entrada (DE) e dados de saída (DS). O encadeamento de eventos é seqüencial, i. e., indicado pelas setas.

Assim, dados de campo para os dutos PL e ML (**DE1**, **seções 7.3.1.1 e 7.3.1.2**, **Figuras 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20**) foram levantados para a sintonia (**P1**, **seções 7.3.1, e 7.3.2**) do simulador comercial OLGA, para os dutos como um todo. Tal processo se deu por tentativa e erro e gerou parâmetros de sintonia para os dois dutos como um todo (**DS1**), que incluem tipicamente valores de diâmetro interno, rugosidade e parâmetros relativos à transferência de calor tais como coeficiente global de troca térmica e temperatura média dos trechos os quais os dutos atravessam. A eficiência de tal processo foi documentada nas **Figuras 7.11, 7.12, 7.13, 7.21, 7.22 e 7.23**.

A partir daí os segmentos de dutos (definidos na **Tabela 7.1**), e não mais os dutos inteiros, são configurados (processo **P2**) no mesmo simulador comercial, com base também em **DE1**, a menos da temperatura, uma vez que tais casos serão isotérmicos, à diferença dos casos reais, sendo essa uma das limitações causadas pela formulação SPM-4 descritas na **seção 7.4**. Com base nestas mesmas restrições, bem como na definição dos casos a serem simulados (**DE2**, descrito na **seção 7.7**) são gerados (processo **P3**) os dados teóricos dos vazamentos (**DS2**) para ambos os segmentos de dutos.

O próximo processo (**P4**) se encarrega de inserir incertezas brutas (descritas na **Tabela 7.9**) nas variáveis dos contornos dos casos presentes em **DS2**, a partir de um conjunto de incertezas aleatórias genuínas e Gaussianas (**DE3**, definido na **seção 7.6.2**), gerando assim a bases de dados com incertezas brutas (**DS3**). O processo **P5** suaviza os valores presentes em **DS3** através de média móvel de 30 pontos (ou 5 min., dado que a varredura é de 10 s), descrita na **seção 5.6.2**, através da Eq. (5.1), e gera a base dados **DS4**.

A partir desse ponto o modelo SPM-4 passa a ser usado. Sua sintonia é realizada pelo processo **P6** com base nos dados suavizados presentes na base **DS4**, o que gera a base de dados **DS5**, a qual contém os parâmetros de sintonia do modelo SPM-4, consideravelmente mais simples.

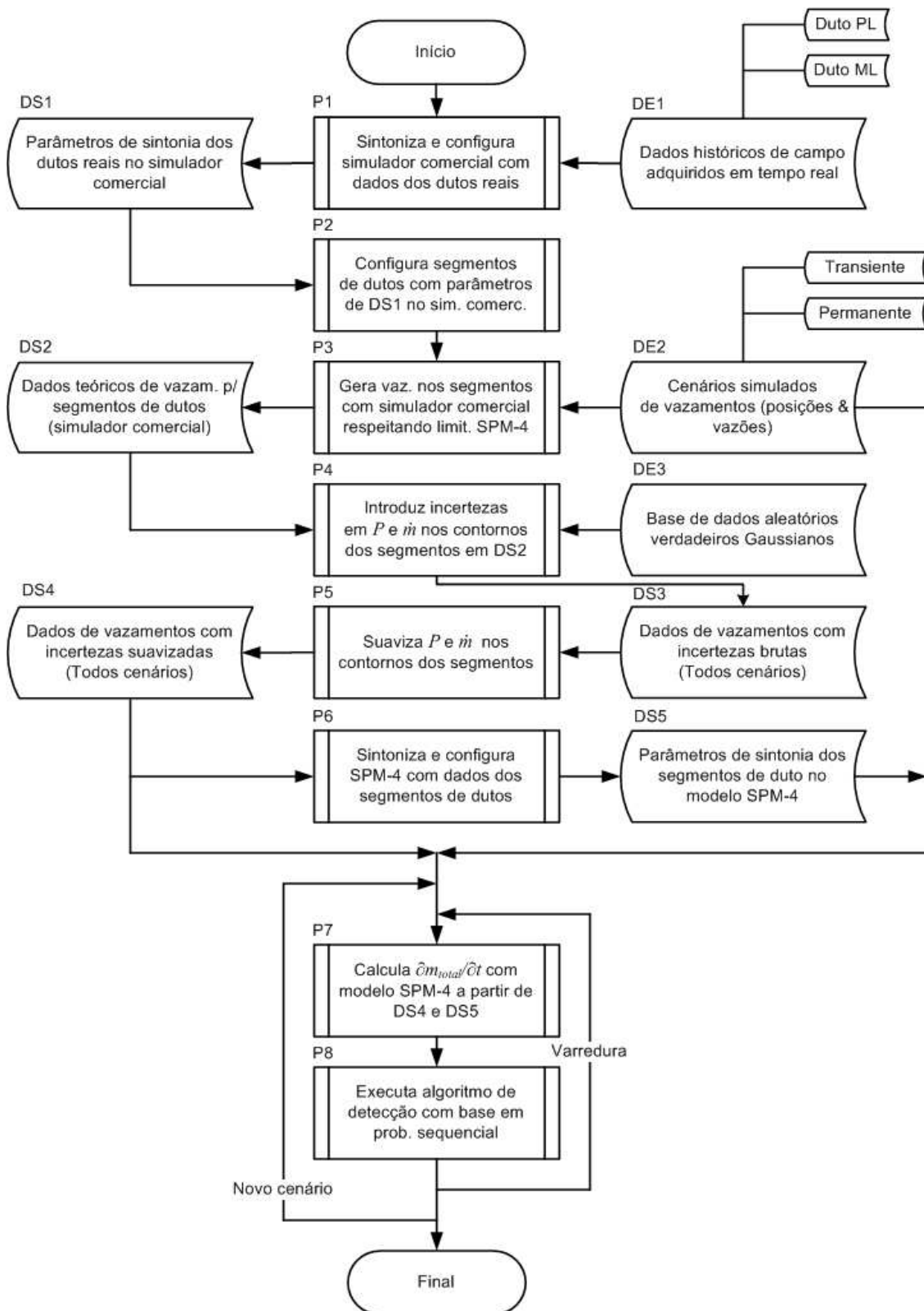


Figura 7.24 – Metodologia de validação do modelo da solução proposta

Nessa altura, uma discussão passa a ser pertinente: deve a sintonia se dar com base em dados brutos, ou dados suavizados, uma vez que o processo **P1** que sintonizou o simulador comercial usou dados reais de campo, porém brutos. Por que os dados de campo não foram suavizados? A resposta está na qualidade dos dados de campo: eles não foram adquiridos em taxas curtas, tais como 10 ou 30 s; a maior parte deles foi adquirida com intervalos maiores e irregulares, o que tiraria a representatividade da média móvel.

Os processos **P7** e **P8** são aqueles que realmente vão executar em conjunto a solução proposta que compõe o modelo SPM-4 como estimador de estados e o modelo estatístico de tempo real, que na realidade é uma análise de desbalanceamentos mássicos com base no teste de probabilidade seqüencial. Cada cenário será executado e os tempos no qual a detecção ocorre serão tabulados, para os casos onde ela efetivamente ocorrer.

Em todos os casos optou-se por uma configuração de condições de contorno de vazão na entrada e pressão na saída de maneira a ter-se a mesma condição testada no **capítulo 4**.

7.9. Resultados para o segmento PL

7.9.1. Ensaio com o segmento em regime permanente

Quatro vazões vazadas foram analisadas, sendo uma caracterizadamente abaixo da incerteza média de vazão, outra ao redor dessa incerteza e duas acima. A **Tabela 7.13** resume os casos testados.

Tabela 7.13 – Posições e vazões testadas em regime permanente, segmento PL

Proximidade	Diâmetro (in)	Vazão (kg/s)	Vazão (%)	Posição (km)	Posição (%)
Entrada	0,5	0,3848	0,73	3,70	10
	1,0	1,4978	2,84		
	2,0	5,4862	10,38		
	3,0	11,1025	21,02		
Meio	0,5	0,3353	0,63	18,50	50
	1,0	1,3106	2,48		
	2,0	4,8756	9,23		
	3,0	10,0535	19,03		
Saída	0,5	0,2789	0,53	33,33	90
	1,0	1,0976	2,08		
	2,0	4,1631	7,88		
	3,0	8,8032	16,66		

Conforme descrito na seção 7.7.2 (pág. 171), os vazamentos foram abertos em 6 min., em rampa linear de maneira a caracterizar uma abertura lenta. Há também uma média móvel de 5 min. (ou 300 s). O critério estabelecido para a janela de tempo da média móvel foi o tempo de trânsito que onda de pressão leva para percorrer a metade do comprimento do maior segmento dentre os dois em comparação (ML e PL), comprimento este referente à pior posição para detecção dentro do segmento mais longo. O critério foi aplicado aos dois dutos de maneira indistinta por uma questão de base comum de comparação.

Os efeitos da abertura lenta, bem como da média móvel somados levam a detecção para um momento tardio. Não é simples computar os efeitos de cada um no tempo retornado pelo algoritmo de probabilidade seqüencial.

Os dados referentes ao início/final dos vazamentos, bem como dos parâmetros do algoritmo de probabilidade seqüencial seguem na **Tabela 7.14**.

Tabela 7.14 – Dados de configuração do algoritmo, regime permanente, segmento PL

Início (s)	Final (s)	Início (h)	Final (h)	$\dot{m}_{vaz-01}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-02}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-03}$ (%)	P_{FA} (%)	$\sigma_{\dot{m}_C}$ (%)	$\dot{m}_{nom.}$ (kg/s)
172800	173160	48	48,1	3,6	5,0	10,0	1,0	3,61	52,83

A **Tabela 7.15** ilustra os dados obtidos em cada um dos doze exercícios efetuados. Os tempos t_1 , t_2 , e t_3 , bem como Δt_1 , Δt_2 e Δt_3 dizem respeito aos três batentes $\dot{m}_{vaz-01}$, $\dot{m}_{vaz-02}$ e $\dot{m}_{vaz-03}$ respectivamente, onde:

$$\dot{m}_{vaz} = \dot{m}_{vaz}(\%) \dot{m}_{nom.} \quad (7.3)$$

Tabela 7.15 – Duto PL, segmento em regime permanente

Prox.	Diâmetro (in)	Vazão (%)	Posição (%)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	Δt_1 (min.)	Δt_2 (min.)	Δt_3 (min.)
Entrada	0,5	0,73	10	ND*	ND	ND	--	--	--
	1,0	2,84		173983	176265	ND	19,72	57,75	--
	2,0	10,38		173341	173352	173413	9,02	9,20	10,22
	3,0	21,02		173275	173275	173324	7,92	7,92	8,73
Meio	0,5	0,63	50	ND	ND	ND	--	--	--
	1,0	2,48		176991	ND	ND	69,85	--	--
	2,0	9,23		173513	173535	173693	11,88	12,25	14,88
	3,0	19,03		173403	173403	173452	10,05	10,05	10,87
Saída	0,5	0,53	90	ND	ND	ND	--	--	--
	1,0	2,08		174854	ND	ND	34,23	--	--
	2,0	7,88		173374	173791	173495	9,38	9,85	11,58
	3,0	16,66		173403	173403	173452	10,05	10,05	10,87

(*) Não detectado

A título de ilustração o caso de 1,0 in na entrada será abordado aqui no corpo do texto, e os demais gráficos das funções $g[t] \times \dot{m}_{vaz}$, bem como $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$ seguem no **Anexo I**.

A **Figura 7.25** ilustra o caso de 1,0 in, próximo à entrada onde as funções $g[t]$ para os diferentes batentes $\dot{m}_{vaz-01}$, $\dot{m}_{vaz-02}$ e $\dot{m}_{vaz-03}$ (na figura referidos respectivamente como B1, B2 e B3) são expostas. É um caso limite, uma vez que a vazão vazada (2,84%) ainda é inferior ao mínimo vazamento detectável (3,61%) de acordo com a equação 6.13. Observe que mesmo assim dois batentes identificaram o vazamento, embora apenas um fosse necessário. Outra observação relevante é fato da função $g[t]$ ter apresentado inflexões em ambos batentes. Esse efeito se deve ao fato da vazão ser inferior ao vazamento mínimo, mas não invalida o ensaio. Por uma questão apenas de precaução eles foram eliminados e considerados inválidos, uma vez que a base do método é exatamente enfatizar sua confiabilidade. A partir deste ponto no texto, por uma questão de praticidade e apenas para os gráficos de $g[t] \times \dot{m}_{vaz}$, bem como $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$, os eixos dos gráficos somente terão a unidade física da variável que se deseja ilustrar, estando as mesmas definidas propriamente na legenda do gráfico.

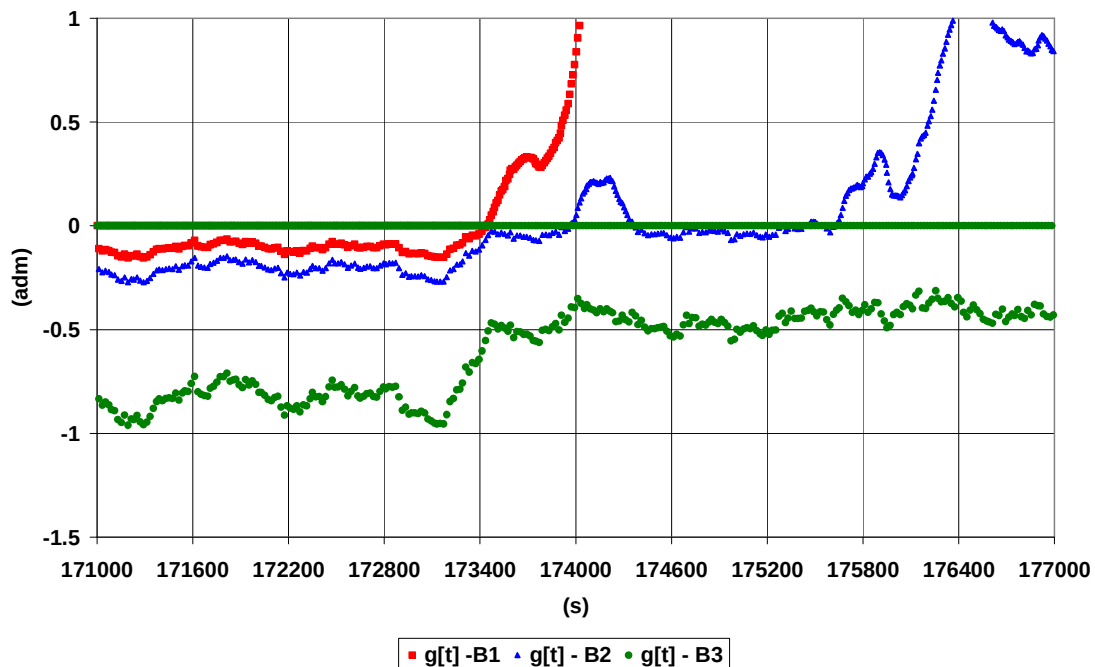


Figura 7.25 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

A **Figura 7.26** traz o acompanhamento do comportamento de $\dot{m}_C \times dm_{total}/dt$, para o mesmo caso da figura anterior.

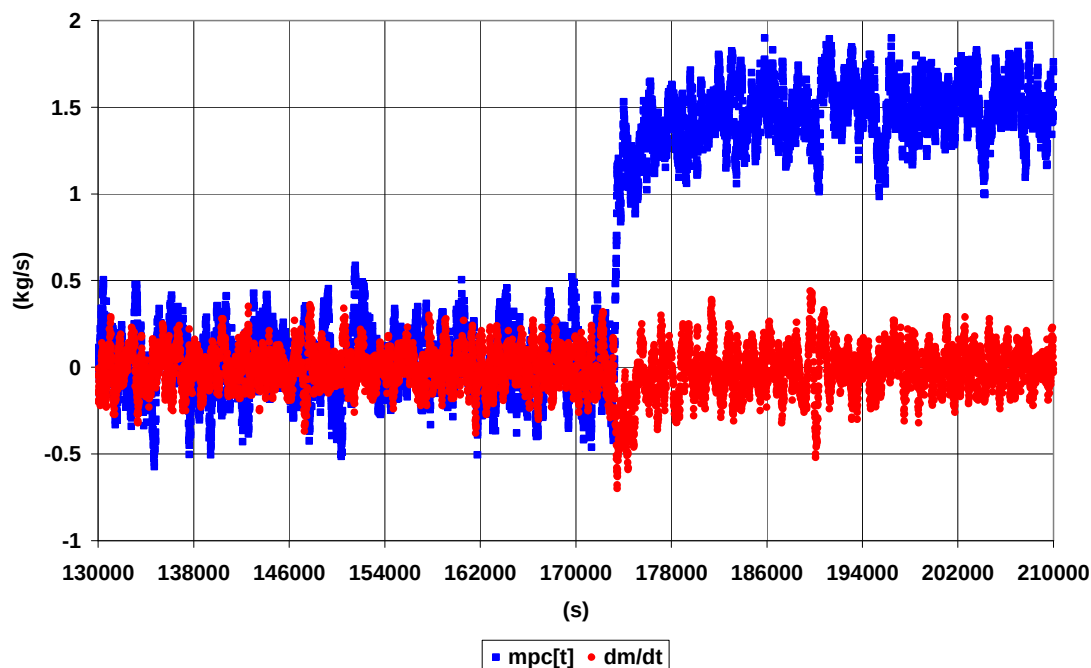


Figura 7.26 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

7.9.2. Discussões – regime permanente, segmento PL

O algoritmo de probabilidade seqüencial retornou comportamento bem próximo do esperado. Todos os ensaios com meia polegada de diâmetro dizem respeito a uma vazão vazada muito inferior a incerteza da medição de vazão de entrada e saída do duto, e também inferior à métrica limite da metade do menor batente $\dot{m}_{vaz}$.

Os ensaios de uma polegada foram aqueles que retornaram as interpretações mais importantes. O comportamento foi o esperado de acordo com a discussão da **seção 6.7.2**, pág. 95, onde o tempo do meio é o maior por ser o mais distante dos medidores de entrada e saída. O tempo da entrada é o menor por estar mais próximo do medidor de vazão em ponto de maior pressão, e o de saída, é o segundo menor tempo, também por estar mais próximo de uma das medições de vazão. Com relação aos batentes $\dot{m}_{vaz}$, o comportamento também foi o esperado, onde o batente mais próximo da vazão real vazada foi sempre o primeiro a alarmar, mesmo que por vezes junto com o segundo batente mais próximo. Os batentes que não alarmaram, assim o fizeram pela mesma razão dos ensaios de meia polegada.

Os ensaios de duas e três polegadas basicamente acompanharam o comportamento daquele de uma polegada, uma vez que foram os maiores vazamentos e, por conseguinte, os mais fáceis de serem detectados.

A **Figura 7.27** traz a curva de sensibilidade para o primeiro batente de $\dot{m}_{vaz}$ ($\dot{m}_{vaz-01}$, 3,61% da vazão nominal). Observa-se que as linhas retas desenhadas na figura não representam correlações; foram apenas incluídas para demonstrar a tendência de cada curva. Não há correlação devido ao caráter probabilístico do algoritmo empregado (probabilidade sequencial).

De qualquer sorte, em média representam o comportamento esperado: furos no meio são os mais demorados; furos próximos à entrada são os mais rápidos de serem detectados e os furos próximos à saída são detectados mais rapidamente que os do meio, em tempo que se aproxima mais daqueles furos detectados próximos à entrada do segmento monitorado.

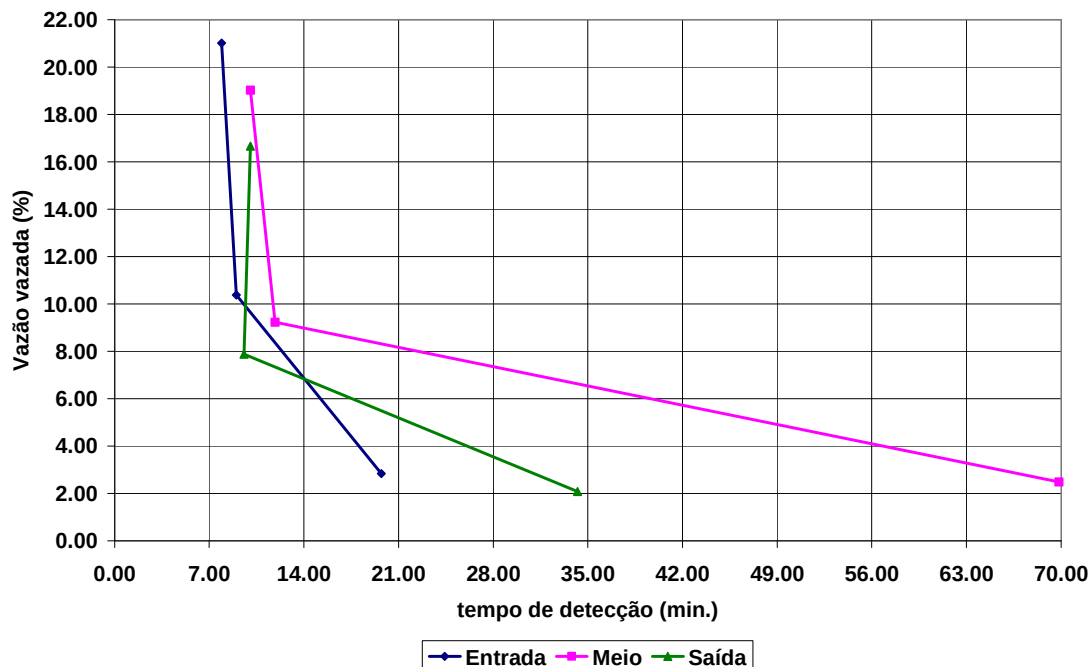


Figura 7.27 – Resultado de sensibilidade, segmento PL, regime permanente para o batente de 3,61%

7.9.3. Ensaio com o segmento em regime transiente

No regime transiente a situação é mais complexa em termos de exigências na detecção de vazamentos. Há relevantes desbalanceamentos mássicos entre a entrada e a saída do duto, sem que haja vazamentos, i. e., característicos da operação. É imperativo que o sistema não alarme nessas situações do contrário o fará em falso, violando o principal parâmetro de desempenho.

A título de ilustração, considere a **Figura 7.28** na qual o duto opera normalmente em regime permanente na vazão de 6 MM Sm³/d (46,3 Sm³/s), e uma

queda para 2,5 MM Sm³/d (28,94 Sm³/s) é forçada na entrada do duto, numa rampa linear de 2,4 h (0,1 dia), ao final do primeiro dia. O mesmo movimento ao contrário é feito ao final do segundo dia, i. e., recupera-se a vazão original de 6,0 MM Sm³/d, também numa rampa linear de 2,4 h de duração.

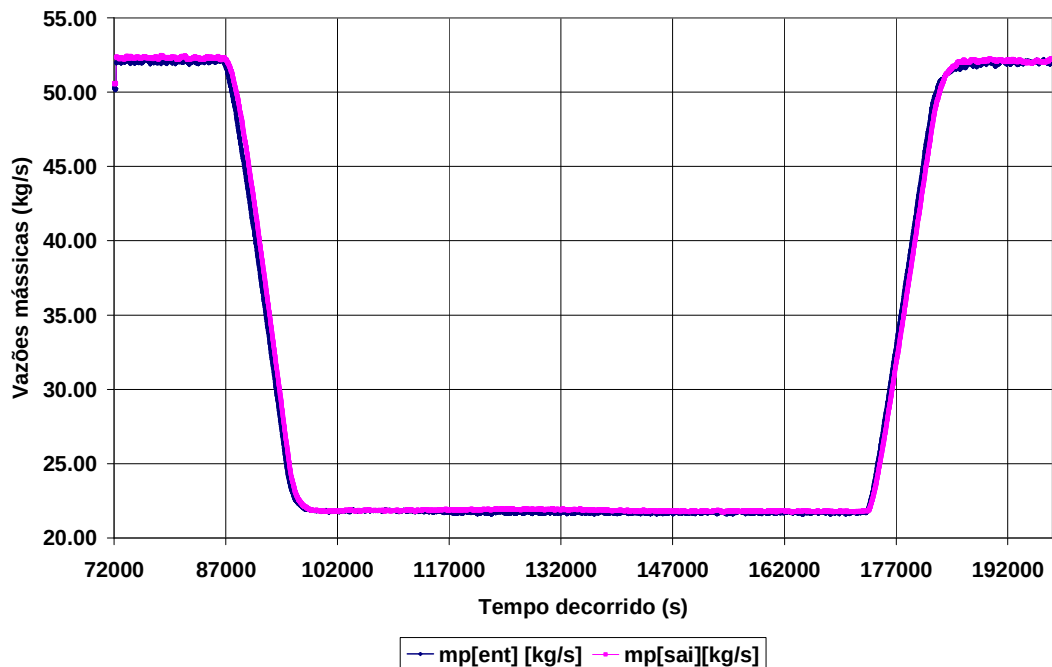


Figura 7.28 – Transientes induzidos no segmento PL

A **Figura 7.29** ilustra o comportamento de dois parâmetros chave para o desempenho do algoritmo aqui proposto: a variação do inventário (dm_{total}/dt), e a função $\dot{m}_C[t]$. Quatro batentes de $\dot{m}_{vaz}$ são testados para os valores de 3,61%, 5%, 10% e 20% de acordo com a **Figura 7.30**.

Os batentes ficam todos bem comportados sem tendências abruptas de subida em relação ao valor unitário. É importante salientar que nessa figura há apenas pontos, uma vez que todos os batentes voltam a zero quando seus valores caem abaixo de zero. Assim caso os pontos fossem ligados por retas a curva inteira estaria pintada da cor do batente que cai no valor mais baixo (qual seja, o maior, uma vez que não há vazamento), o que impossibilitaria a visão dos outros batentes.

Há ainda uma segunda diferenciação para o regime permanente: não há uma vazão nominal constante para servir de referência para $\dot{m}_{vaz}$, de acordo com a Eq. (7.2). Esse é um parâmetro crucial para a Eq. (6.50), que é a centro do algoritmo aqui proposto. Assim buscou-se comparar nestes ensaios duas vazões de referência: a nominal que caracteriza a operação em regime permanente, bem como a instantânea ou momentânea, sempre tendo a entrada como referência.

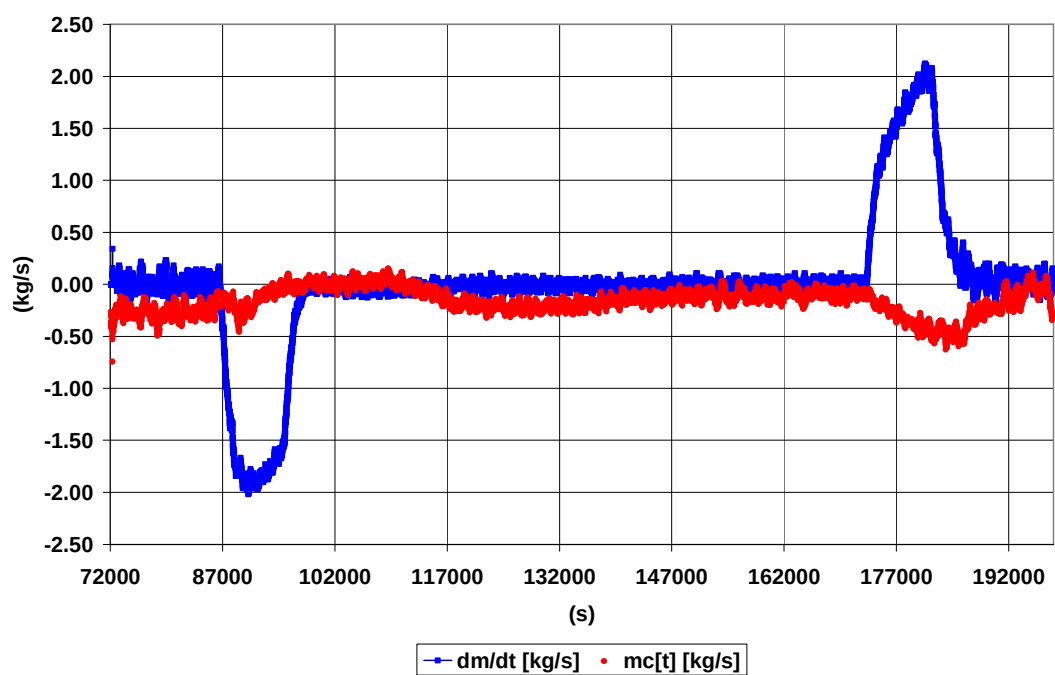


Figura 7.29 – Comportamento de $\dot{m}_c[t]$ e de dm_{total}/dt durante o regime transiente

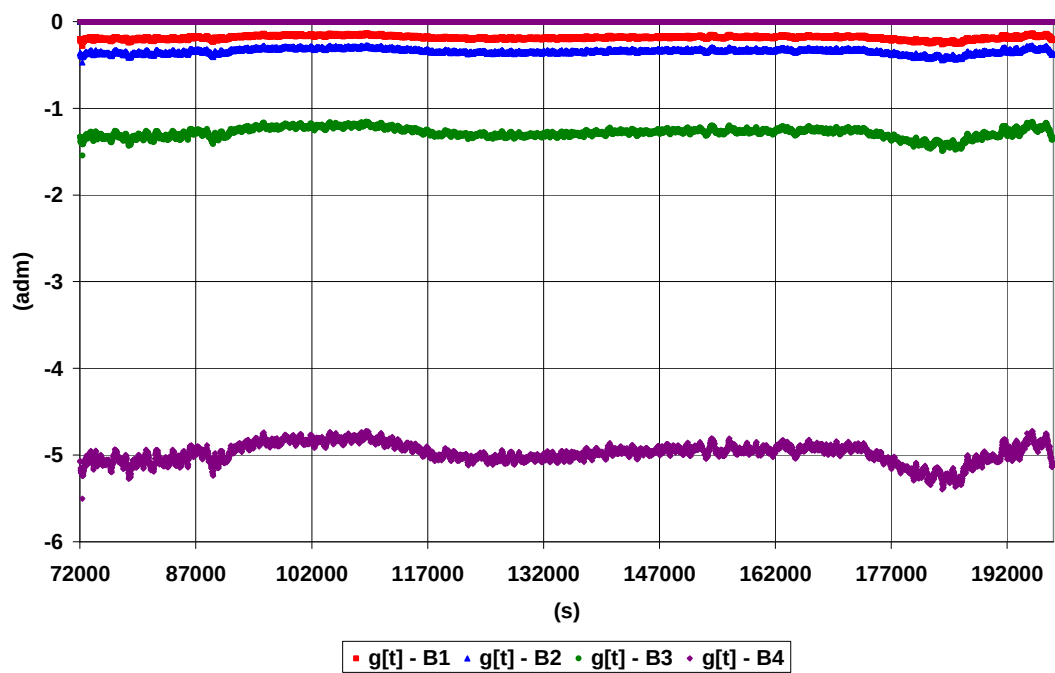


Figura 7.30 – Comportamento dos batentes de $\dot{m}_{vaz}$ durante o regime transiente

Para o estudo do comportamento durante o regime transiente fez-se uso da operação representada na **Figura 7.28** onde o vazamento é aberto no momento em que o transiente começa a se desenvolver. Os parâmetros configurados para o algoritmo de detecção no regime transiente ascendente seguem na **Tabela 7.16** e para o regime transiente descendente na **Tabela 7.17**. Destaca-se o fato de que um quarto batente para $\dot{m}_{vaz}$ foi inserido.

Tabela 7.16 – Dados de config. do algoritmo, seg. PL em transiente ascendente

Início (s)	Final (s)	Início (h)	Final (h)	P_{FA} (%)	$\sigma_{\dot{m}_C}$ (%)
172800	173160	48	48,1	1,0	3,61
$\dot{m}_{vaz-01}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-02}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-03}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-04}$ (%)	$\dot{m}_{nom.-01}$ (kg/s)	$\dot{m}_{nom.-02}$ (kg/s)
3,6	5,0	10,0	20,0	52,83	$\dot{m}_{ent}$

Tabela 7.17 – Dados de config. do algoritmo – seg. PL em transiente descendente

Início (s)	Final (s)	Início (h)	Final (h)	P_{FA} (%)	$\sigma_{\dot{m}_C}$ (%)
86400	86760	24	24,1	1,0	3,61
$\dot{m}_{vaz-01}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-02}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-03}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-04}$ (%)	$\dot{m}_{nom.-01}$ (kg/s)	$\dot{m}_{nom.-02}$ (kg/s)
3,6	5,0	10,0	20,0	52,83	$\dot{m}_{ent}$

A **Tabela 7.18** ilustra os resultados com a vazão nominal constante como referência para $\dot{m}_{vaz}$, ao passo que a **Tabela 7.19** os traz para a vazão instantânea como referência.

Tabela 7.18 – Resultados, segmento PL, regime transiente, $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{nom.}$

Tipo de Transiente	Diâmetro (in)	Vazão (%)	Δt_1 (min.)	Δt_2 (min.)	Δt_3 (min.)	Δt_4 (min.)
Ascendente	0,5	0,62	ND	ND	ND	ND
	1,0	2,46	ND	ND	ND	ND
	2,0	9,22	12,12	12,62	16,62	ND
	3,0	19,02	8,78	8,78	9,12	10,12
Descendente	0,5	0,47	ND	ND	ND	ND
	1,0	1,8	124,22	153,72	ND	ND
	2,0	6,67	10,42	12,00	12,83	ND
	3,0	14,18	9,93	9,93	10,70	12,37

Tabela 7.19 – Resultados, segmento PL, regime transiente, $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{ent}$

Tipo de Transiente	Diâmetro (in)	Vazão (%)	Δt_1 (min.)	Δt_2 (min.)	Δt_3 (min.)	Δt_4 (min.)
Ascendente	0,5	0,62	ND	ND	ND	ND
	1,0	2,46	14,63	16,63	ND	ND
	2,0	9,22	10,28	10,28	11,12	13,78
	3,0	19,02	8,78	8,78	9,12	10,12
Descendente	0,5	0,47	ND	ND	ND	ND
	1,0	1,8	30,85	54,20	ND	ND
	2,0	6,67	12,00	12,00	14,50	13,02
	3,0	14,18	9,93	9,93	10,70	12,37

A título de ilustração o caso de 1,0 in, em operação transiente ascendente será abordado aqui no corpo do texto, para as referências nominal e instantânea. Os demais gráficos das funções $g[t] \times \dot{m}_{vaz}$, bem como $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$ seguem no Anexo II. Assim, a **Figura 7.31** traz os batentes de $\dot{m}_{vaz}$ primeiramente para a referência nominal. Pela figura tem-se a certeza de que o vazamento não foi identificado, uma vez que nenhum dos batentes atingiu o valor unitário no domínio de tempo razoável para observação.

Considere agora a **Figura 7.32** onde a referência passa a ser a vazão momentânea. O batente B1 (em vermelho) não deixa dúvida, o vazamento foi detectado, a possibilidade de tal detecção ser falsa é inferior a 1%. O batente B2 (azul) também detectou já que cruzou ascendentemente o valor unitário. O algoritmo lida com uma dada probabilidade num momento, de sorte que o fato dele ter retornado não invalida o alarme. Para lidar com essa situação é comum exigir-se que o batente persista acima da unidade durante uma dada janela de tempo. O tamanho da janela é tempo do trânsito da onda de pressão deslocando-se sobre o comprimento total do segmento sob monitoração, que no caso desse duto é inferior a 120 s.

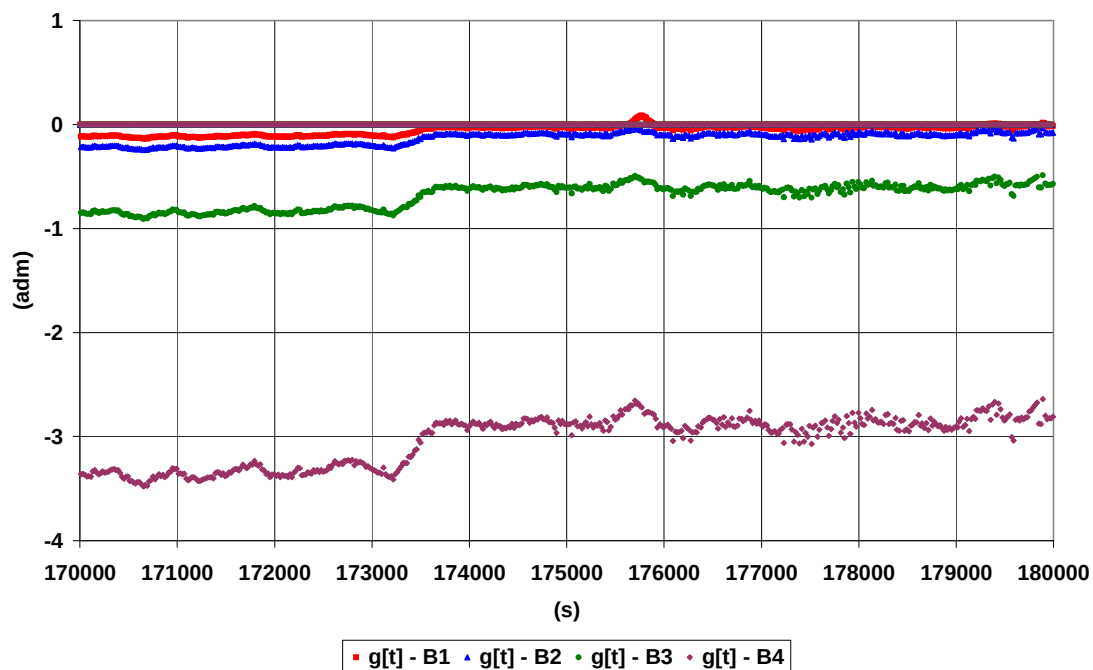


Figura 7.31 – Segmento PL, 1,0 in, meio, vazão de referência nominal, valores da função $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

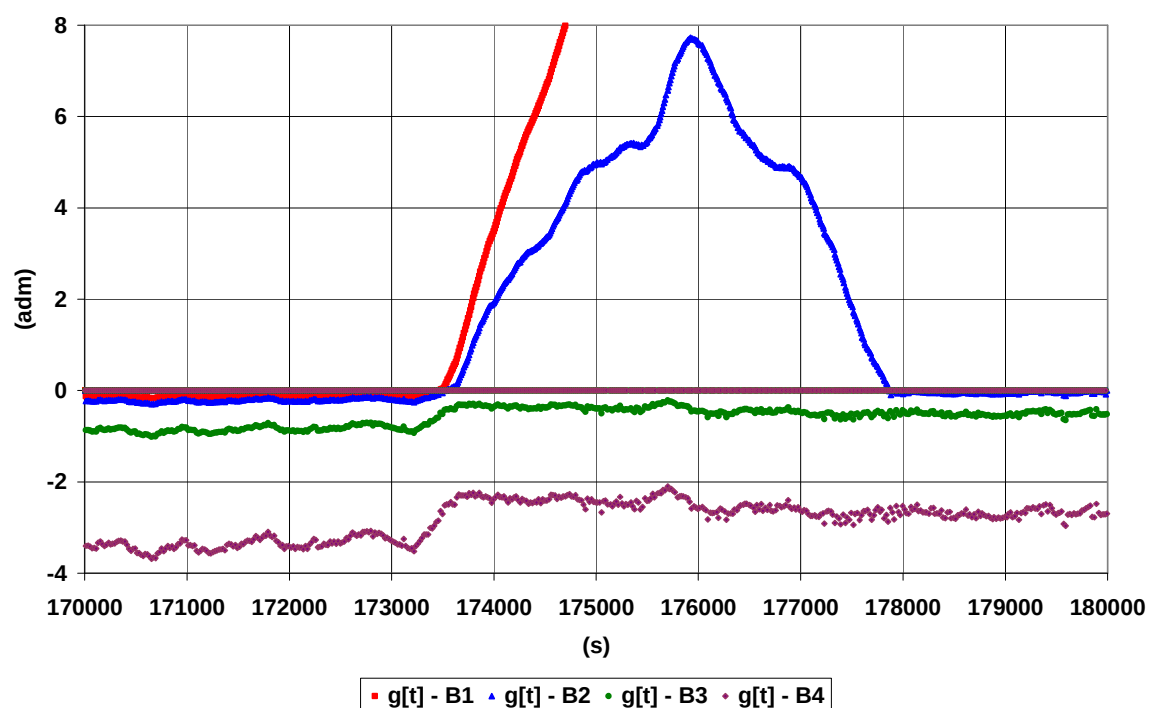


Figura 7.32 – Segmento PL, 1,0 in, meio, empacotamento, vazão de referência momentânea, valores da função $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

Assim o batente B2 é igualmente válido também por este critério. Esse comportamento é típico de vazamentos muito próximos da incerteza de medição, e de fato, esse ora identificado (2,46%) é inferior a tal incerteza (3,61%). Tal detecção

somente é possível devido ao acoplamento do algoritmo com a suavização. De toda sorte basta um e tão somente um batente alarmar para que se declare o vazamento.

Essa discussão sugere que a referência momentânea retorne valores de sensibilidade melhores. No entanto o fundamento maior desse trabalho é a confiabilidade, antes mesmo da sensibilidade. Toda situação na qual tal referência provocar dúvida na qualidade do alarme gerado deve ser evitada e a identificação de tal situação é característica do segmento de duto monitorado (comprimento, diâmetro, fração de líquidos).

A **Figura 7.33** ilustra o $\dot{m}_C[t]$ e dm_{total}/dt durante a execução do algoritmo de detecção. Observe que ambas as funções independem da referência empregada.

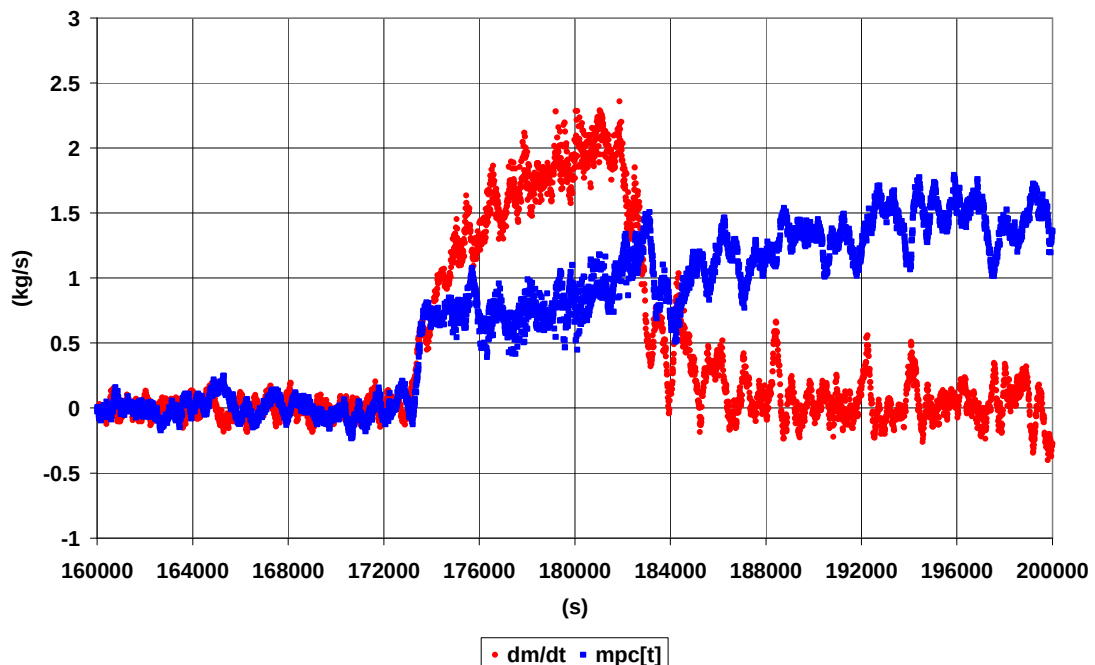


Figura 7.33 – Segmento PL, 1,0 in, entrada, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

7.9.4. Discussões – regime transiente, segmento PL

O segmento PL apresenta pouca variação do comportamento transiente em relação ao regime permanente, pois na prática seu transiente é relativamente curto. Dizendo de outra forma, seu comportamento transiente está praticamente todo contido na perturbação, uma vez que a reação a tal perturbação é rápida.

Dois efeitos podem ser identificados tanto na **Figura 7.28** quanto na **Figura 7.29**, nas quais não há vazamentos, os quais passam a ser descritos nos próximos parágrafos.

O primeiro é a presença de incertezas na função $\dot{m}_c[t]$ próximas aos momentos onde o regime transiente é mais acentuado (no intervalo de 2,4 h após a abertura dos vazamentos). As diferenças de modelagem SPM-4 em relação ao simulador comercial OLGA, bem como a forma como é determinada a derivada dm_{total}/dt , onde num primeiro momento é feita uma integração numérica para o cálculo do inventário, e na sequência uma derivação numérica do inventário em relação ao tempo, são as principais causas de tais incertezas.

O segundo é uma consequência do primeiro: a função $\dot{m}_c[t]$ não fica completamente em torno do valor zero ou em cima do eixo dos t . Há pequenos desvios devidos aos erros comentados no parágrafo anterior os quais impõem um batente mínimo maior que aquele presente do regime permanente.

Outro efeito apenas presente no regime transiente é a ausência de regras práticas para a identificação do vazamento, como as que existem no regime permanente (e. g., as duas pressões, entrada e saída, caírem). No regime transiente, as duas pressões podem estar crescendo por conta da partida do duto, a ainda assim haver vazamento.

Finalmente observa-se que todas as detecções se deram enquanto o duto ainda estava em regime transiente, ou seja, não houve o aguardo do final do transiente para a detecção. A **Figura 7.34** traz as sensibilidades para os transientes ascendentes (empacotamento) e descendentes (desempacotamento) do segmento PL, para ambas as abordagens de referência de vazão. É importante esclarecer que as diferentes referências foram usadas apenas para o cálculo de $\dot{m}_{vaz}$, i. e., para uso no algoritmo de probabilidade seqüencial. Para o percentual vazado reportado nas tabelas e nos gráficos a referência foi $\dot{m}_{nom}$. Pela figura, no caso específico do segmento PL, a opção pela vazão instantânea como referência demonstrou-se de maior sensibilidade.

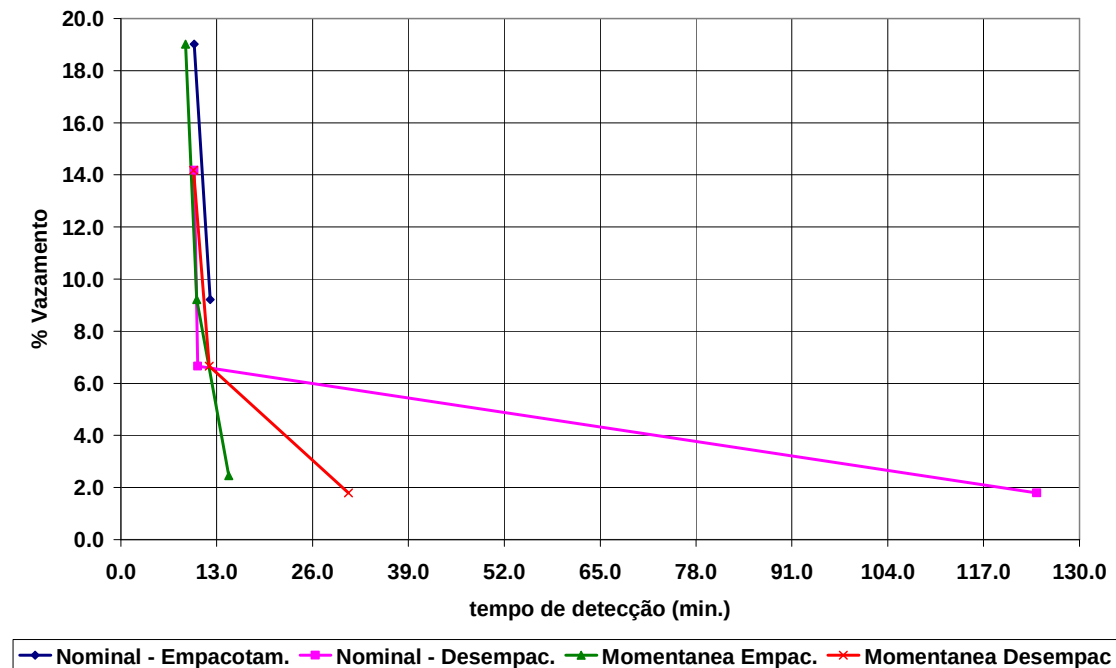


Figura 7.34 – Sensibilidade, seg. PL, regime transiente, batente de 3,61%, $\dot{m}_{vaz}$ com ambas bases $\dot{m}_{nom.}$ e $\dot{m}_{ent.}$

Os demais gráficos das funções $g[t] \times \dot{m}_{vaz}$, bem como $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$, para o segmento PL seguem no Anexo III.

7.10. Resultados para o duto ML

7.10.1. Introdução

O segmento ML apresenta desafios relevantemente maiores quando comparado com o PL. Essa característica determinou sua escolha para os limites da tecnologia. A primeira grande diferença está na quantidade de líquido presente dentro de cada segmento (PL ou ML) na operação normal em regime permanente. Sob o ponto de vista do inventário mássico, considere a **Tabela 7.20** obtida com o simulador comercial OLGA, traz as relações mássicas entre as fases de seu inventário, ao se impor vazão nominal de gás de 1,3 MM Sm³/d.

Tabela 7.20 – Relação entre as fases do inventário do segmento ML

Pressão saída (bar)	Massa gás (ton.)	Percentual Gás (%)	Massa líq. (ton.)	Percentual líq. (%)
70	1047	45	1260	55
55	871	40	1362	60
10	431	37	740	63

Observa-se que, embora continue tendo a fase predominante gás, pois as vazões mássicas de gás continuam prevalecendo, o inventário predominante do segmento é líquido, tanto na pressão operacional (saída em torno de 70 bar) quanto (e principalmente) na pressão intencionalmente baixa empregada neste trabalho (saída em torno de 10 bar).

Uma segunda diferença relevante é o seu menor diâmetro (16 in) com uma fração volumétrica de líquido uma ordem de grandeza maior (8%). Na realidade tem-se praticamente 8% a menos de seção transversal na qual o gás passa.

No entanto, sua maior diferença é seu comprimento. O segmento ML é cerca de seis vezes maior que o PL, e essa diferença está realçada na análise dos tempos de detecção observados. Esse longo comprimento provoca uma ordem de magnitude maior nos tempos transientes envolvidos. A variável mais importante do algoritmo de probabilidade seqüencial, $\dot{m}_C[t]$, que é função direta da derivada dm_{total}/dt , demonstra desvios maiores afetando objetivamente as incertezas do método. Tais desvios se devem principalmente à reação do escoamento no segmento frente à perturbação induzida. Essa reação, que no segmento PL praticamente inexistiu, neste segmento é de grande relevância e de difícil tratamento.

7.10.2. Ensaio com o segmento ML em regime permanente

Quatro vazões vazadas foram analisadas, sendo uma caracterizadamente abaixo da incerteza média de vazão, outra ao redor dessa incerteza e duas acima. A **Tabela 7.21** resume os casos testados.

Tabela 7.21 – Posições e vazões testadas em regime permanente

Proximidade	Diâmetro (in)	Vazão (kg/s)	Vazão (%)	Posição (km)	Posição (%)
Entrada	0,3	0,388	2,5	18,80	10
	0,5	1,020	6,7		
	1,0	3,350	21,9		
	1,5	5,83	38,2		
Meio	0,3	0,310	2,0	94,00	50
	0,5	0,828	5,4		
	1,0	2,810	18,4		
	1,5	5,050	33,1		
Saída	0,3	0,193	1,3	169,20	90
	0,5	0,524	3,4		
	1,0	1,890	12,4		
	1,5	3,690	24,2		

Observe que a baixa pressão forçada próximo à saída do segmento tem efeito relevante na vazão vazada. Tal como nos casos do segmento PL, os vazamentos foram igualmente abertos em 6 min., em rampa linear de maneira a caracterizar uma abertura lenta. De forma análoga, uma média móvel de 5 min. foi usada. Observe-se que este segmento de duto foi o limitador do tamanho da média móvel, determinada pela metade do tempo de trânsito de uma onda de pressão entre entrada e saída do duto. Este é tempo no qual a comunicação de um dado fluidodinâmico ocorre fisicamente num hipotético vazamento no centro geométrico do segmento (pior caso). O segmento PL usou o mesmo tempo apenas para que ambos estivessem na mesma base de comparação.

Os dados referentes ao início e final dos vazamentos, bem como dos parâmetros empregados no algoritmo de probabilidade seqüencial seguem na **Tabela 7.22**.

Tabela 7.22 – Dados de configuração do algoritmo - duto em regime permanente

Início (s)	Final (s)	Início (h)	Final (h)	$\dot{m}_{\min-1}$ (%)	$\dot{m}_{\min-2}$ (%)	$\dot{m}_{\min-3}$ (%)	P_{FA} (%)	$\sigma_{\dot{m}_C}$ (%)	$\dot{m}_{nom.}$ (kg/s)
86400	86760	24	24,1	3,61	5,0	10,0	1,0	3,61	15,27

A **Tabela 7.23** ilustra os dados obtidos em cada um dos doze exercícios efetuados. Os tempos t_1 , t_2 , e t_3 , bem como Δt_1 , Δt_2 e Δt_3 dizem respeito aos três batentes $\dot{m}_{vaz-01}$, $\dot{m}_{vaz-02}$ e $\dot{m}_{vaz-03}$ respectivamente.

Tabela 7.23 – Resultados, vazamentos com o segmento em regime permanente

Prox.	Diâmetro (in)	Vazão (%)	Posição (%)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	Δt_1 (min.)	Δt_2 (min.)	Δt_3 (min.)
Entrada	0,3	2,5	10	ND	ND	ND	--	--	--
	0,5	6,7		87988	88178	ND	26,47	29,63	--
	1,0	21,9		87108	87128	87318	11,80	12,13	15,30
	1,5	38,2		87078	87078	87098	11,30	11,30	11,63
Meio	0,3	2,0	50	ND	ND	ND	--	--	--
	0,5	5,4		96748	98368	ND	172,47	199,47	--
	1,0	18,4		90228	89878	91948	63,80	57,97	92,47
	1,5	33,1		88988	89238	91948	43,13	47,30	60,30
Saída	0,3	1,3	90	ND	ND	ND	--	--	--
	0,5	3,4		96788	101308	ND	34,23	--	--
	1,0	12,4		87668	88008	ND	21,13	21,80	ND
	1,5	24,2		87608	87428	87598	20,13	17,13	19,97

Os gráficos das funções $g[t]$ e $\dot{m}_{vaz}$ seguem no **Anexo III**.

7.10.3. Discussões – regime permanente, segmento ML

Uma primeira diferença notada, em relação ao segmento PL, é o fato esperado dos tempos de detecção serem maiores, devido ao longo comprimento do duto, e indiretamente da grande presença de líquidos.

Com relação ao comportamento do algoritmo têm-se as seguintes observações:

- Para a abertura de 0,3 in, aquela com as menores vazões vazadas, não houve detecção em nenhuma das posições, conforme esperado, uma vez que a vazão em cada posição é inferior a vazão mínima detectável de 3,61% da vazão nominal;
- Observa-se no caso anterior, que o longo comprimento do duto levou o tempo de detecção para o batente teórico de $\dot{m}_{vaz}/2$ para um tempo muito grande, praticamente infinito;
- O furo localizado no meio do segmento retornou valores consideravelmente altos para os tempos de detecção quando comparado aos vazamentos próximos a um dos contornos do segmento, também de acordo com o esperado (propriamente discutido na seção 6.7.2);
- O tempo da entrada é o menor por estar mais próximo do medidor de vazão em ponto de maior pressão, e o de saída, é o segundo menor tempo, também por estar mais próximo de uma das medições de vazão. A exceção se dá no ponto limite de 0,5 in, o qual é também explicado pelo longo comprimento do duto;
- Diferentemente do segmento PL, não se verificou a hierarquia dos diferentes batentes para $\dot{m}_{vaz}$, onde o melhor tempo de detecção quase sempre ocorreu no batente mínimo de 3,6% da vazão nominal;
- A baixa pressão na saída do duto gera comportamentos *PVT* na fase gás que apresentam inflexões, inflexões estas que são responsáveis pela observação anterior.

A **Figura 7.35** traz a curva de sensibilidade para o primeiro valor de $\dot{m}_{vaz}$ (3,61% da vazão nominal).

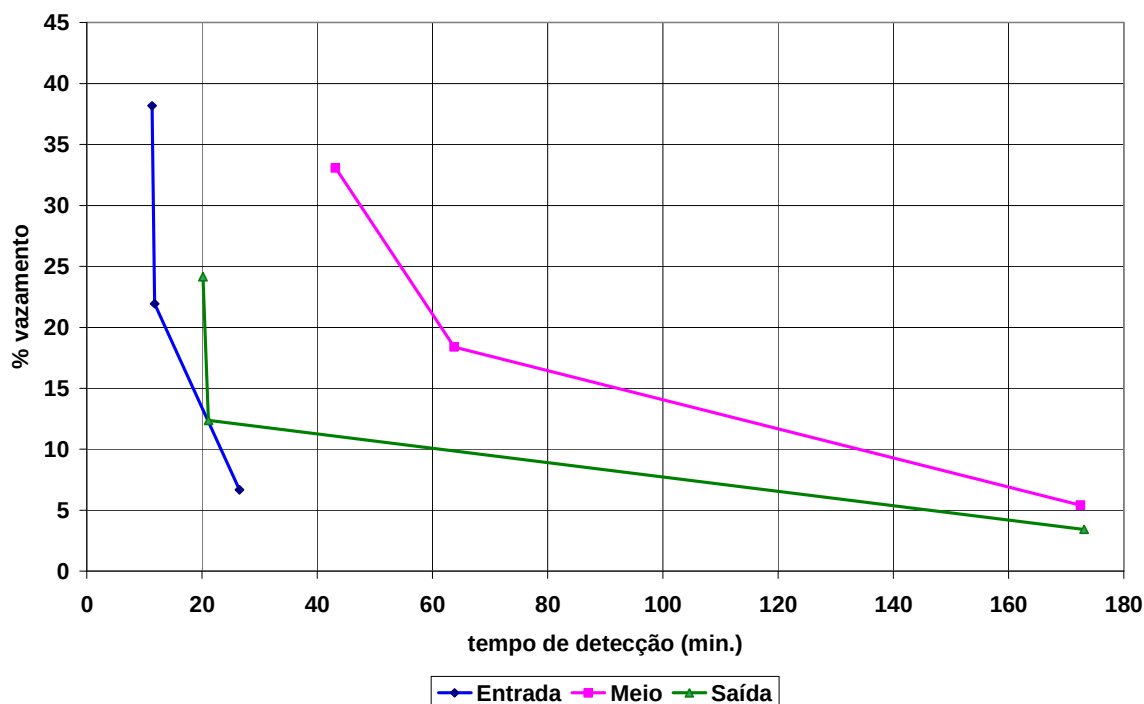


Figura 7.35 – Sensibilidade para o batente de 3,61%

7.10.4. Ensaio com o segmento ML em regime transiente

No regime transiente estão os maiores desafios para gasodutos com grande presença de líquidos e longos comprimentos. A pressão baixa na saída aumenta tais desafios. Tal como no segmento PL, existem de forma acentuadamente maior desbalanceamentos mássicos entre a entrada e a saída do duto, sem que haja vazamentos. Assim, o sistema não deve alarmar nessas situações.

A título de ilustração, considere a **Figura 7.36** na qual o duto opera normalmente em regime permanente na vazão de $1,0 \text{ MM Sm}^3/\text{d}$ ($11,57 \text{ Sm}^3/\text{s}$), e um aumento de vazão de 50% é então imposto na entrada do duto, numa rampa linear de 4,8 h (0,2 dia), ao final do segundo dia. O mesmo movimento ao contrário é feito ao final do sexto dia, i. e., recupera-se a vazão original de $1,0 \text{ MM Sm}^3/\text{d}$, também numa rampa linear de 4,8 h de duração.

Destacam-se em tal figura a longa duração dos fenômenos transientes, tanto da perturbação induzida, de 4,8 h, quanto da reação do escoamento a tal perturbação que pode ir a um dia ou mais se tomados os momentos de final da perturbação induzida até a equalização das vazões. Destacam-se igualmente as inflexões nas vazões mássicas totais (majoritariamente constituída por gás) causadas por variações *PVT* que atuam na vazão mássica.

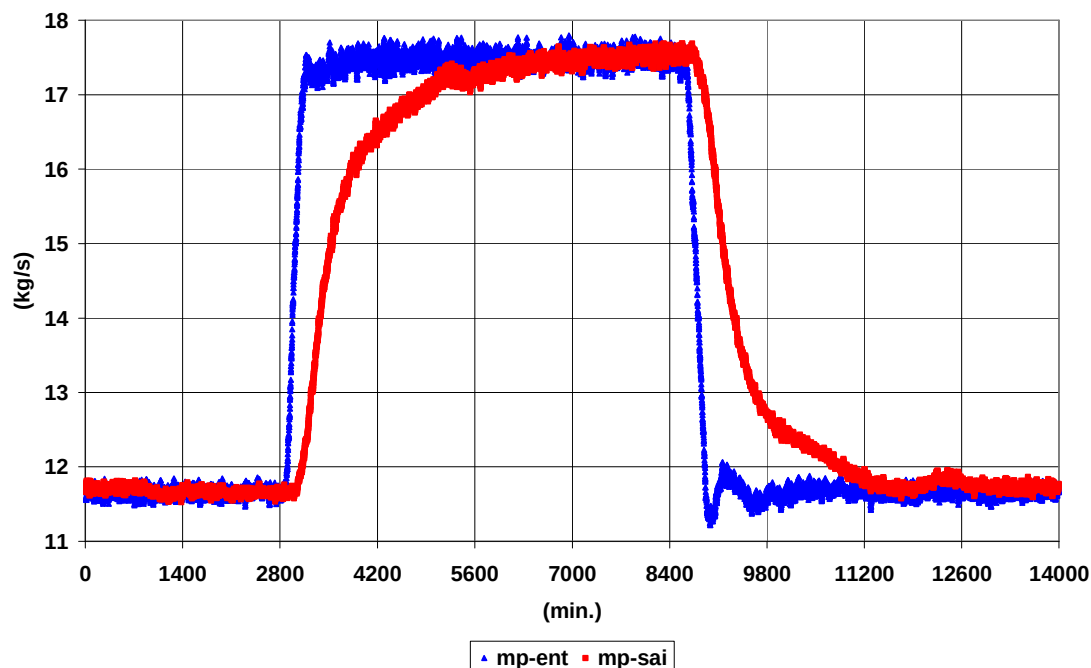


Figura 7.36 – Transientes induzidos no segmento ML

A **Figura 7.37** ilustra o comportamento de dois parâmetros chave para o desempenho do algoritmo aqui proposto: a variação do inventário com o tempo (dm_{total}/dt), e a função $\dot{m}_C$. Observe que $\dot{m}_C$ foi definida propositalmente com base num módulo. Então pode assumir valores negativos causados pela inflexão das incertezas e ainda assim estará dentro de seu intervalo de validade. Quatro batentes de $\dot{m}_{vaz}$ são testados para os valores de 3,61%, 5%, 10% e 20% de acordo com a **Figura 7.38**.

Os batentes na figura se apresentam dentro do comportamento esperado sem tendências abruptas de subida em relação ao valor unitário. O batente menor **B1** (em vermelho), apresenta algum acúmulo de probabilidade devido às incertezas presentes nas vazões mássicas.

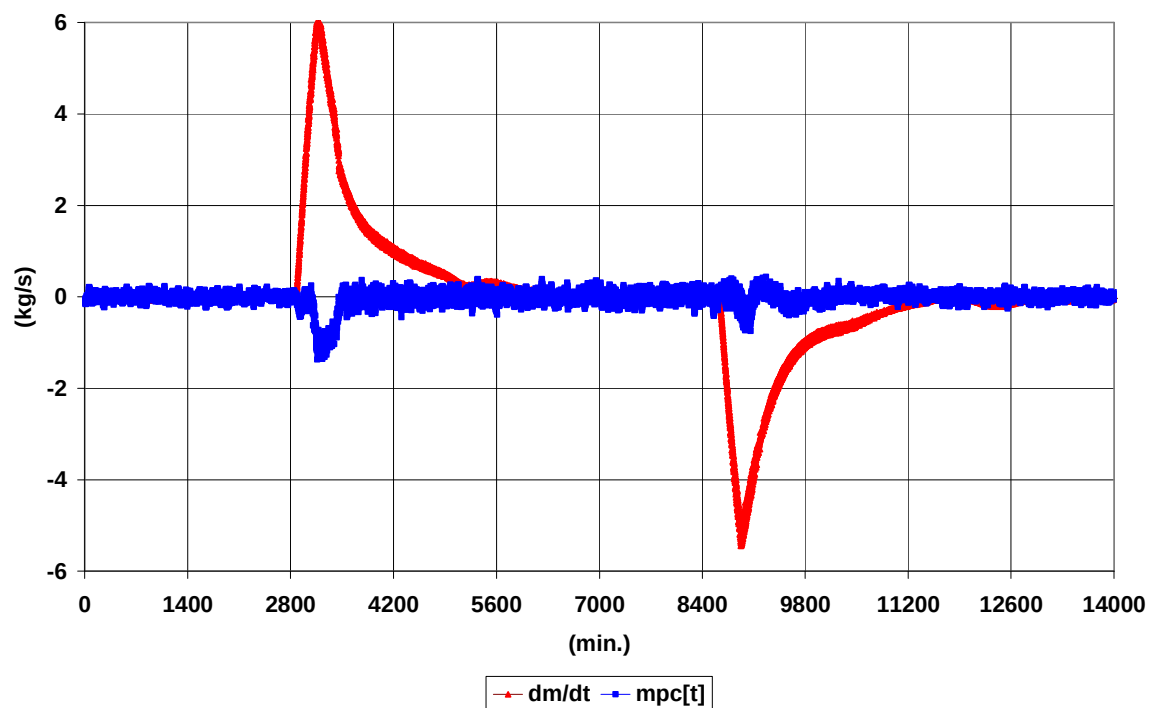


Figura 7.37 – Comportamento de $\dot{m}_C$ e dm_{total}/dt durante o regime transiente induzido

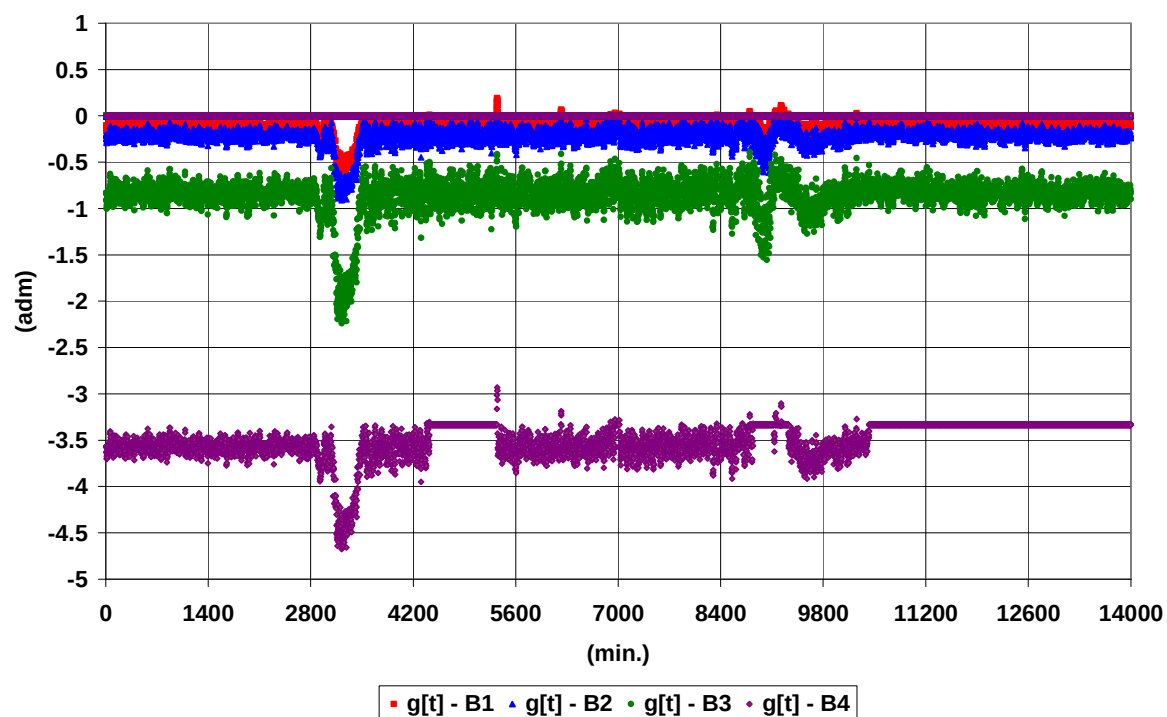


Figura 7.38 – Comportamento dos batentes de $\dot{m}_{vaz}$ durante o regime transiente

Para o estudo do comportamento durante o regime transiente fez-se uso da operação representada na **Figura 7.36** onde o vazamento é aberto no momento em que o transiente começa a se desenvolver. Os parâmetros configurados para o algoritmo no comportamento transiente ascendente seguem na **Tabela 7.24** e para o regime transiente descendente na **Tabela 7.25**. Destaca-se o fato de que um quarto batente para $\dot{m}_{vaz}$ foi inserido.

Na geração dos vazamentos com o simulador OLGA observa-se um comportamento típico para o duto ML: logo depois da abertura do furo, a vazão vazada apresenta um pico o qual é desenvolvido num curto tempo (alguns minutos) e depois se acomoda num outro valor, porém num tempo muito grande, da ordem de horas ou dias. O primeiro pico é aqui chamado de vazão 01, e o segundo de vazão 02. No caso do vazamento durante o empacotamento a vazão 01 é menor que a vazão 02, sendo o contrário quando o segmento desempacota. Esse entendimento é necessário à interpretação dos resultados do segmento ML, em regime transiente, trazidos pela **Tabela 7.26** para o caso da referência de vazão nominal, e pela **Tabela 7.27**, para o caso da referência de vazão instantânea de entrada.

Tabela 7.24 – Dados de config. do algoritmo, seg. ML, transiente ascendente

Início (s)	Final (s)	Início (h)	Final (h)	P_{FA} (%)	$\sigma_{\dot{m}_C}$ (%)
172800	173160	48	48,1	1,0	3,61
$\dot{m}_{vaz-01}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-02}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-03}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-04}$ (%)	$\dot{m}_{nom.-01}$ (kg/s)	$\dot{m}_{nom.-02}$ (kg/s)
3,61	5,0	10,0	20,0	15,27	$\dot{m}_{ent}$

Tabela 7.25 – Dados de config. do algoritmo, seg. ML, transiente descendente

Início (s)	Final (s)	Início (h)	Final (h)	P_{FA} (%)	$\sigma_{\dot{m}_C}$ (%)
518400	518760	144	144,1	1,0	3,61
$\dot{m}_{vaz-01}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-02}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-03}$ (%)	$\dot{m}_{vaz-04}$ (%)	$\dot{m}_{nom.-01}$ (kg/s)	$\dot{m}_{nom.-02}$ (kg/s)
3,61	5,0	10,0	20,0	15,27	$\dot{m}_{ent}$

Tabela 7.26 – Resultados, segmento ML, regime transiente, $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{nom}$.

Tipo de Transiente	Diâmetro (in)	Vazão 01 (%)	Vazão 02 (%)	Δt_1 (min.)	Δt_2 (min.)	Δt_3 (min.)	Δt_4 (min.)
Ascendente	0,3	1,70	2,29	ND	ND	ND	ND
	0,5	4,65	6,09	291,28	337,28	ND	ND
	1,0	17,16	20,69	245,53	284,17	286,53	1284,65
	1,5	37,46	40,08	102,53	128,03	217,53	ND
Descendente	0,3	2,29	1,70	ND	ND	ND	ND
	0,5	6,35	4,45	1075,77	1230,27	ND	ND
	1,0	25,05	15,05	123,77	164,77	ND	ND
	1,5	54,55	27,05	44,92	51,42	68,92	107,92

Tabela 7.27 – Resultados, segmento ML, regime transiente, $\dot{m}_{vaz}$ com base em $\dot{m}_{ent}$

Tipo de Transiente	Diâmetro (in)	Vazão 01 (%)	Vazão 02 (%)	Δt_1 (min.)	Δt_2 (min.)	Δt_3 (min.)	Δt_4 (min.)
Ascendente	0,3	1,70	2,29	ND	ND	ND	ND
	0,5	4,65	6,09	310,53	415,03	ND	ND
	1,0	17,16	20,69	252,78	304,28	ND	ND
	1,5	37,46	40,08	95,78	273,53	248,28	ND
Descendente	0,3	2,29	1,70	ND	ND	ND	ND
	0,5	6,35	4,45	937,60	1074,60	ND	ND
	1,0	25,05	15,05	122,77	158,77	ND	ND
	1,5	54,55	27,05	47,08	53,58	73,92	108,42

7.10.5. Discussões – regime transiente, segmento ML

Um elemento novo aparece com nitidez na **Figura 7.36**: a reação à perturbação transiente, a qual era desprezível no segmento PL, passa a ser da ordem de um dia para o segmento ML. Em outras palavras, o duto praticamente fica em regime transiente o tempo todo após o início da perturbação, ou seja, as vazões de entrada e saída são na prática sempre diferentes na condição normal de operação, sem vazamento.

Incertezas na função $\dot{m}_c[t]$, próximas aos momentos onde o regime transiente é mais acentuado (i. e., no intervalo de 2,4 h após a abertura dos vazamentos) são claramente identificadas tanto na **Figura 7.36**, quanto na **Figura 7.37**, nas quais não há vazamentos. São diversas as razões para tais diferenças: (i) diferenças de modelagem SPM-4 em relação ao simulador comercial OLGA; (ii) simplificações do perfil altimétrico, que no caso do **código SPM-4** é uma reta inclinada, e no caso do OLGA apresenta vales (pontos de mínimo) locais onde há preferencialmente acúmulo de líquido, o que influencia o transiente como um todo; (iii) a forma como é calculado o termo $d\dot{m}_{total}/dt$, onde num primeiro momento é feita uma integração numérica para

o cálculo do inventário, e na sequência uma derivação numérica do inventário em relação ao tempo.

Diferentemente do segmento PL, nem todas as detecções se deram durante a perturbação inserida, e. g., as detecções dos furos de 0,5 in se deram todas ao redor do final da perturbação, ou já durante a reação transiente à perturbação inserida.

A **Figura 7.39** traz as sensibilidades para os transientes ascendentes (empacotamento) e descendentes (desempacotamento) do segmento ML, para ambas as abordagens de referência de vazão.

Os demais gráficos das funções $g[t] \times \dot{m}_{vaz}$, bem como $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$, para o segmento ML em regime transiente seguem no **Anexo IV**.

Observa-se a mesma tendência da referência momentânea melhorar um pouco a sensibilidade de detecção. No entanto tal aumento é irrelevante e não há garantias, a tirar pelos gráficos do **Anexo IV**, que a mesma confiabilidade seja assegurada, especialmente nos vazamentos de magnitude igual à incerteza da medição de vazão nos contornos do segmento monitorado.

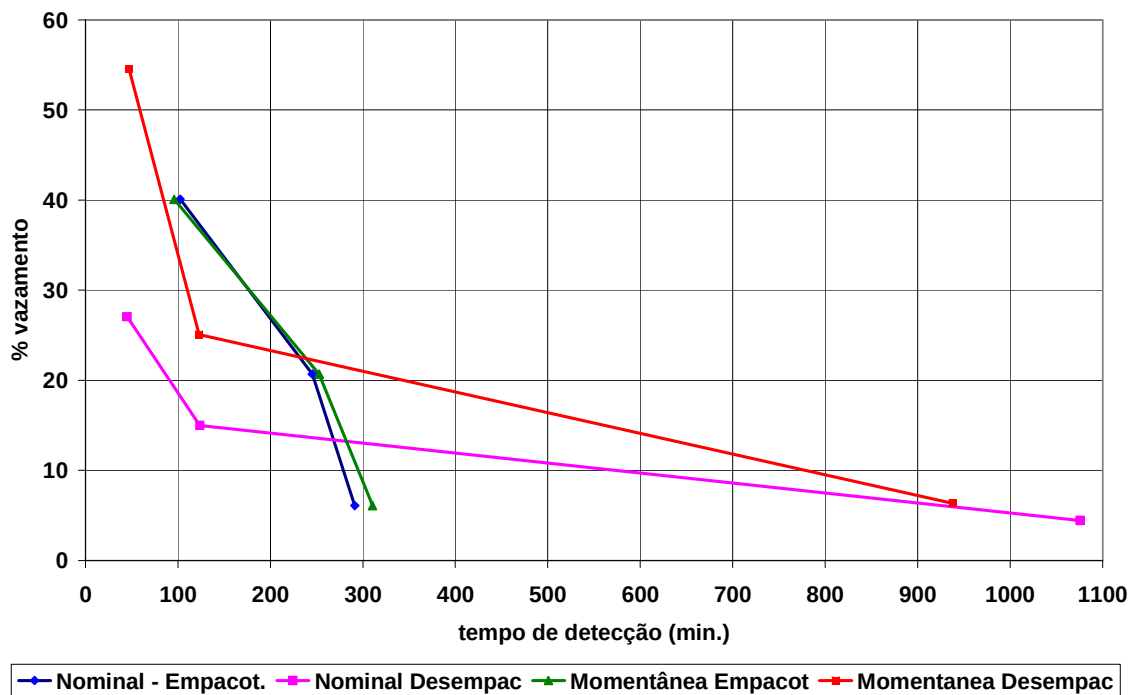


Figura 7.39 – Sensibilidade, seg. ML, regime transiente, batente de 3,61%, $\dot{m}_{vaz}$ com ambas bases $\dot{m}_{nom.}$ e $\dot{m}_{ent.}$

8. Conclusões

8.1. Introdução

Este trabalho propõe uma solução para detecção de vazamentos em gasodutos bifásicos que apresentem instrumentação de pressão e vazão em tempo real em seus contornos. Tal solução é composta por uma modelagem de escoamento bifásico (SPM-4), codificada num simulador de escoamento em tempo real (**código SPM-4**, cujas limitações são descritas na **seção 7.4**), atuando em conjunto com um algoritmo de probabilidade sequencial para a detecção de desbalanceamentos de inventário.

Dois segmentos de dutos, contidos em dutos reais da malha dutoviária nacional, são usadas na validação de tal proposta, sendo o primeiro curto (32 km/24 in), com pequena formação de líquidos (α_L média inferior a 1%) e alta vazão (6 MM Sm³/d); o segundo é longo (188 km/16 pol.), com grande formação de líquidos (α_L média ao redor de 8%) e vazão média/baixa (1,3 MM Sm³/d), vide **Tabela 7.1**. A validação é feita de forma indireta, i. e., dados reais dos dutos são empregados na sintonia de um simulador de escoamento bifásico de mercado (OLGA), a partir do qual são gerados 28 cenários de vazamentos para cada segmento de duto, em diferentes posições, nos regimes permanente e transiente, usados na verificação da solução. As seções na sequência desdobram as conclusões e recomendações observadas.

8.2. Modelagem SPM-4

A modelagem SPM-4 se demonstrou válida nos ensaios realizados, tendo como referência o simulador comercial OLGA. Os testes realizados no **capítulo 4**, que tiveram como objeto um duto relativamente longo (100 km), reproduziram resultados validados tanto na horizontalidade, nos regimes permanente (**seção 4.6.2, pág. 49**) e transiente (**seção 4.6.3, pág. 50**) quanto na condição de quase

horizontalidade. Nessa condição, testou-se uma angularidade relativamente grande, para os padrões de tal modelagem (1 grau), condição na qual o regime permanente (seção 4.6.4, pág. 51) foi também integralmente validado, e o regime transiente (seção 4.6.5, pág. 52) até o momento onde a seção transversal de líquido se encheu, caracterizando o final da condição de quase horizontalidade, uma limitação conhecida da modelagem.

Em todos os casos rodados, transientes ou não, a modelagem SPM-4 demonstrou uma proximidade em relação ao simulador OLGA com diferenças sempre inferiores a 2% na determinação da pressão de entrada do duto teste.

É importante realçar que tal modelagem foi escolhida para calcular a variação do inventário (termo transiente) em balanços materiais de escoamento bifásico, i. e., o mais complexo cenário para detecção de vazamentos em dutos, e pôde ser usada em 56 (cinquenta e seis) casos em dois dutos diferentes, todos em condição inclinada.

8.3. Método numérico FCT

O método numérico que retornou os melhores resultados, quando usado em conjunto com a modelagem SPM-4 foi o FCT (*Flux Corrected Transport*), o qual foi escolhido dentre 06 (seis) opções disponíveis e igualmente testadas. Os testes que o validaram foram os mesmos citados no parágrafo anterior. Embora não seja o mais rápido, sua robustez em todos os cenários demonstrou-se mais adequada, além de sua maior acurácia quando comparado com os outros métodos.

8.4. A solução para detecção de vazamentos

A ação conjunta da modelagem SPM-4 com o algoritmo das probabilidades seqüenciais demonstrou-se capaz de ser empregada no cenário mais desafiador: gasodutos bifásicos, operando a baixa pressão, onde o vazamento se desenvolve de forma bastante lenta. Em adição, o parâmetro de desempenho confiabilidade foi preservado e validado em tal cenário, através de um algoritmo que trabalha focado na probabilidade de falsos alarmes, procurando torná-la a menor possível.

Com o duto em condições operacionais próximas ao regime permanente o algoritmo se mostrou dentro do desempenho esperado, onde houve, de forma aleatória, até mesmo a detecção de vazamentos com vazões inferiores à incerteza média das vazões nos contornos, independentemente do comprimento ou da quantidade de líquido presente no duto. Mais uma vez, em todos os alarmes aqui testados, obteve-se uma probabilidade mínima de ser um falso positivo (1%).

Com o duto em condição transiente, a confiabilidade se mantém preservada, havendo, no entanto, um decréscimo da sensibilidade. Nesta situação, o desempenho de sensibilidade é bastante impactado pelo aumento do comprimento do duto.

A determinação do termo transiente é afetada pelas simplificações existentes na formulação SPM-4, embora ainda assim permita seu uso de forma efetiva com o algoritmo das probabilidades seqüenciais.

8.5. Flexibilidade do algoritmo

O algoritmo da probabilidade seqüencial aqui apresentado é independente do estimador de estados, podendo ser usado com qualquer simulador de escoamento bifásico que seja capaz de estimar a variação do inventário dentro do duto, seja ele comercial ou não, bastando para isso que permita seu uso em tempo real.

8.6. Desempenho computacional

O **capítulo 4** demonstrou que para apenas um segmento, o tempo requerido pela modelagem SPM-4 em conjunto com o método numérico FCT foi satisfatório, em abordagem serial, i. e., fazendo uso de apenas uma CPU. No entanto, existe a preocupação com a proximidade em relação ao tempo real, à medida que a discretização do domínio espacial aumenta, ou que se pretenda executar a monitoração em mais de um segmento na mesma máquina.

8.7. Recomendações/sugestões de continuidade do trabalho

8.6.1. Modelagem SPM-4

Há elementos de escoamento ainda não contemplados na modelagem SPM-4 que devem ser investigados no que diz respeito a sua contribuição ao cálculo do termo transiente dm_{total}/dt . São eles:

- Modelo que leve em consideração o perfil altimétrico, i. e., que vá além da modelagem quase horizontal aqui apresentada e permita a seção transversal do duto se encher de líquido. A partir daí será possível estabelecer volume e mecanismo de formação de golfadas de terreno que geram o acúmulo de líquidos em vales locais;
- Modelo que considere a transferência de massa (Γ_k , nas eqs. 2.3 e 2.4) entre as fases o que permitirá analisar a quantidade de líquido “produzido pelo gasoduto”, i. e., qual a massa de gás que se liquefará ao longo do duto, e sua influência no termo de variação do inventário;

- Inserção de modelo para a passagem de pigs e suas conseqüências nos inventários do duto, com relação à golfada de líquidos que se estabelece na frente do pig, bem como a estimação do tempo que a vazão de gás se anula próxima à chegada do pig na saída, devido ao enchimento da seção transversal com líquido.
- Modelo para separação localizada na saída do duto, uma vez que as medições na saída do duto se dão sempre a jusante da separação, uma vez que dessa forma são medições monofásicas, mais precisas.

8.6.2. Algoritmo de detecção via probabilidade sequencial

Analogamente, existem potencialidades ainda não exploradas no algoritmo de detecção por probabilidade sequencial tais como:

- Extensão do modelo para abordagem por fase, de acordo com o exposto na **seção 6.9.3**, Eq. (6.22), onde a formação de líquidos de forma mais intensa nas proximidades da saída do duto seria de alguma forma considerada;
- Os processos de suavização caracterizam todo um domínio de técnicas de filtragem de dados que trazem contribuições significativas ao algoritmo de detecção em si, sendo a exploração de novos filtros, algo que decerto trará novas contribuições;
- O mesmo pode ser dito em relação à identificação e tratamento dos dados com falhas aleatórias (lobos solitários, de acordo a definição na seção 5.6.1.6);
- O desempenho no regime transeinte sofre impactos maiores conforme demonstrado. Novos filtros podem ser adicionados para tentar minimizar esse impacto.

8.6.3. Desempenho computacional

Esse trabalho se adéqua ao domínio de computação de alto desempenho que faz uso de mais de uma CPU ao mesmo tempo, ou seja, processamento em paralelo (conforme citado, o simulador OLGA assim já o faz). A tendência tecnológica para os computadores de uso pessoal é o encapsulamento de diversas CPU's no mesmo equipamento, fazendo no entanto referência a mesma memória RAM. Nesse sentido é recomendado:

- A perfilagem do **código SPM-4**, com identificação de suas dependências funcionais;
- O uso das diretivas **OpenMP™** visando o processamento em paralelo.

8.6.4. Outras funcionalidades de tempo real

Uma vez validado um simulador de escoamento em gasodutos bifásicos (ou estimador de estados como foi aqui denominado) diversas outras funcionalidades de tempo real se tornam possíveis, tais como, não exclusivamente, a localização e quantificação de vazamentos, bem como o acompanhamento de inventário (a **seção 5.7.10** as cita sumariamente).

Referências bibliográficas

- [1] API, Computational pipeline monitoring, American Petroleum Institute, Recommended Practice # 1130, Washington, USA, 2007;
- [2] CSA, Recommended practice for liquid hydrocarbon pipeline system leak detection, Publication Z662, Canadian Standard Association, Edmonton, Canada, 2009;
- [3] BAPTISTA, R. M., Gasoduto de Manati - Dimensionamento do coletor de golfadas e da compressão da estação intermediária de Camaçandí, Comunicação Técnica PDP/TE, 057/2011 (documento interno), Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, PETROBRAS/CENPES, 2011;
- [4] OMGBA-ESSAMA, C., 2004, Numerical modelling of transient gas-liquid flow (application to stratified and slug flows), Ph.D. dissertation, Cranfield University, AMAC, Cranfield, UK;
- [5] Schlumberger/SPT Group, OLGA multiphase flow Simulator, version 7.2, October, 2012;
- [6] BENDIKSEN, K. H., MALNES, D., MOE, R., & NULAND, S., 1991, "The Dynamic Two Fluid Model OLGA: Theory and Application", In: Proceedings of the SPE Production Engineering (19451), 171-180;
- [7] "The Extended Two Fluid Model OLGA", In: OLGA Advanced User Course, First Edition, Chapter 2, Oslo, Norway, SCANDPOWER A/S 1993;
- [8] FIGUEIREDO, A. B., 2010, Validação teórica de uma modelagem para escoamento bifásico em gasodutos, com duas equações de conservação para cada fase, Dissertação de Mestrado, COPPE - Programa de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro;
- [9] ISHII, M., & IBIKI, T., 2006, Thermo Fluid Dynamics Theory of Two Phase Flow First Ed., Washington, Springer-Verlag;
- [10] TAITEL, Y., & DUCKLER, A., 1996, "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow", AIChE Journal, v. 22 (1), 47-55;
- [11] SHAHA, J., 1999, Phase Interactions in Transient Stratified Flow. PhD dissertation, Chemical Engineering Department, Imperial College, London;
- [12] FABRE, J., LINE, A., & PERESSON, L., 1989, "Two fluid/two flow pattern model for transient gas liquid flow in pipes", In: Proceedings of the 4th BHRG Multiphase Flow International Conference;
- [13] PENG, D. Y., & ROBINSON, D. B., 1976, "A new two constant equation of state", Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals , 15, pp 59-64;

- [14] SOAVE, G, 1972, "Equilibrium Constants from a Modified Redlich Kwong Equation of State", Chemical Engineering Science , 27, pp 1197, 1972;
- [15] STARLING, S., 1973, Fluid thermodynamic Properties of light petroleum systems, First Edition, Houston, Gulf Publishing Company;
- [16] CORRADINI, M. L., 1997, Fundamentals of Multiphase Flow., disponível em Department of Engineering Physics, University of Wisconsin: <http://silver.neep.wisc.edu/~WINS/publications.html>, acessado em 12/10/2011;
- [17] GARG, R., NARAYANAN, C., & SUBRAMANIAM, E., 2009, "A numerically convergent lagranian eullerian simulation method for dispersed two phase flows", International Journal of Multiphase Flow , 35, 376-388;
- [18] MORI, Y., HIJIKATA, K., & OHMORI, T., 1976, "Propagation of pressure wave in two phase flow with very high void pressure", International Journal of Multiphase Flow , 2, 453-464;
- [19] SHARMA Y. ET ALLI.,1985, "Simulation of transient two phase flow in pipelines", In: proceedings of the Second International Conference on Multiphase Flow, (pp. 141-152). London;
- [20] MANNINEN, M., & TAIIVASSALO, V., 1996, On the mixture model for multiphase flow, first edition, Ed. VTT Publications;
- [21] MASELLA, J., TRAN, Q. H., FERRÉ, D., PAUCHON, C., 1998, "Transient simulation of two phase flows in pipes", International Journal of Multiphase Flow , 24, 739-755;
- [22] JOHANSEN ET AL., 1990, "A two-phase model for particle local equilibrium applied to air classification of powers", Power Technology , 33, 121-132;
- [23] PAUCHON, DHULESIA, LOPEZ & FABRE, 1993, "TACITE: a comprehensive mechanistic model for two phase flow", In: proceedings of the 6th International Conference on Multiphase Production. Cannes;
- [24] FAILLE, I., & HEITZE, E.,1999, "A Rough Finite Volume Scheme for Modelling Two Phase Flows in a Pipeline", Journal of Computer & Fluids , 28, 213-241;
- [25] BITTENCOURT, M. C., 2009, Lei da parede para o modelo kappa epsilon para escoamentos bifásicos com bolhas, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro,RJ;
- [26] ROSA, E. S., 2012, Escoamento Multifásico Isotérmico – Modelos de multi-fluidos e de mistura, Primeira Edição, Editora Bookman, Porto Alegre;
- [27] YADIGAROGLOU, G., & LAHEY, R. T., 1976,"On the various forms of the conservation equations in two-phase flow", International Journal of Multiphase Flow , 2, 477-494;
- [28] DREW, D. A., 1983, "Mathematical modeling of two-phase flows", Annual Review of Fluid Mechanics, 15, 261-291;

- [29] LAHEY JR, R. T., & DREW, D. A., 1988, "Three dimensional time and volume averaged conservation equations of two-phase flow", Advances in Nuclear Science Technology, 1-69;
- [30] DREW, D. A., & PASSMAN, S. L., 1999, "Theory of multicomponent fluids", Applied Mathematical Sciences, 135;
- [31] BONIZZI, M., ANDREUSSI, P., & BANERJEE, S., 2009, "Flow regime independent, high resolution multi-field modelling of near horizontal gas-liquid flows in pipelines", International Journal of Multiphase Flow, 35, 34-46;
- [32] CHAN, A., & BANERJEE, S., 1981, "Refilling and rewetting of a hot horizontal tube. Part II: structure of a two-fluid model", Journal of Heat Transfer, 103, 287-291;
- [33] YEOH, G. H., & TU, J., 2010, "Computational techniques for multiphase flows - Chapter 3 - Solution Methods for Multiphase Flows. Elsevier;
- [34] PAREDES, G. E., MENDOZA, R. S., & CAZAREZ-CANDIA, O. 2007, "Averaging model for cuttings transport in horizontal wellbores", Journal of Petroleum Science and Engineering, 55, 301-316;
- [35] PARK, D. ET AL. , 1998, "The analysis of void propagation in adiabatic monodispersed bubbly two-phase flows using an ensemble-averaged two-fluid model", International Journal of Multiphase Flow , 24, 1205-1244;
- [36] ULLMANN, A., & BRAUNER, N., 2006, "Closure relations for two-fluid models for two-phase stratified smooth and stratified wavy flows", International Journal of Multiphase Flow, 32, 82-105;
- [37] LIVESCU, A., DURLOFSKY, L. V., AZIZ, K., & GINESTRA, J. C., 2010, "A fully-coupled thermal multiphase wellbore flow model for use in reservoir simulation", Journal of Petroleum Science and Engineering , 71, 138-146;
- [38] BONIZZI, M., ISSA, R., & KEMPF, M., 2001, "Modelling of gas entrainment in horizontal slug flow", In: proceedings of the International Conference on Multiphase Flow. Tulsa;
- [39] ISHII, M., & MISHIMA, K., 1984, "Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations", Journal of Nuclear Engineering and Design, 82, 107-126;
- [40] TAITEL, Y., & BARNEA, D., 1993, "Kelvin-Helmholtz stability criteria for stratified flow: viscous versus non-viscous (inviscid) approaches", International Journal of Multiphase Flow, 19 (4), 639-649;
- [41] BESTION, D., 1990, "The physical closure laws in the CATHARE code", Nuclear Engineering Design , 124, 229-245;
- [42] TOUMI, I., 1996, "An upwind numerical method for two-fluid two-phase flow models", Journal of Nuclear Science Engineering , 124, 147-168;
- [43] ISHII, M., 1975, Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow, First edition, Paris, Eyrolles;

- [44] CHENG, L. Y., DREW, D. A., & LAHEY JR., R. T., 1985, "An analysis of wave propagation in bubbly two component two-phase flow", Journal of Heat Transfer, 107, 402-408;
- [45] WATANABE T. ET AL., 1990, "The effect of virtual mass force term on the numerical stability and efficiency of systems calculations", Journal of Nuclear Engineering & Design, 120, 181-192;
- [46] CLIFT, L. Y., GRACE, J. R., & WEBER, M. E., 1978, Bubbles, drops, and particles, First edition, Academic Press;
- [47] ISHII, M., & ZUBER, N., 1979, "Relative motion and interfacial drag coefficient in dispersed two-phase flow of bubbles, drops and particles", AIChE Journal, 25, 843-855;
- [48] ABBASPOUR, M., CHAPMAN, K., & GLASGOW, L., 2010, "Transient modeling of non-isothermal, dispersed two-phase flow in natural gas pipelines", Applied Mathematical Modelling, 34, 495-507.
- [49] ZUBER, N., & FINDLAY, J. A., 1965, "Average volumetric concentration in two-phase flow systems", Transactions of ASME Journal of Heat Transfer , 87, 453-68;
- [50] ISHII, M., 1977, One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, Argonne National Laboratory, Lemont, IL;
- [51] TISELJ, I., & PETELIN, S., 1997, "Modelling of two-phase flow with second-order accurate scheme", Journal of Computational Physics , 136, 503-521;
- [52] TOUMI, I., & KUMBARO, A., 1996, "An approximate linearised Riemann solver for a two-fluid model", Journal of Computational Physics , 124, 286-300;
- [53] ZUBER, N., 1964, "On the Dispersed Two-Phase Flow in Laminar Flow Regime". Chemical Engineering Science , 19, 897-917;
- [54] ESPEDAL, M., 1998, An experimental investigation of stratified two-phase pipe flow at small Inclinations, Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology - NTNU, Department of Applied Mechanics, Trondheim;
- [55] TAITEL, Y., & DUCKLER, A., 1976, "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow", AIChE Journal, 22 (1), 47-55;
- [56] ANDRITSOS, N., & HANRATTY, T. J., 1987, "Influence of interfacial waves in stratified gas-liquid flows", AIChE , 33 (3), 444-454;
- [57] LEVY, S. 1999, Two Phase Flow in Complex Systems, New York, John Wiley & Sons Inc;
- [58] ZIGRANG, D. J., & SYLVESTER, N. D., 1985, "A review of explicit friction factor equations", Journal of Energy Resources Technology , 107, 280-283;
- [59] HAND, N. P., 1991, Gas-liquid co-current flow in a horizontal pipe, Ph.D. thesis, Queen's University of Belfast, Faculty of Engineering, Belfast;

- [60] SRICHAJ, S., 1994, High Pressure Separated Two Phase Flow. Ph. D. thesis, Imperial College, Department of Chemical Engineering. London;
- [61] CHACZYKOWSKI, M., 2010, "Transient flow in natural gas pipeline – The effect of pipeline thermal model", Applied Mathematical Modelling, 34, 1051-1067;
- [62] HARTEN, A., 1983, "High resolution schemes for hyperbolic conservation laws", Journal of Computational Physics, 49 (3), 357-393;
- [63] YEE, H. C., 1989, A class of high resolution explicit and implicit shock-capturing methods, Lecture Series on Computational Fluid Dynamics (1989);
- [64] PATANKAR, S. V., 1981, Numerical heat transfer and fluid flow. First edition. New York, Ed. Hemisphere;
- [65] NEEMAN, H. J., 1996, Autonomous hierarchical adaptive mesh refinement for multiscales simulations. First Ed. Urbana, University of Illinois at Urbana.
- [66] DE ZEEUW, Paulus. M., 1997, Acceleration of iterative methods by coarse grid corrections. Academisch Proefschrift (Universiteit van Amsterdam);
- [67] DONGARRA ET AL., 2003, sourcebook of parallel computing, First edition, D. Penrose, Ed., Morgan Kaufmann Publishers – Elsevier;
- [68] SPALDING, D. B., 1983, "Development in the IPSA procedure for numerical computation of multiphase flow phenomena with interphase slip, unequal temperatures", In: S. T. M. (Ed.), Second National Symposium in Numerical Methodologies in Heat Transfer (pp. 421-436), New York;
- [69] SPALDING, D. B., 1980, "Numerical computation of multi-phase fluid flow and heat transfer", C. T. Morgan, Ed., Recent advances in numerical methods in fluid , 1, pp. 139-167;
- [70] HARLOW, F. M., & AMSDE, A. A., 1975, "Numerical calculations of multiphase flow", Journal of Computational Physics, 17, 19-52;
- [71] STEWART, H. B., 1979, "Stability of two-phase flow calculations using two-fluid model", Journal of Computational Physics, 3, 259-270;
- [72] MAHAFFY, J. T., 1982, "A stability-enhancing two-step method for fluid flow calculations", Journal of Computational Physics, 46, 329-341;
- [73] DARWISH, M., & MOUKALLED, F., 2001, "A unified formulation of the segregated class of algorithms for multifluid flow at all speeds", Numerical Heat Transfer, 40 (Part B), 99-137;
- [74] ISSA, R. I., & KEMPF, M. 2003, "Simulation of slug flow in horizontal ands nearly horizontal pipes with two fluid model", International Journal of Multiphase Flow , 29, 69-95;
- [75] ROMATE, J. E., 2000, "Developing a second-order TVD scheme for one-dimensional two-phase flow model", In: AMIF-ESF Workshop - Computing methods for two phase flow. Aussois, France;

- [76] HIRSCH, C., 1990, Numerical computation of internal and external flows: fundamentals of numerical discretization (Vol. 2), John Wiley & Sons, New York;
- [77] FLETCHER, C. A., 1988, Computational techniques for fluid dynamics: Specific techniques for flow categories (Vol. 2). Springer Verlag;
- [78] HIRSCH, C., 2007, Numerical Computations of Internal & External Flows: Volume 1 - Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Second Ed. New York, Elsevier;
- [79] HOLMAS, H., 2010, "Numerical simulation of transient roll-waves in two-phase pipe flow", Chemical Engineering Science, 65, 1811-1825;
- [80] LEVEQUE, R. J., 1990, Numerical Methods for Conservation Laws. Birkhäuser;
- [81] TORO, E. F., 1997, Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. Springer Verlag;
- [82] LANEY, G. B., 1998, Computational Gas Dynamics. Second Edition. Cambridge University Press;
- [83] BORIS, J. P., & BOOK, D. L., 1973, "Flux correct transport I - SHASTA - A fluid transport algorithm that works", Jornal of Computational Physics, 11, 38-69;
- [84] BORIS, J. P., & BOOK, D. L., 1976, "Solution of continuity equation by the method of flux-corrected transport", Journal of Computational Physics, 129, 85-129;
- [85] BOOK, D. L., BORIS, J. P., & HAIN, K., 1975, "Flux-corrected transport II. - Generalizations of the method", Journal of Computational Physics, 18, 248-283;
- [86] VAN LEER, B., 1979, "Towards the ultimate conservation difference scheme V, a second order Sequel to Godunov's method", Journal of Computational Physics, 32, 101-136;
- [87] WENDT, J. F., 1996, Computational Fluid Dynamics: An Introduction. Second Ed., Springer;
- [88] COQUEL, F. ET AL., 1997, "A numerical method using upwind schemes for resolution of two phase flows", Journal of computational physics, 136, 272-288;
- [89] BARMIN, A. A., KULIKOVSKI, A. G., & POGORELOV, N. V., 1996, "Shock-capturing approach and nonevolutionary solutions in magneto hydrodynamics", Journal of Computational Physics, 126, 77-90;
- [90] TÓTH, G. & ODRZCIL, D., 1996, "Comparison of some flux corrected transport and total variation diminishing numerical schemes for hydrodynamic and magneto-hydrodynamic problems", Journal of Computational Physics, 128, 82-100;
- [91] COURANT, R., FRIEDRICHS, K., & AND LEWY, H., 1967, "On the partial difference equations of mathematical physics", IBM Journal , 11, 215-234;

- [92] MAHGEREFTEH, H., RYKOV, Y., & DENTONA, G., 2009, "Courant, Friedrichs and Lewy (CFL) impact on numerical convergence of highly transient flow", Chemical Engineering Science , 64, 4969-4975;
- [93] BAPTISTA, R. M., 2007, "On the estimation of dual phase gas pipeline leakage flow rate from the leak diameter", In: Proceedings of the Rio Pipeline Conference and Exposition, IBP-1238-07, Rio de Janeiro, RJ;
- [94] TRAC-PF1, February, 1984. An advanced best estimation computer program for pressurized water reactor analysis. In: Report LA-9944-MS, NUREG./3567, Los Alamos Scientific Laboratory, Project Report;
- [95] SHIEH A. S., RANSOM V. H., & KRISHNAMURTHY R., 1994, Code manual volume 6: Validation of numerical techniques in RELAPS5/MOD3. In Report NUREG/CR-5535, EGG-2596, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID;
- [96] MICAELLI, J. C., 1988, Document de Synthèse CATHARE. Report SETH/LEML-EM/88-129, Grenoble, CEDEX;
- [97] SPT Group. Disponível em <http://www.sptgroup.com>. Acesso em 15 mar 2010, 15:10:05;
- [98] SINTEF Group. Disponível em <http://www.sintef.no>. Acesso em 12 jun 2010, 15:11:30;
- [99] MARICATO, A. L. G., 23 de outubro de 2007. E-mail: "composição e tabela PVT de fluido de poço típico de campos de gasodutos bifásico de campo nacional", enviado a renan.baptista@petrobras.com.br, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- [100] CALSEP INC. Simulador numérico PVTsim versão 19. Disponível em <http://www.pvtsim.com>. Acesso em 2 dez 2008, 20:02:10;
- [101] PENELOUX, A., & RAUZY, E., 1982, "A consistent correction for Redlich Kwong Soave Volumes", Fluid Phase Equilibria, 8, 7-23;
- [102] MOODY, L. F., 1944, "Friction factors for pipe flow", Transactions of the ASME, 66;
- [103] ANDREUSSI, P., & PERSEN, L. N., 1987, "Stratified gas-liquid flow in downwardly inclined pipes", International Journal of Multiphase Flow, 13, 565-575;
- [104] MOHITPOUR, M., GOLSHAM, H., & MURRAY, A., 2003, Pipeline design & construction - A practical approach, First Edition, Calgary, ASME Press;
- [105] MOHITPOUR, M., 2008, Energy supply and pipeline transportation – challenges and opportunities, (First ed.), Calgary, ASME Press;
- [106] IBP, WikiDutos. Acesso em 2 de Janeiro de 2010, disponível em Wikidutos: <<http://www.wikidutos.com.br>>;

- [107] INMETRO, 2007, Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, INMETRO. Rio de Janeiro;
- [108] OPC Foundation. Acesso em 2 de janeiro de 2010, disponível em: <<http://www.opcfoundation.org>>;
- [109] GAO J., LEWIS C. AND RISWAN T., "Data smoothing for leak detection", In: Proceedings of 9th International Pipeline Conference, Calgary, 2012;
- [110] SAVITZKY A. & GOLAY M. J. E., Analytical Chemistry, vol 38, pp 1627-1639, 1964;
- [111] MODISETTE, J. P., 2004, "Automatic tuning of pipeline models", In: proceedings of the Pipeline Software Interest Group - PSIG Annual Meeting. Palm Springs, CA;
- [112] MODISETTE, J. P., 2009, "State estimation in online models", In proceedings of the Pipeline Software Interest Group, PSIG - Annual Meeting. Gavelston, TX: PSIG;
- [113] HASAN, A. R., KABIR, C. S., & SAYARPOUR, M., 2010, "Simplified two-phase flow modeling in wellbores", Journal of Petroleum Science and Engineering, 72, 42-49;
- [114] DUKHOVNAYA, Y., & ADEWUMI, M., 2000, "Simulation of non-isothermal transients in gas & condensate pipelines using TVD scheme", Powder Technology, 112, 163-171;
- [115] HERRÁNA, A., DE LA CRUZ, J. M., & ANDRÉS, B., 2010, "A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system", Computers and Chemical Engineering , 34, 401-413;
- [116] BOSCHETTO, S. N., FELIZARI, L. C., YAMAMOTO, L., MAGATÃO, L., STEBEL, S. L. & NEVES-JR, F., 2008, "An integrated framework for operational scheduling of a real-world pipeline network", In: 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 18.
- [117] REJOWSKI JR., R., & PINTO, J. M., 2008, "A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints", Computers and Chemical Engineering, 32, 1042-1066;
- [118] RELVAS, S., MATOS, H., BARBOSA-PÓVOA, A. P., & FIALHO, J., 2008, "Oil products pipeline scheduling with tank farm inventory management", Computer Aided Process Engineering , 277-282;
- [119] RACHID, F. B., BAPTISTA, R. M., & ARAUJO, J. H., 2002, "A note about the sensitivity curve of compensated volume balance leak detection systems", In: Proceedings of the 4th International Pipeline Conference, Calgary;
- [120] RACHID, F. B., BAPTISTA, R. M., & ARAUJO, J. H., 2002, "Predicting mixing volumes in serial transport in pipelines", ASME, Ed., Journal of Fluids Engineering , 124, 528-534;

- [121] BAPTISTA, R. M., RACHID, F. B., & ARAUJO, J. H., 2000, "Estimating mixing volumes between batches in multiproducts pipelines", In: Proceedings of the 3rd International Pipeline Conference, Calgary;
- [122] ESMAEILZADEH, F., MOWLA, D., & ASEMANI, M., 2009, "Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines", Journal of Petroleum Science and Engineering , 69, 100-106;
- [123] HYLLSETH, M., CAMERON, D., & HAVRE, K., 2003, "Operator training and operator support using multiphase pipeline models and dynamic process simulation: sub-sea production and on-shore processing", Computer Aided Chemical Engineering, 425-430;
- [124] XU, X.-X., & GONG, J., 2005, "Pigging simulation for horizontal gas-condensate pipelines with low-liquid loading", Journal of Petroleum Science and Engineering, 48, 272-280;
- [125] UJANG, P., LAWRENCE, C. J., HALE, C. P., & HEWITT, G., 2006, "Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow", International Journal of Multiphase Flow, 32, 527-552.
- [126] MAZZA, R. A., ROSA, E. S., & YOSHIZAWA, C. J., 2010, "Analyses of liquid film models applied to horizontal and near horizontal gas-liquid slug flows", Chemical Engineering Science , 65, 3876-3892;
- [127] WANG, X., GUO, L., & ZHANG, X., 2006, "Development of liquid slug length in gas-liquid slug flow along horizontal pipeline: experiment and simulation", Chinese J. Chem. Eng. , 14 (5), 626-633;
- [128] KLERNPOUS, R., KOTOWSKI, J., NIKODEM, J., & ULASIEWICZ, J., 1997, "Optimization algorithms of operative control in water distribution systems", Journal of Computational and Applied Mathematics , 84, 81-99;
- [129] API, 1998, Results of range-finding testing of leak detection technologies for underground pipelines, Publication # 346, American Petroleum Institute, Washington;
- [130] PHMSA, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration - PHMSA, US Department of Transportation. Disponivel em: <http://www.phmsa.dot.gov>, acesso em 10 out. 2012, 14:00 h;
- [131] EGIG, European Gas Pipeline Incident Data Group. Disponivel em: <http://www.egig.eu>, acesso em 12 out. 2012, 09:43 h;
- [132] API, 1995, Evaluation methodology for software based leak detection systems, Publication # 1155. American Petroleum Institute, Washington;
- [133] EPA 530/UST-90/010, 1990, Standard test procedures for evaluating leak detection methods: pipeline leak detection systems, United States Environmental Protection Agency. Grain Valley, MO: Ken Wilcox Associates;
- [134] API, 2001, Managing system integrity for hazardous liquid pipelines, Publication Number 1160, American Petroleum Institute. Washington;

- [135] SMITH, J. M., & VAN NESS, H. C., 2001, Introduction to chemical engineering thermodynamics, Sixth ed., MacGraw Hill;
- [136] Energy Solutions International Inc., 2009, Pipeline Studio, TGNET transient numerical flow simulator, Version 3.2, Houston;
- [137] KATZ, D. L., & LEE, R. L., 1990, Natural gas engineering - production and storage. First Edition, Mac Graw Hill Publishing Company, Houston;
- [138] KATZ, D. L., 1959, Handbook of gas engineering. Gulf Publishing Company, Houston;
- [139] KIEFNER & ASSOCIATES INC., Leak detection study – DTPH56-11-D-000001, hired by the US DOT, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, September, 28th, 2012;
- [140] 49 Code of Federal Regulations, Part 195, Transport of hazardous liquids by pipeline, December, 27th. 2001, Washington;
- [141] REED, M., EMILSEN, M. H., HETLAND, B., JOHANSENA, Ø., BUFFINGTON, S., HØVERSTAD, B., ET AL., 2006. "Numerical model for estimation of pipeline oil spill volumes". Environmental Modelling & Software , 21, 178-189;
- [142] SHELL GLOBAL SOLUTIONS INTERNATIONAL, September 2002, Manual - pipeline leak detection, design & engineering practice, Report Number DEP 31.40.60.11-Gen, London;
- [143] COLOMBO, A. F., LEE, P., & KARNEY, B. W., 2009, "A selective literature review of transient-based leak detection methods". Journal of Hydro-environment Research, vol. 2, pp. 212-227;
- [144] SEDOV, I., 2000, Similarity and dimensional methods in mechanics, 10th Ed. Moscow, C. Press, Ed., & A. G. Volkovets, Trad., CRC Press;
- [145] API, 2002, Buried pressurized piping systems leak detection guide, Publication # 4716. American Petroleum Institute, Washington;
- [146] PHMSA, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. Disponível em: <http://www.phmsa.gov>. Acesso em 12 mai 2011, 11:43.
- [147] PRCI, Pipeline Research Council International. Disponível em <http://www.prci.org>. Acesso em 23 nov 2012, 21:02:30;
- [148] SWRI, SouthWest Research Institute. Disponível em <http://www.swri.org>. Acesso em 20 jan 2013, 14:04:30;
- [149] BAPTISTA, R. M., 2000. "Leak detection for short pipelines". In Proceedings of the 3rd International Pipeline Conference. ASME, Calgary;
- [150] LIOU, C. P. & TIAN J., 1995, "Leak detection transient flow simulation approaches". Journal of Energy Resources Technology, ASME 117 243, 248;

- [151] GAIGER, G., 2006. "State of the art in leak detection and localization". In: Proceedings of the European Pipeline Technology Conference, University of Applied Science, Gelsenkirchen, CODEN EEKOEY;
- [152] ABHULIMEN, K. E., & SUSU, A. A., 2004, "Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation", Chemical Engineering Journal, 97, 47–67;
- [153] ABHULIMEN, K. E., & SUSU, A. A., 2007, "Modelling complex pipeline network leak detection systems", Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection , 85 (B6), 579–598;
- [154] DIBLASI, M. E., & MURAVCHIK, C., 2006, "Leak detection in a pipeline using modified line volume balance and sequential probability tests". In: Proceedings of the 6th International Pipeline Conference, ASME, Calgary;
- [155] TU, Y., QIU, D., & ZHANG, D. 2003, "A revised statistical deduction approach to pipeline leak detection", 20th IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference. 2, pp. 1639-1642, IEEE, Chongqing, China;
- [156] Wald, A., 1948, "Sequential Tests of Statistical Hypothesis", Ann. of Mathematics & Statistics, 19, 326-339;
- [157] LAURENTYS, C., BOMFIM, C., MENEZES, B., & CAMINHAS, W., 2010, "Design of a pipeline leakage detection using expert system: a novel approach", Appl. Software Computational Journal, doi:10.1016/j.asoc.2010.02.005, 820, 10.
- [158] LIANG, W., ZHANG, L., & YE, Y., 2009. "Data mining technology based leak detection method for crude oil pipeline", World Congress on Computer Science and Information Engineering, IEEE, pp. 656-660;
- [159] ZHANG, L., QIN, X., WANG, Z., & LIANG, W., 2009, "Designing a reliable leak detection system for West Products Pipeline", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22, 981-989;
- [160] ZHANG, S., GAO, T., XU, H., HAO, G., & WANG, Z., 2009, "Study on new methods of improving the accuracy of leak detection and location of natural gas pipeline", In: proceedings of the International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, pp. 360-363;
- [161] ZHOU, Z., HU, C., YANG, J., XU, D., & ZHOU, D., 2009, "Online updating belief rule based system for pipeline leak detection under expert intervention", Expert Systems with Applications, 36, 7700-7709;
- [162] XU, D., LIU, J., YANG, J., LIU, G., WANG, J., JERKINSON, I., ET AL., 2007, "Inference and learning methodology of belief-rule-based expert system for pipeline leak detection", Expert Systems with Applications, 32, 103-113;
- [163] SILVA, H., MOROOKA, C., GUILHERME, I., FONSECA, T., & MENDES, J. , 2005, "Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system", Journal of Petroleum Science and Engineering , 49, 223-238;

- [164] TANAND, K., KARNEY, B., PENDLEBURY, M., & ZHANG, F., 1999, "Inverse transient calibration of water distribution system using genetic algorithms", Computing and Control of the Water Industry. Exeter, UK;
- [165] GEIGER, G., GREGORITZA, W., & MATKO, D., 2000, "Leak detection and localisation in pipes and pipelines", Computer Aided Process Engineering, 10, 781-786;
- [166] BILLMANN, L., & ISERMANN, R., 1987, "Leak detection methods for pipelines", Automatica, 3, 381-385;
- [167] VAZ-JR., C. A., MEDEIROS, J. L., & ARAÚJO, O. Q., 2010, "ARX modelling approach to leak detection and diagnosis", Journal of Loss Prevention in the Process Industries , 23, 462-475;
- [168] FARMER, E., 2008, "If you can see, you can detect it". In: Proceedings of the 7th International Pipeline Conference, ASME, Calgary;
- [169] FARMER, E., 1996, "Pressure point analysis, leak detection methodology, performance & application". In: Proceedings of the 25th Technical Meeting on Process and Operations;
- [170] LI Y. ET AL., 2008, "Pipeline leak detection based on acoustic emission using empirical mode decomposition method". In: Proceedings of the 7th International Pipeline Conference, ASME, Calgary;
- [171] XU B. ET AL., 2008, "Leak detection method for long pipeline based on dynamic pressure and Wavelet analysis". In: Proceedings of the 7th International Pipeline Conference. ASME, Calgary;
- [172] TANIMOLA, F., & HILL, D., 2009, "Distributed fibre optic sensors for pipeline protection", Journal of Natural Gas Science and Engineering, 1, 134-143;
- [173] STRONG A. ET AL., 2008, "A comprehensive distributed pipeline condition monitoring system and it's field trial". In: Proceedings of the 7th International Pipeline Conference. ASME, Calgary;
- [174] QU, Z., FENG, H., ZENG, Z., ZHUGE, J., & JIN, S, 2010, "A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system", Measurement, 43, 513-519;
- [175] CARRILLO, A., GONZALEZ, E., ROSAS, A., & MARQUEZ, A., 2002, "New distributed optical sensor for detection and localization of liquid leaks Part I. Experimental studies", Sensors and Actuators , A 99, 229-235;
- [176] LOPEZ, R. M., SPIRINA, V. V., MIRIDONOVA, S. V., SHLYAGINA, M. G., BELTRAN, G., & KUZIN, E. A., 2002, "Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission/reflection measurement", Optics & Laser Technology, 34, pp 465 – 469, 34, 465-469;
- [177] INAUDI D. ET AL., 2008, "Detection and localization of micro-leakages using distributed fiber optic sensing". In: Proceedings of the 7th International Pipeline Conference. ASME, Calgary;

- [178] RAVET, F., BRIFFORD, F., & NICKLES, M., 2008, "Extended distance fiber optic monitoring for pipeline leak and ground movement detection". In: Proceedings of the 7th International Pipeline Conference, ASME, Calgary;
- [179] JAX, P., 2001, "LEOS Pipeline Leak Monitoring", ANP-Framatome, Erlangen, Germany;
- [180] KNOBLACH, W. & BRICE P., 2012, "Detection of trace hydrocarbons and toxic components in the environment". In: Proceedings of the 9th International Pipeline Conference, ASME, Calgary;
- [181] RayChem, 2001. TTDM Plus Trace Tek leak detection master module. Ray Chem brochure;
- [182] Tyko Thermal, 2002. Leak Detection for Buried Pipelines. Austin, TX: Tyko Thermal;
- [183] ATKINSON, K, "Introduction to numerical analysis", 2nd Edition, Wiley & Sons, 2008;
- [184] STOUFFS, P., & GIOT, M., 1993, "Pipeline leak detection based on mass balance: importance of the packing term", Journal of Loss Prevention in Process Industries, 6 (5);
- [185] FUKUSHIMA, K., MAESHIMA, R., KINOSHITA, A., SHIRAISHI, H., & KOSHIJIMA, I., 2000, "Gas pipeline leak detection system using the online simulation method", Computers and Chemical Engineering, Vol. 24, pp 453-456;
- [186] KAM, S. I., 2010, "Mechanistic modeling of pipeline leak detection at fixed inlet rate", Journal of Petroleum Science and Engineering , 70, 145-156;
- [187] AL-KHOMAIRI, A. M., 1995. Improving leak detectability in long liquid pipelines. Ph.D. dissertation, Colorado State University, Denver, Colorado, USA;
- [188] TURNER, W. J., 1988, "Better leak detection in gas pipelines", Computer Math. Applic., 15 (1), 69-75;
- [189] DIBLASI, M., 2004, Detección y localización de fugas em sistemas de transporte de fluidos incompresibles por conductos. Tesis de magíster em ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Departamento de Eletrotecnia. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, Argentina;
- [190] WALD, A., & WOLFOWITZ, J., 1948, "Optimum Character of Sequential Probability Ratio Tests", Ann. of Mathematics and Statistics, 19, 117-186;
- [191] PAPOULIS, A., Probability, random variables and stochastic processes, Mc Graw Hill, 1991;
- [192] PEREZ, L., & PLIEGO, F., Estadística II: Inferencia, 2^a Ed., Alfa Centuario, Madrid, 2001;
- [193] MARKOWSKI, C., & MARKOWSKI, E. (1990), "Conditions for the effectiveness of a preliminary test variance" The American Statistician, 44 (4), 322-326;

- [194] GAO, Y., BRENNAN, M. J., & JOSEPH, P. F., 2006, "A comparison of time delay estimators for the detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes", Journal of Sound and Vibration, 292, 552-570;
- [195] AHADI, M., & BAKHTIAR, M., 2010, "Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals", Applied Acoustics, 71, 634-639;
- [196] DOT/OPS, 2007, "Transmission summary, incident by cause, natural gas pipeline, from 1/1/2006 to 12/31/2006". Office of Pipeline Safety, US Department of Transportation, Washington, USA;
- [197] FUCHS, H. V., & RIEHLE, R., 1991, "Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis", Applied Acoustics, vol. 33, pp 1-19;
- [198] BAGHDADI, A., & MANSY, H., 1988, "A mathematical model for leak location in pipelines", Applied Mathematical Modelling, vol. 12, pp 25-30;
- [199] WATANABE, K., KOYAMA, H., TANOGUCHI, H., OHMA, T., & HIMMELBLAU, D., 1993, "Location of pinholes in a pipeline", Computers Chemical Engineering, vol. 17 (1), pp 61-70;
- [200] SOUSA, E., CRUZ, S., & PEREIRA, J., 2009, "Monitoring pipelines through acoustic method", Process System Engineering, 1509-1514;
- [201] KIM, M., & LEE, S., 2009, "Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time-frequency analysis", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol 22, pp 990-994;
- [202] FERRANTE, M., & BRUNONE, B., 2003-A, "Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1. Harmonic analysis", Advances in Water Resources, Vol. 26, pp 95-105;
- [203] FERRANTE, M., & BRUNONE, B., 2003-B, "Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 2. Wavelet analysis", Advances in Water Resources, Vol. 26, pp 107-116;
- [204] GE, C., YANG, H., YE, H., & WANG, G., 2009, "A fast leak locating method based on Wavelet transform", Tsinghua Science and Technology, Vol. 14 (5), pp 551-555;
- [205] CHUANHU, G., GUIZENG, W., & HAO, Y., 2008, "Analysis of the smallest detectable leakage flow rate of negative pressure wave-based leak detection systems for liquid pipelines", Computers and Chemical Engineering, Vol. 32, 1669-1680;
- [206] WICHMANN, B. A. & HILL, I. D., 1982, "An efficient and portable pseudo random number generator", Applied Statistics, Vol. 31, Number 2, pp 188-190;
- [207] BOX, G. E. P & MULLER M. E., 1958, "A note on the generation of random normal deviates", Annals of Mathematical Statistics, Vol. 29, No. 2 pp. 610-611;
- [208] Sítio para geração de números aleatórios RANDOM.ORG. Disponível em <http://www.random.org>, visitado em 14 nov 2011, 11:34:45;

[209] E-Commerce and Online Gaming Regulation and Assurance, London.
Disponível em <http://www.ecogra.org>, visitado em 15 jan 2012, 08:35:10.

Anexo I – Gráficos para o segmento PL, regime permanente

Furo 0,5 in, próximo à entrada:

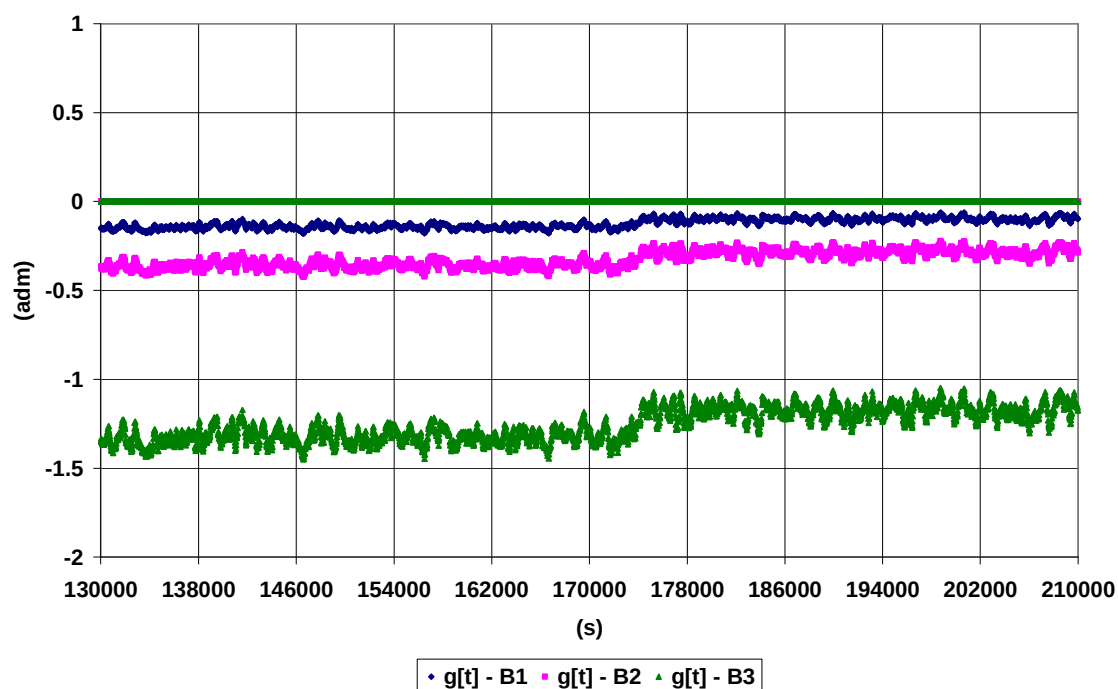


Figura I.1 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

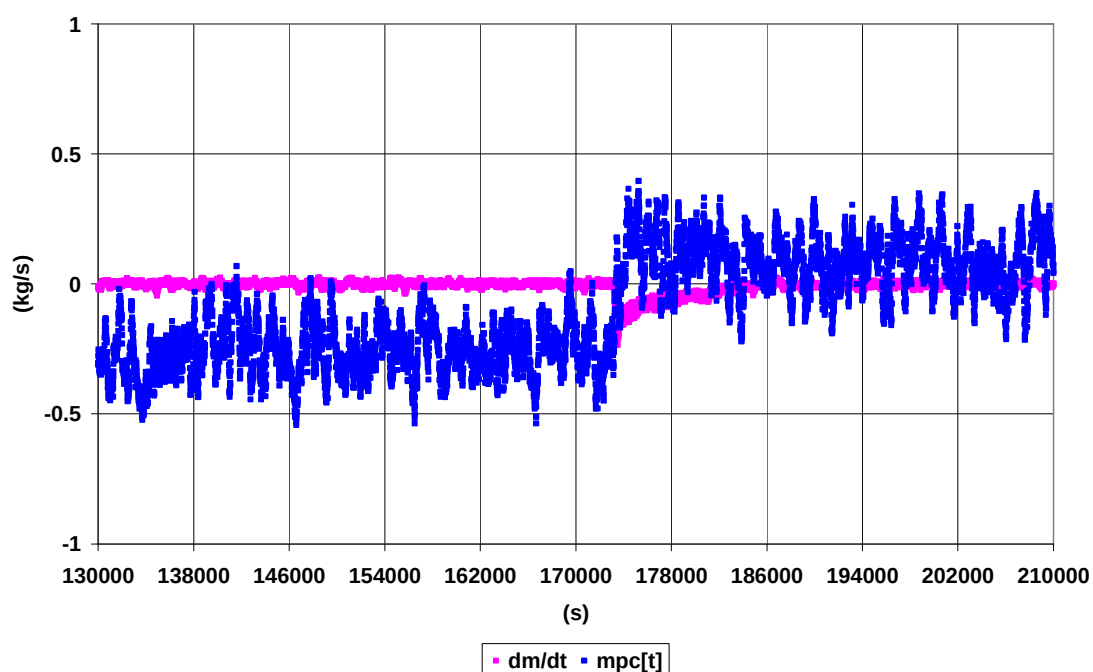


Figura I.2 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times \frac{dm_{total}}{dt}$

Furo 2,0 in, próximo à entrada:

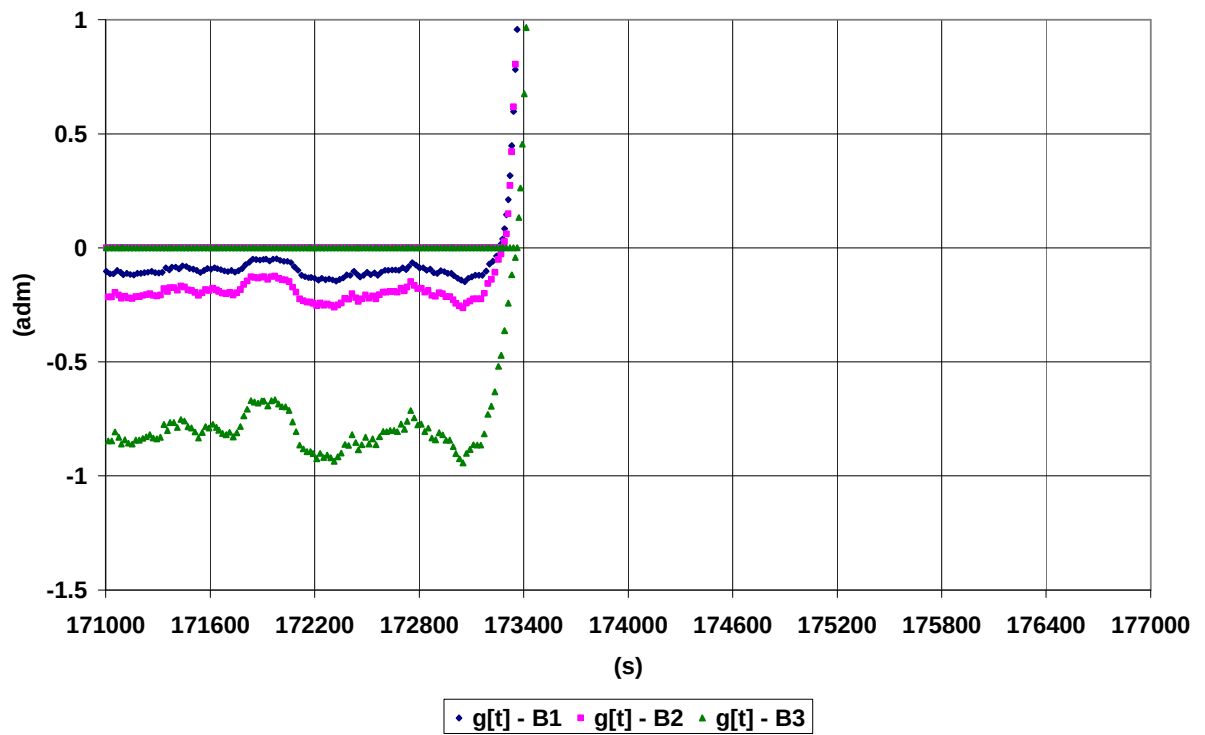


Figura I.3 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

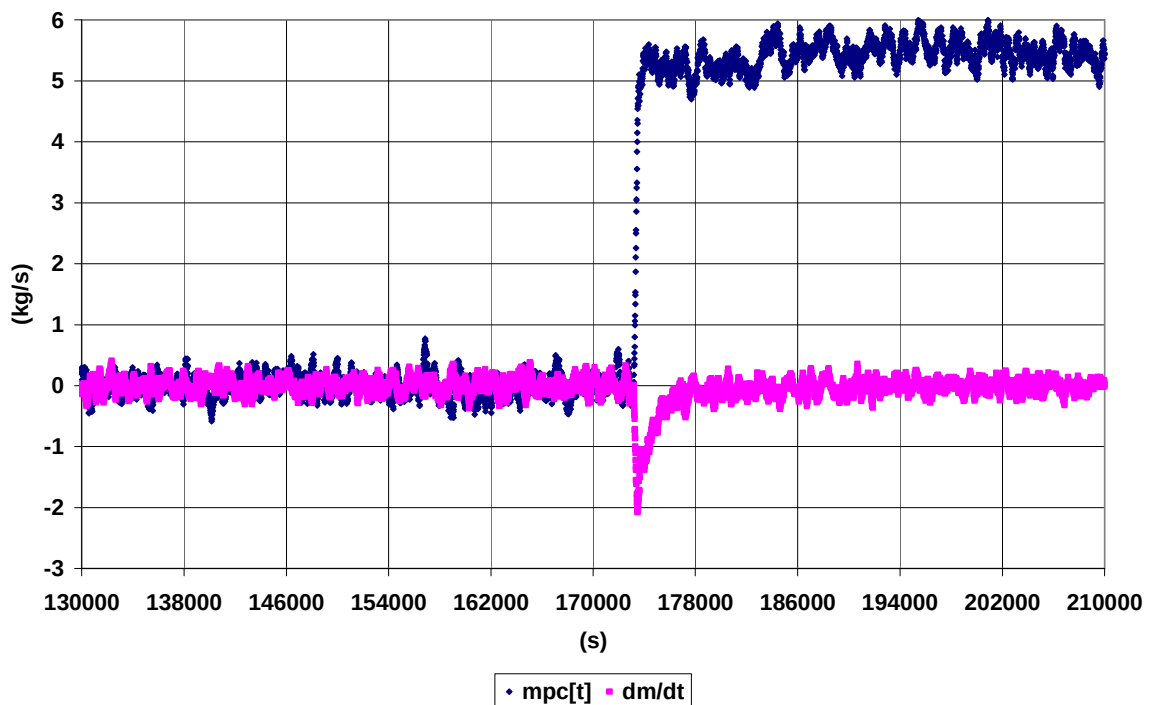


Figura I.4 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 3,0 in, próximo à entrada:

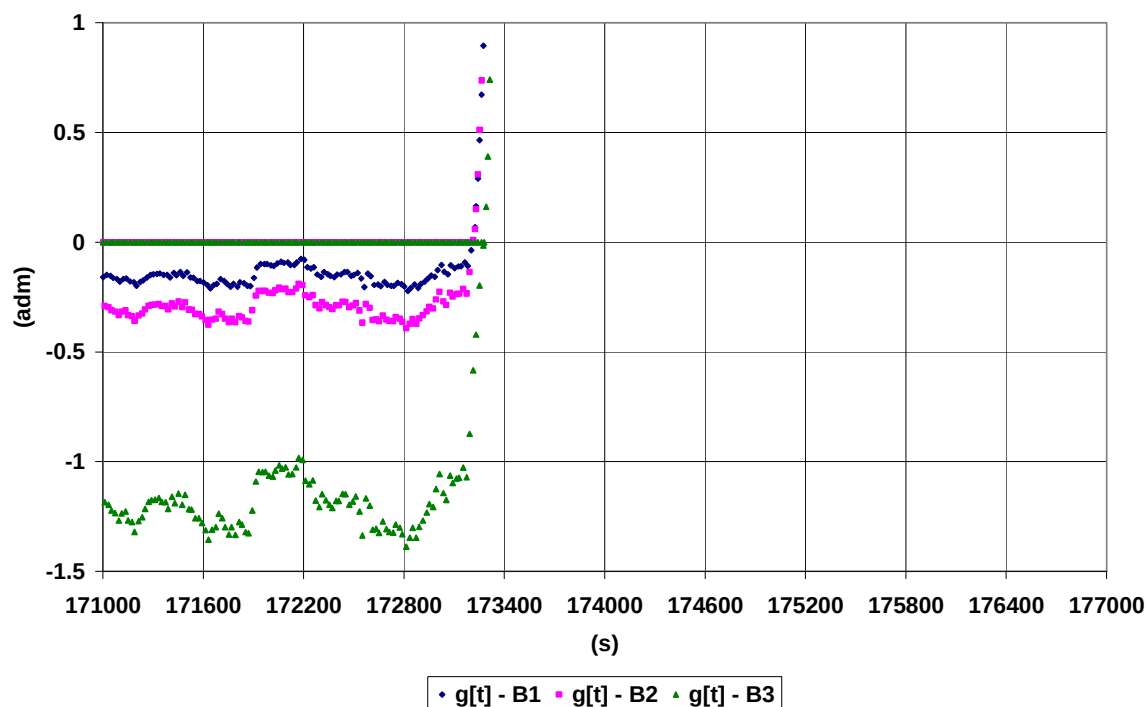


Figura I.5 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

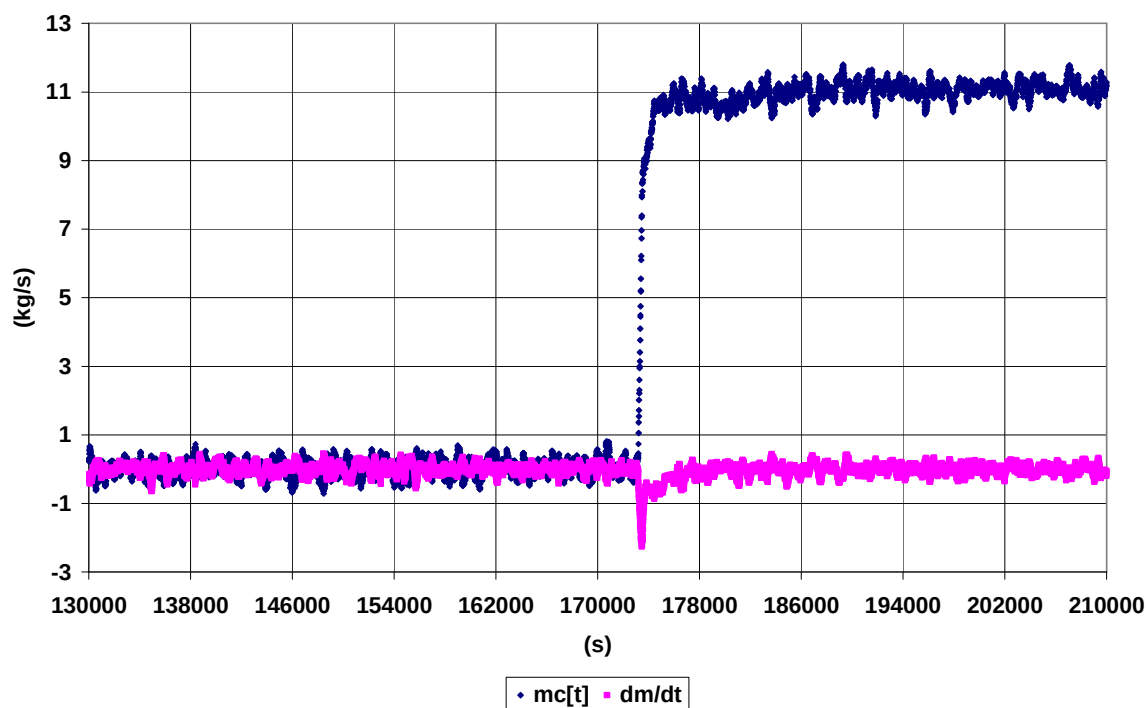


Figura I.6 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,5 in, próximo ao meio:

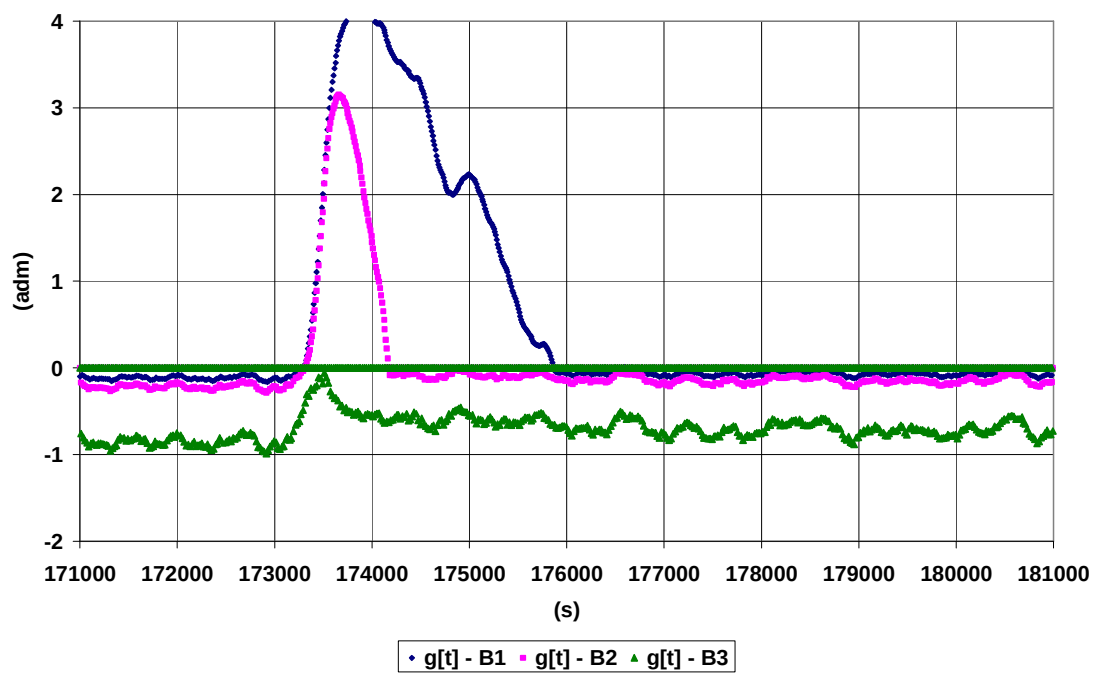


Figura I.7 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

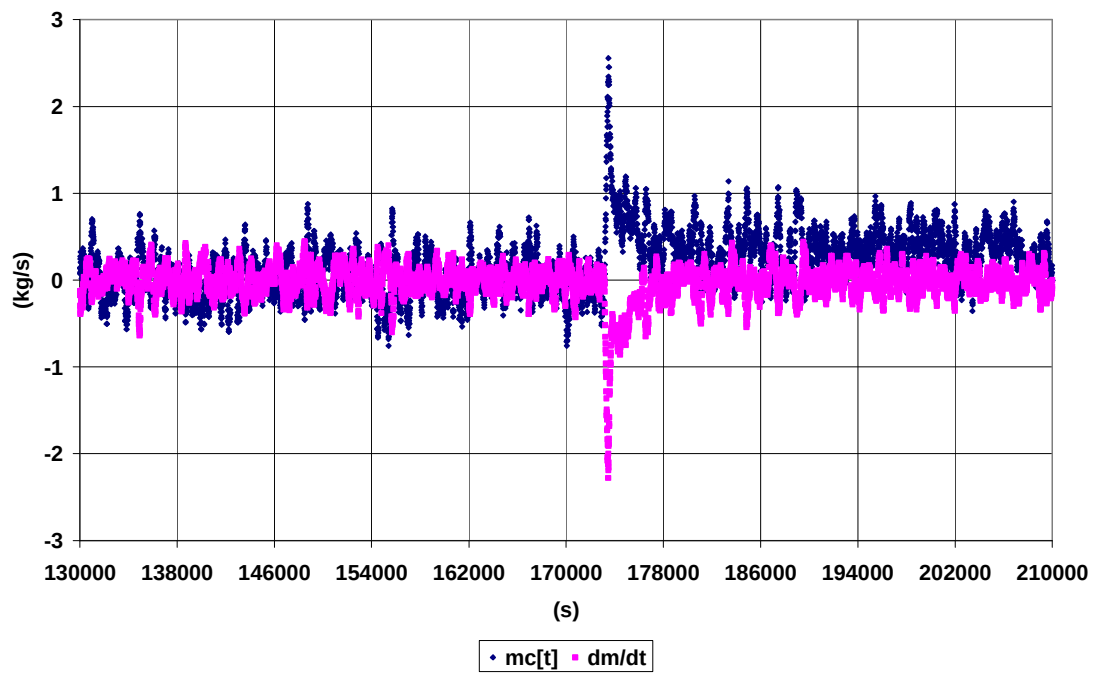


Figura I.8 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo ao meio:

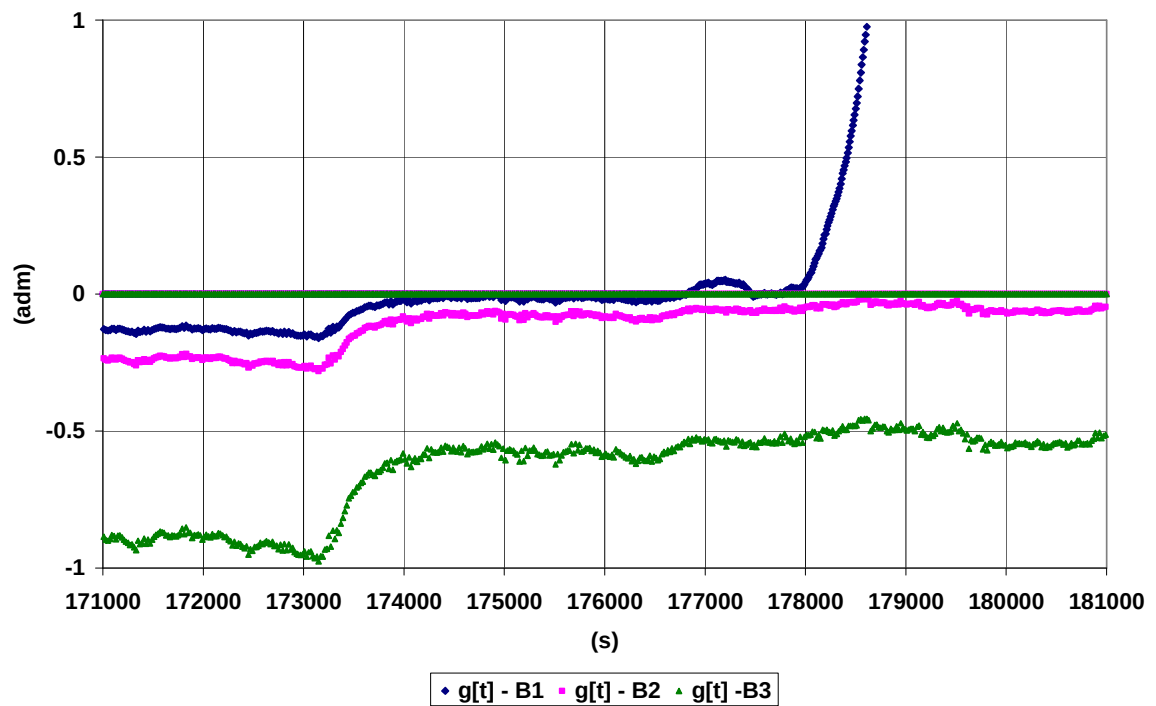


Figura I.9 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

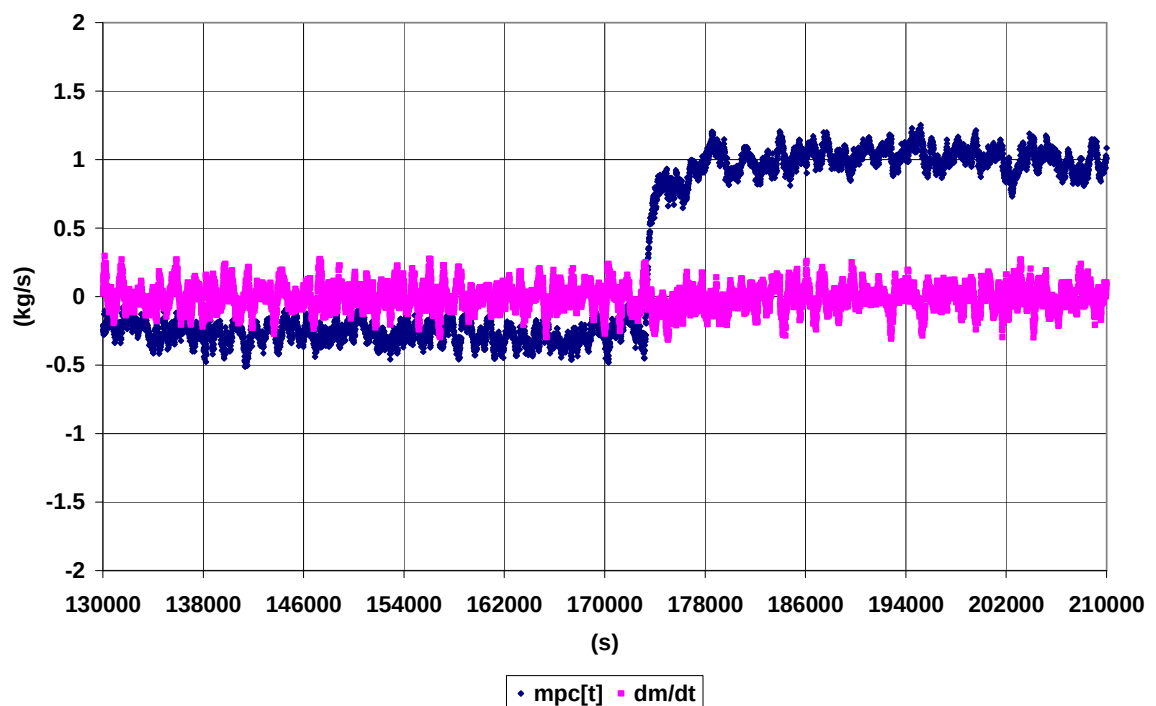


Figura I.10 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 2,0 in, próximo ao meio:

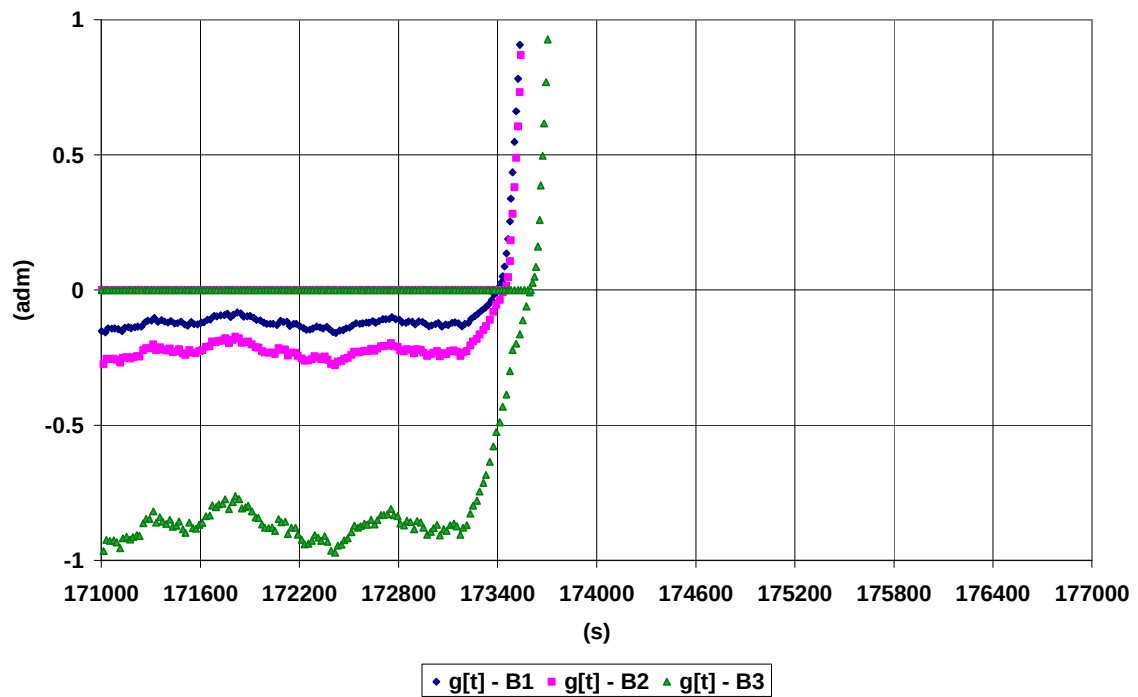


Figura I.11 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

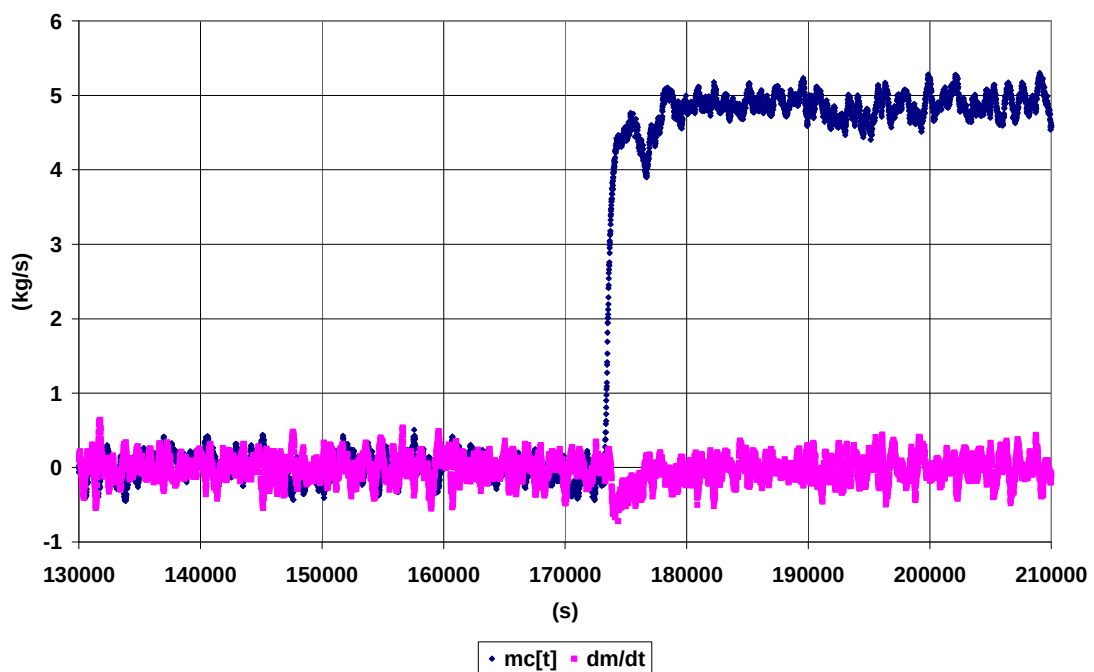


Figura I.12 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 3,0 in, próximo ao meio:

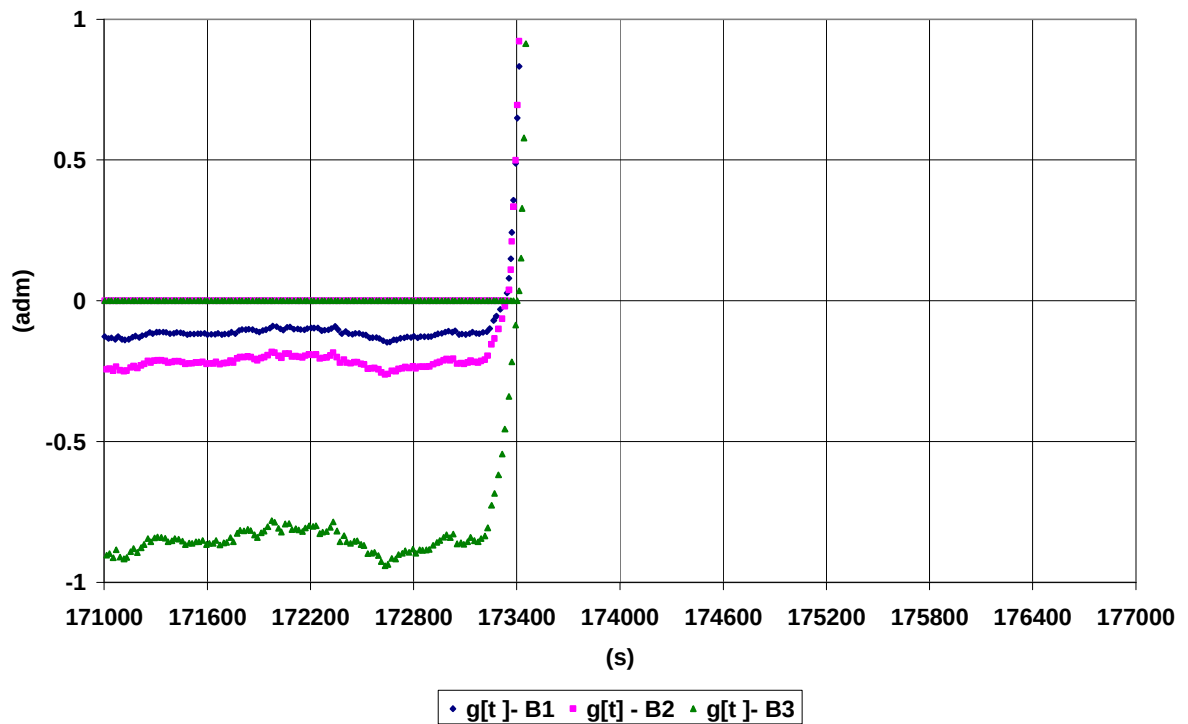


Figura I.13 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

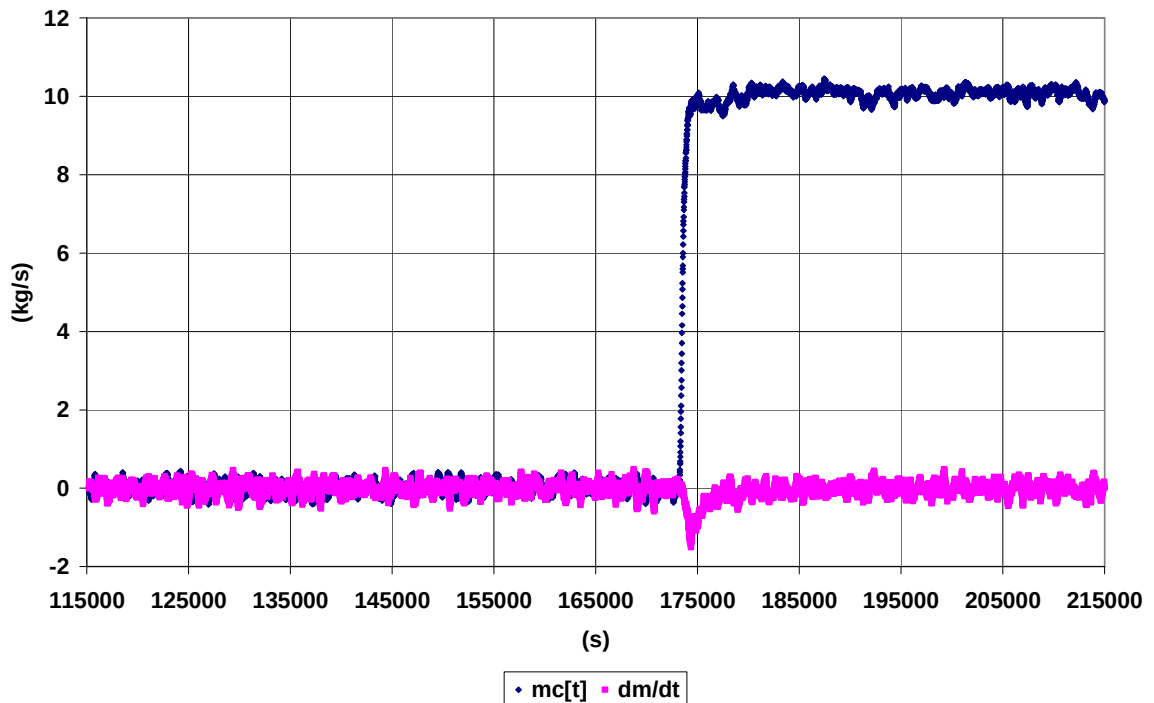


Figura I.14 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,5 in, próximo à saída:

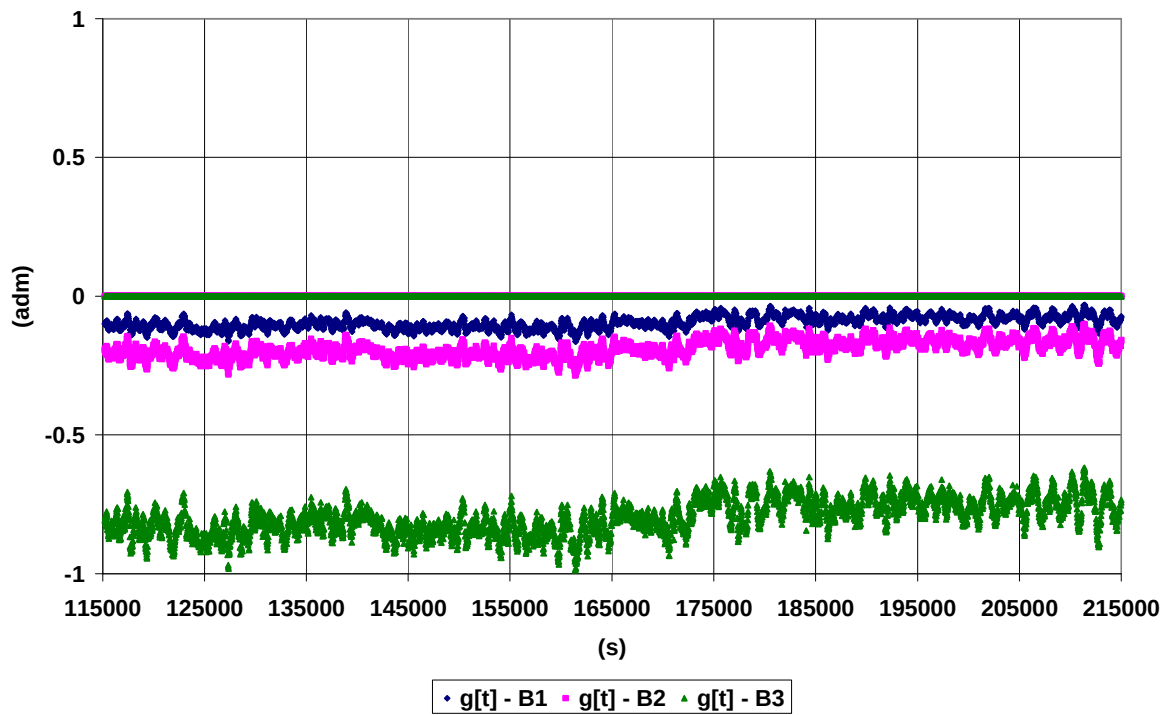


Figura I.15 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

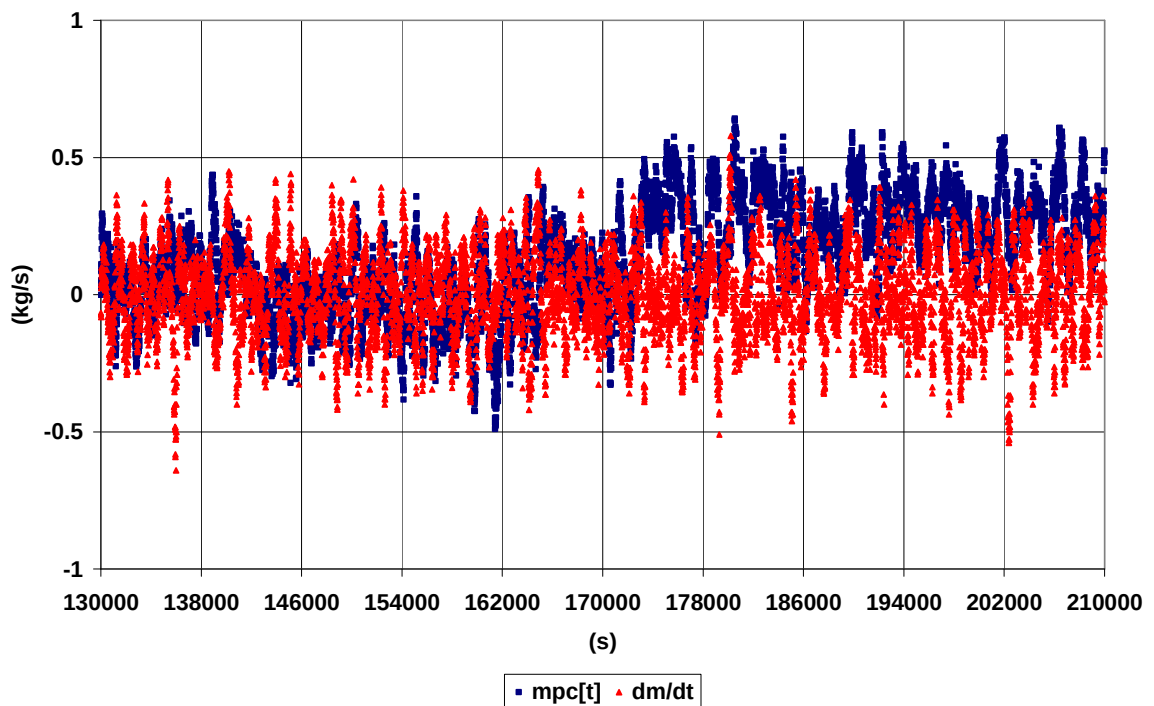


Figura I.16 – Segmento PL, furo de 0,50 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo à saída:

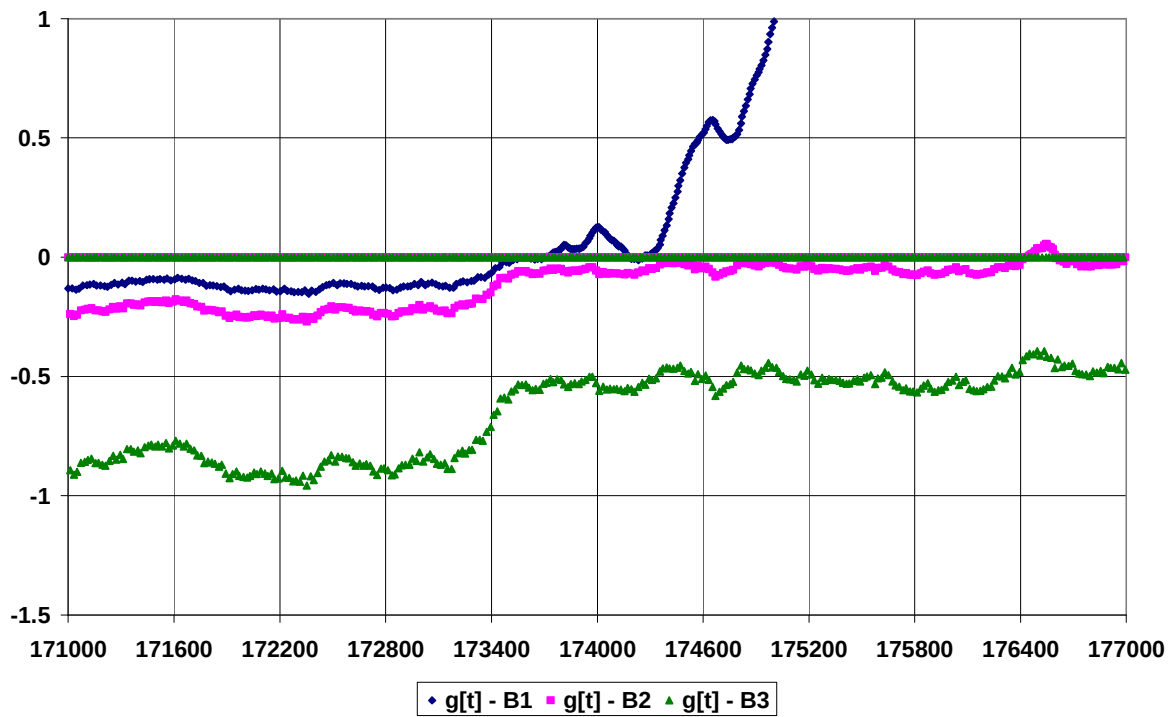


Figura I.17 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

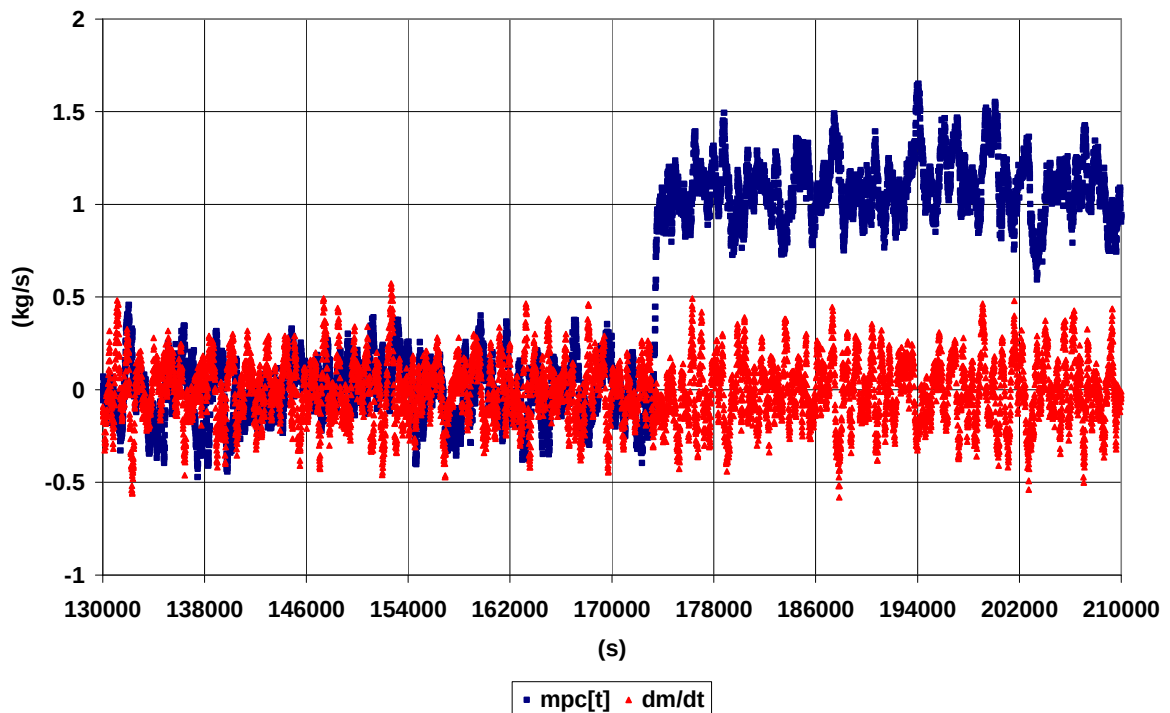


Figura I.18 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 2,0 in, próximo à saída:

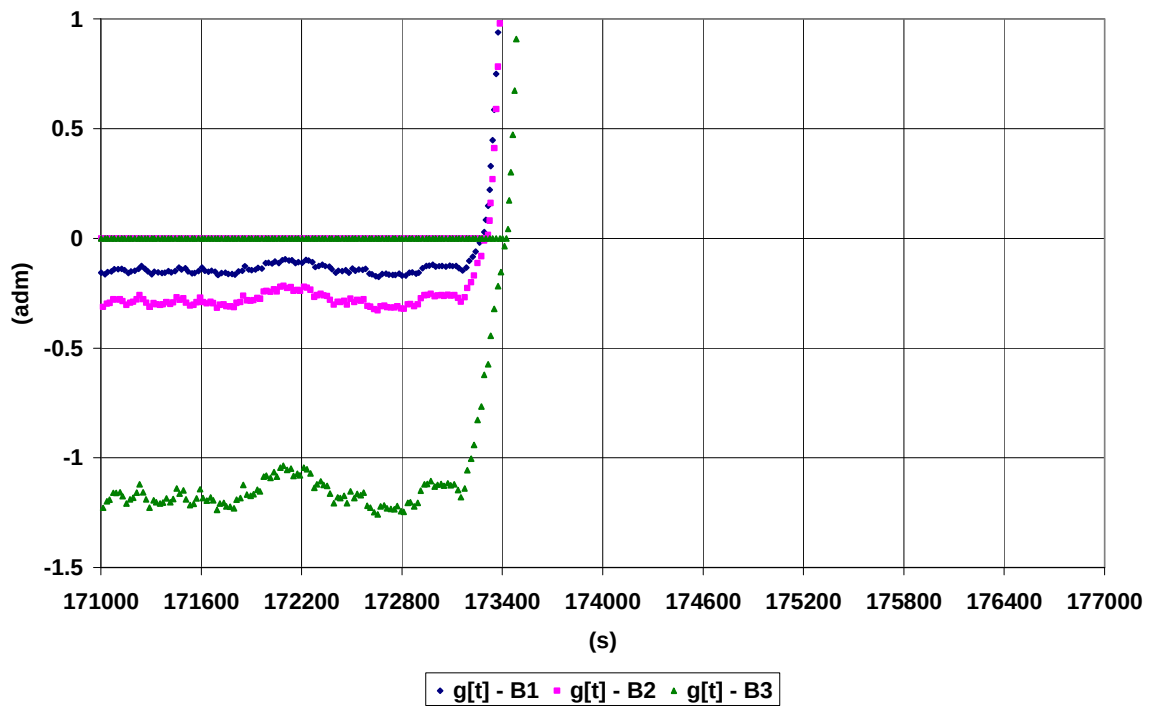


Figura I.19 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

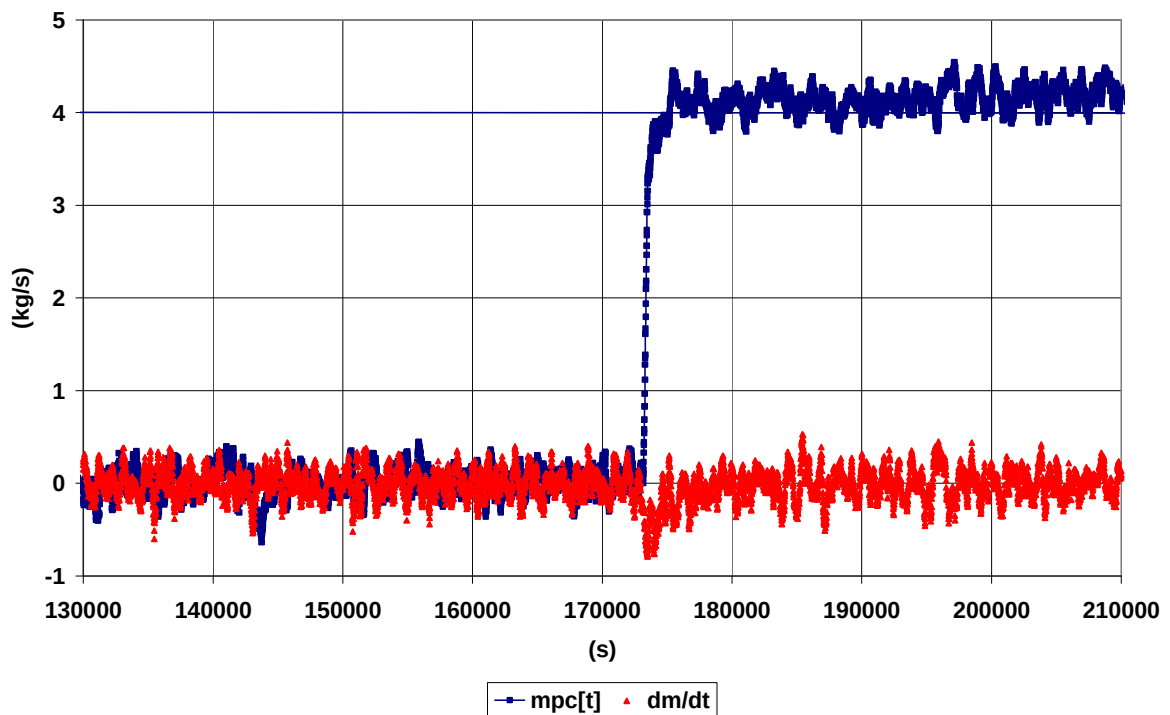


Figura I.20 – Segmento PL, furo de 2,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 3,0 in, próximo à saída:

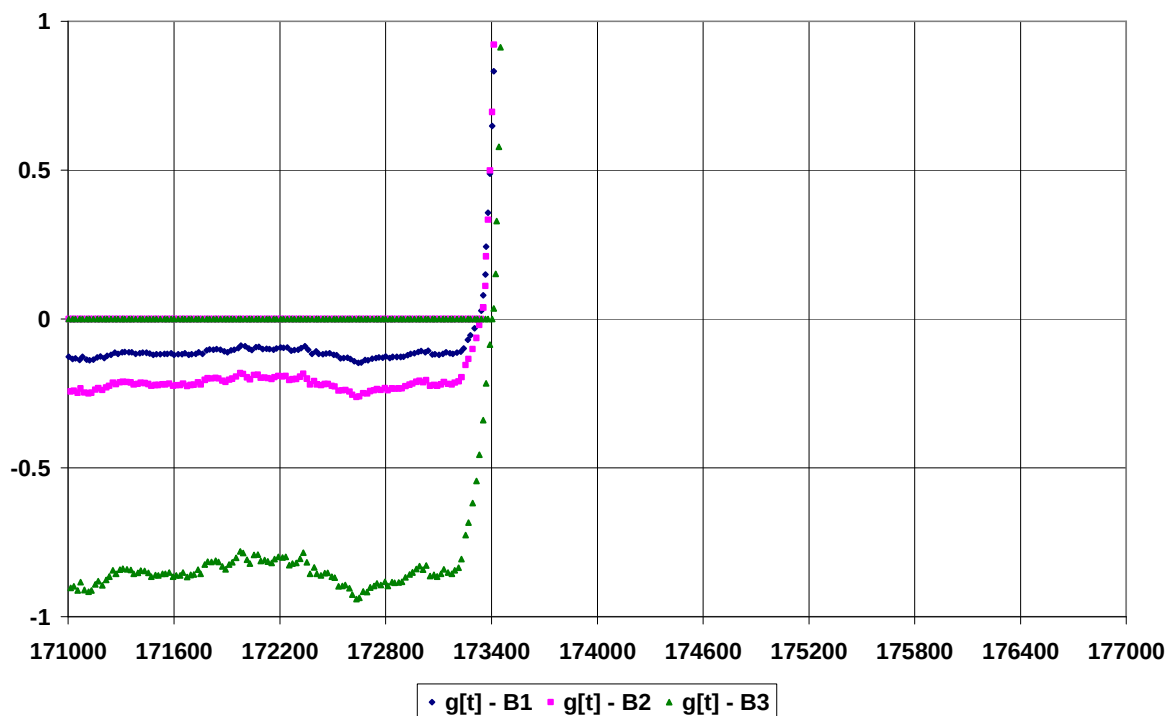


Figura I.21 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

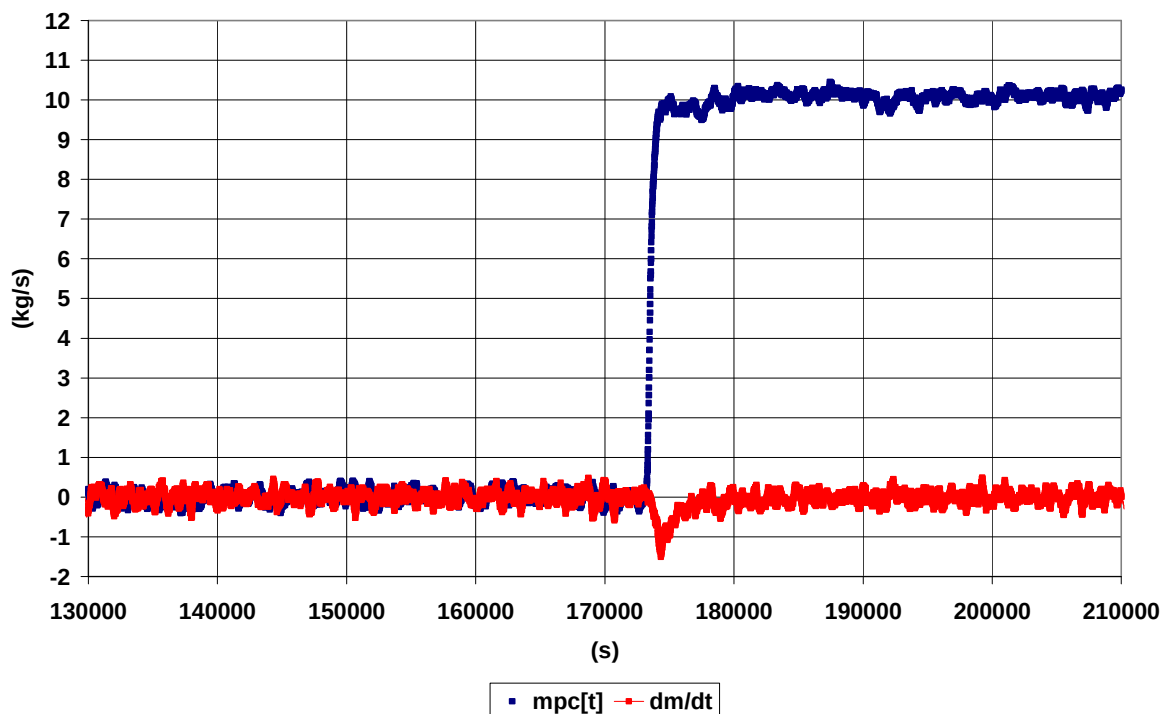


Figura I.22 – Segmento PL, furo de 3,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Anexo II – Gráficos para o segmento PL, regime transiente

Furo 0,5 in, próximo ao meio, empacotamento:

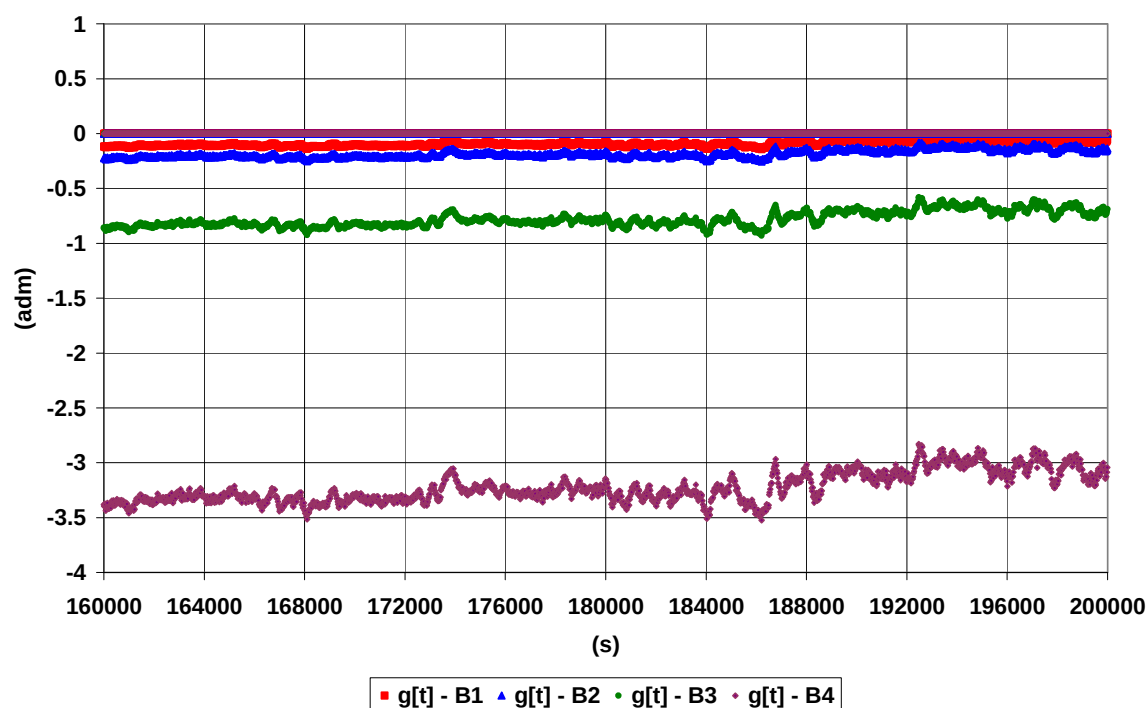


Figura II.1 – Segmento PL, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

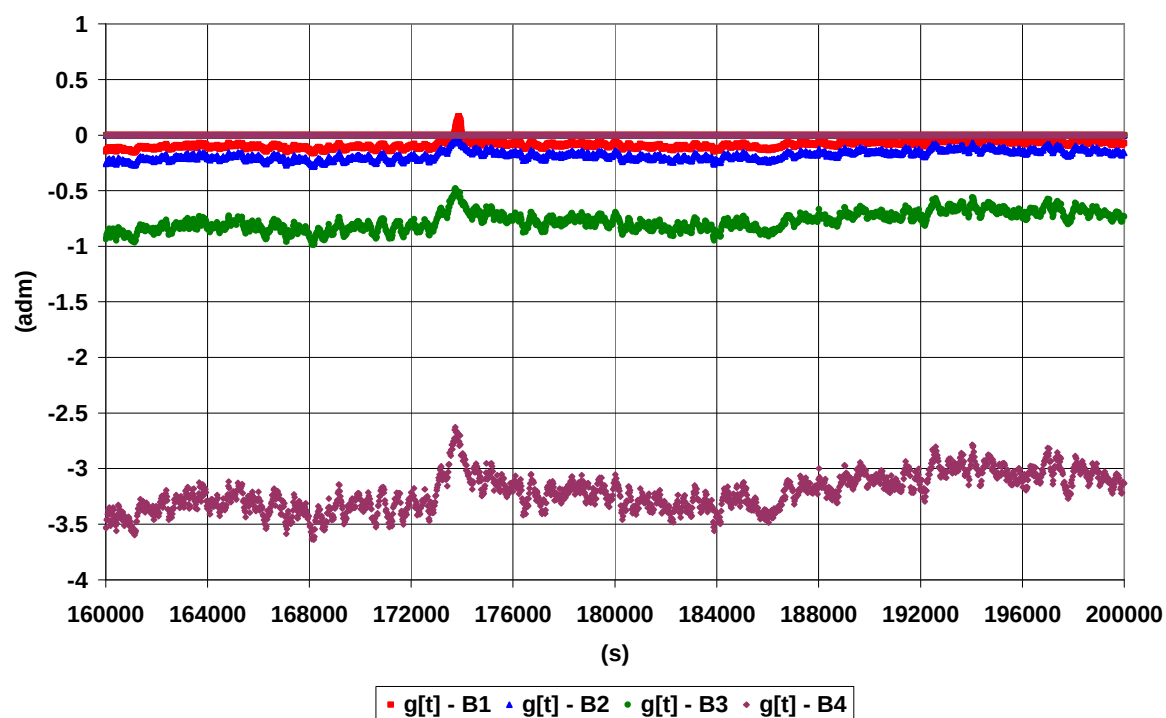


Figura II.2 – Segmento PL, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

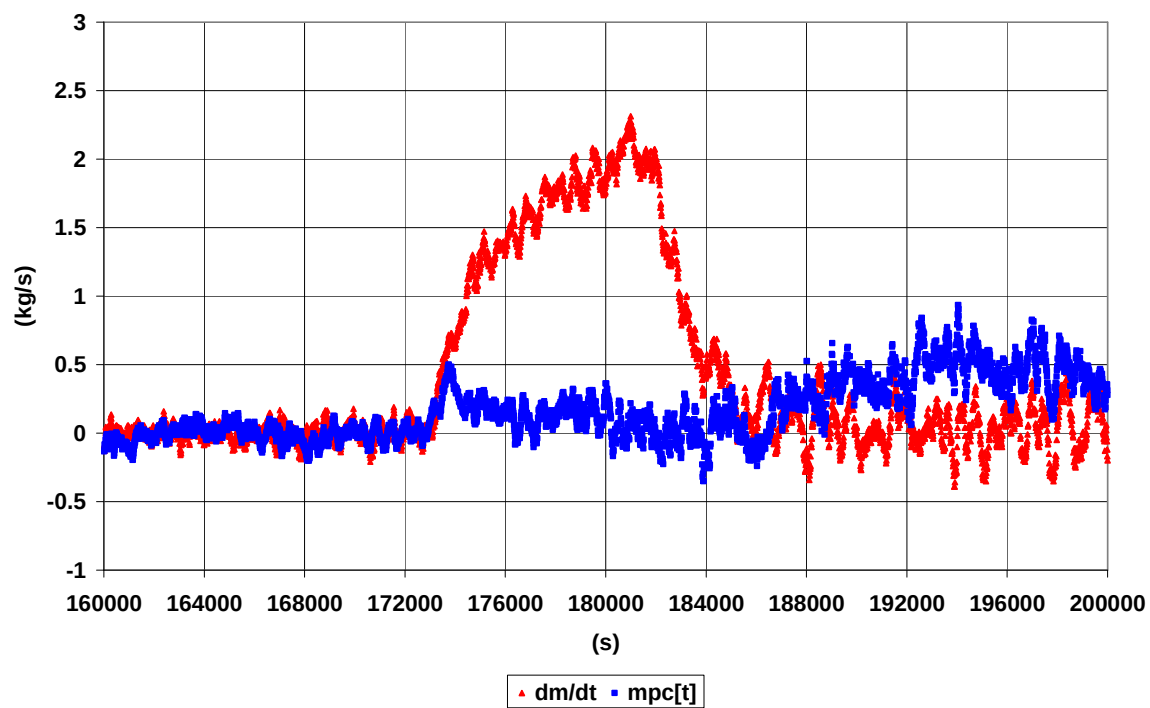


Figura II.3 – Segmento PL, 0,50 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo ao meio, empacotamento:

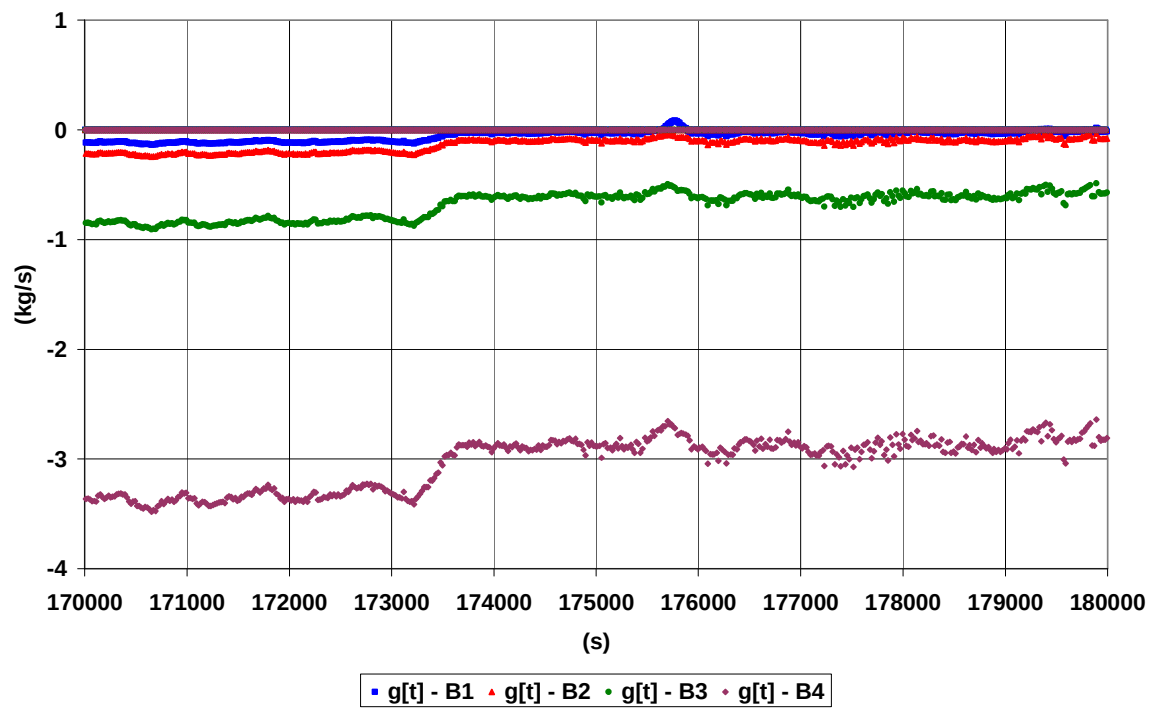


Figura II.4 – Segmento PL, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

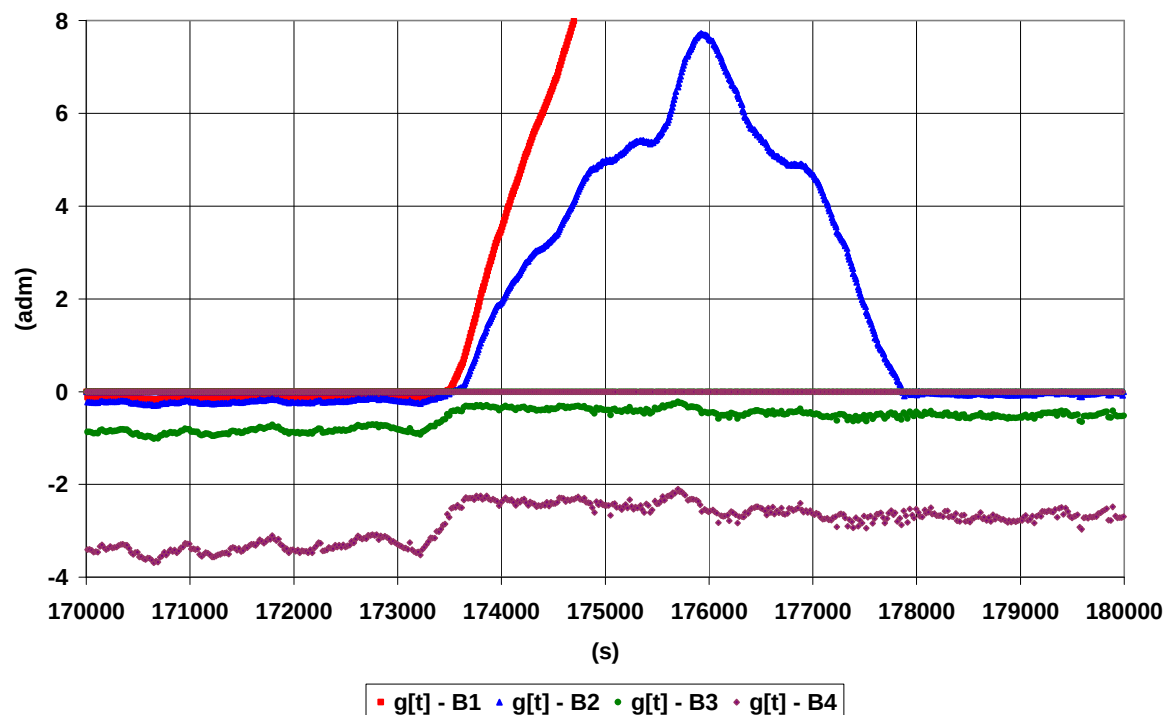


Figura II.5 – Segmento PL, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

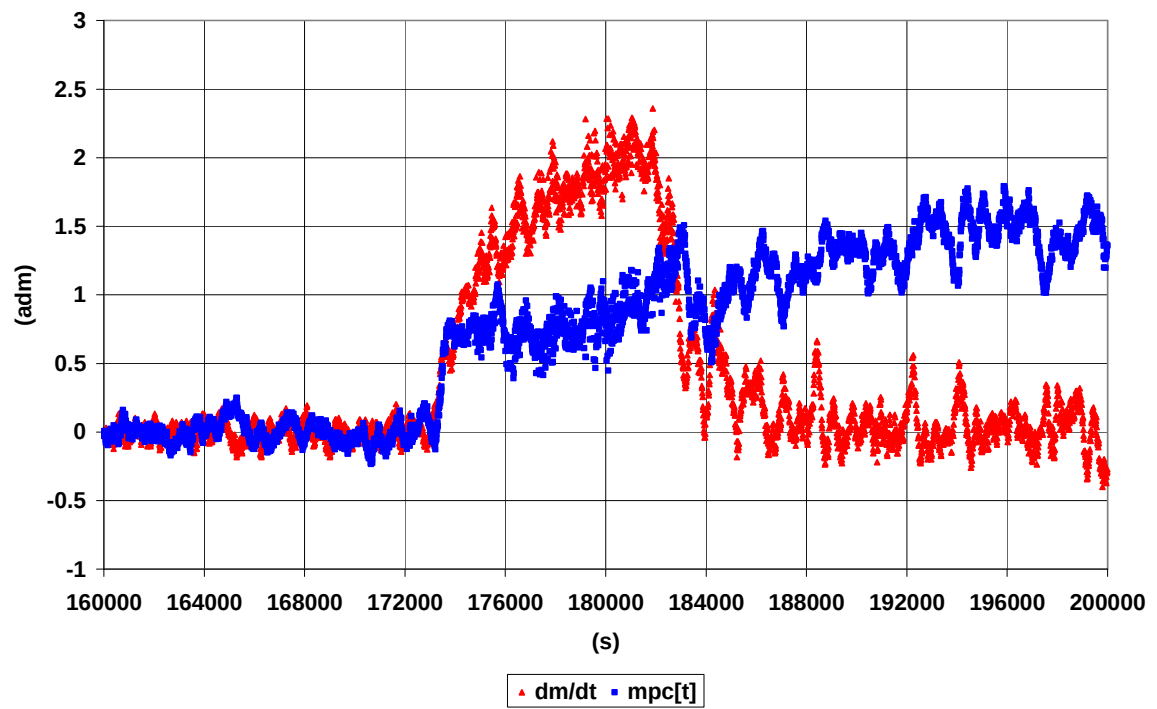


Figura II.6 – Segmento PL,1,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 2,0 in, próximo ao meio, empacotamento:

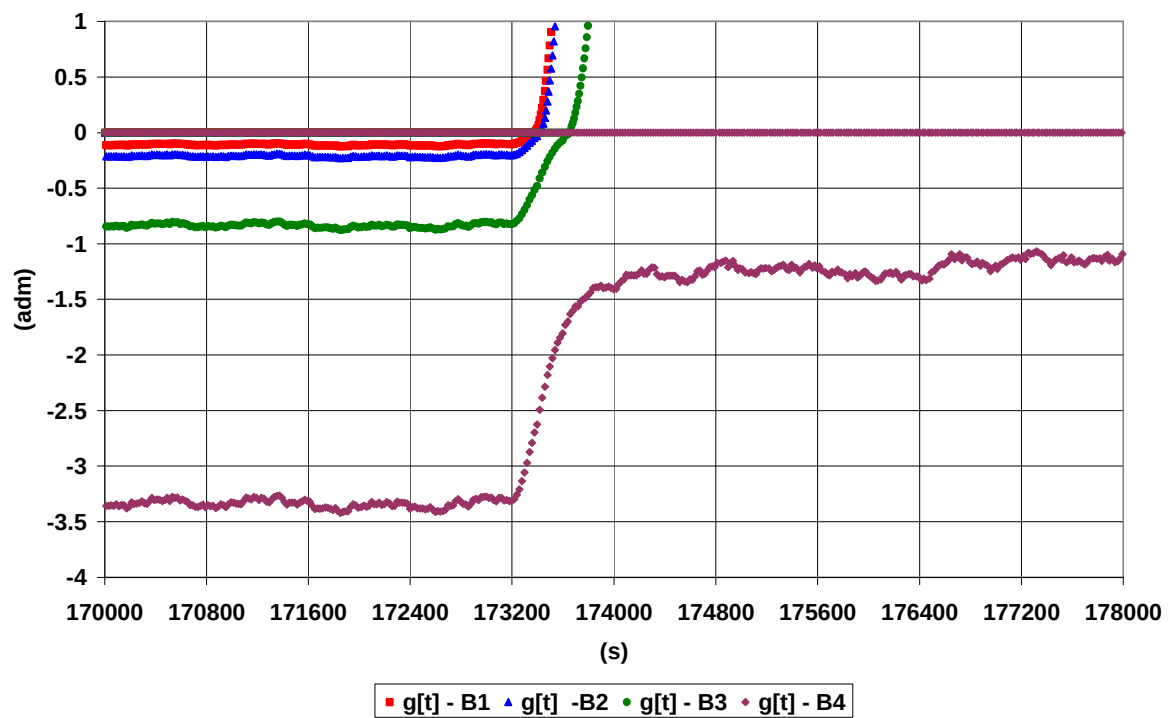


Figura II.7 – Segmento PL, 2,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

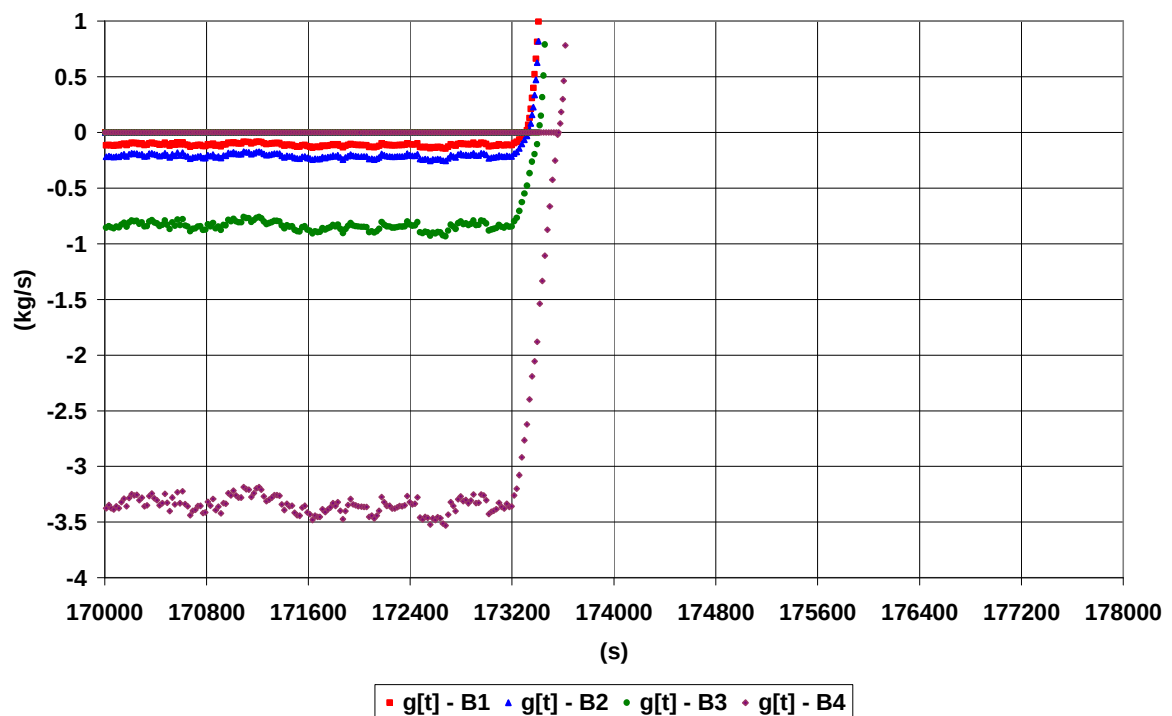


Figura II.8 – Segmento PL, 2,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

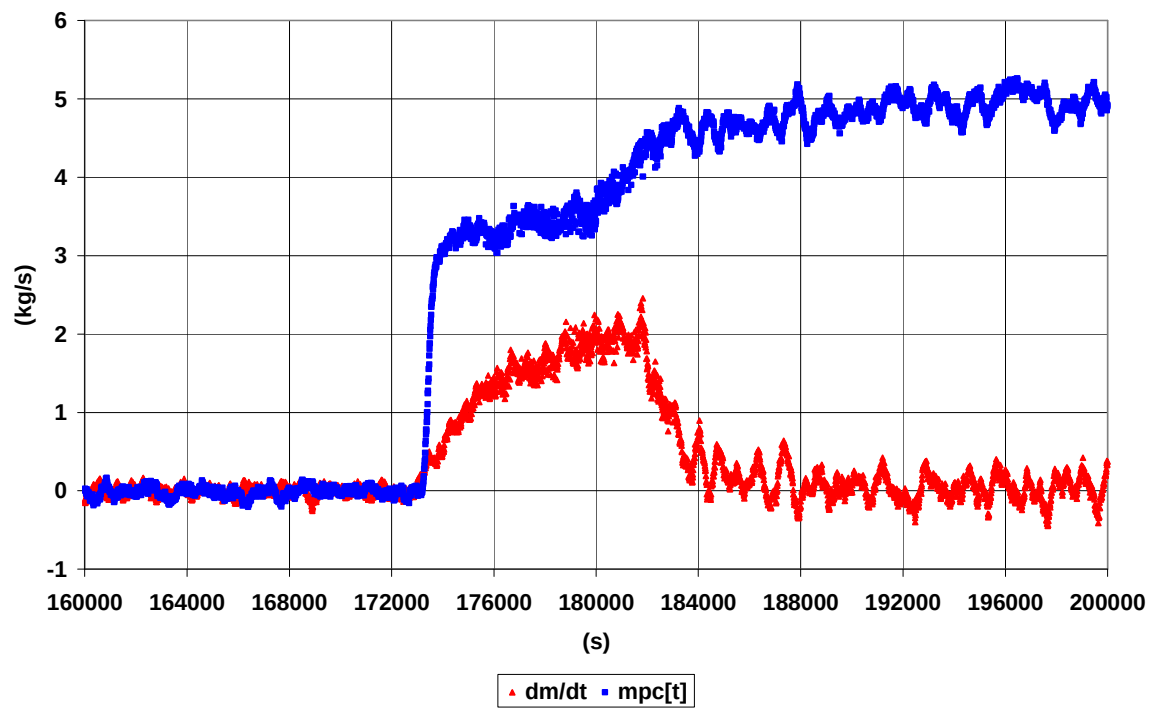


Figura II.9 – Segmento PL, 2,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 3,0 in, próximo ao meio, empacotamento:

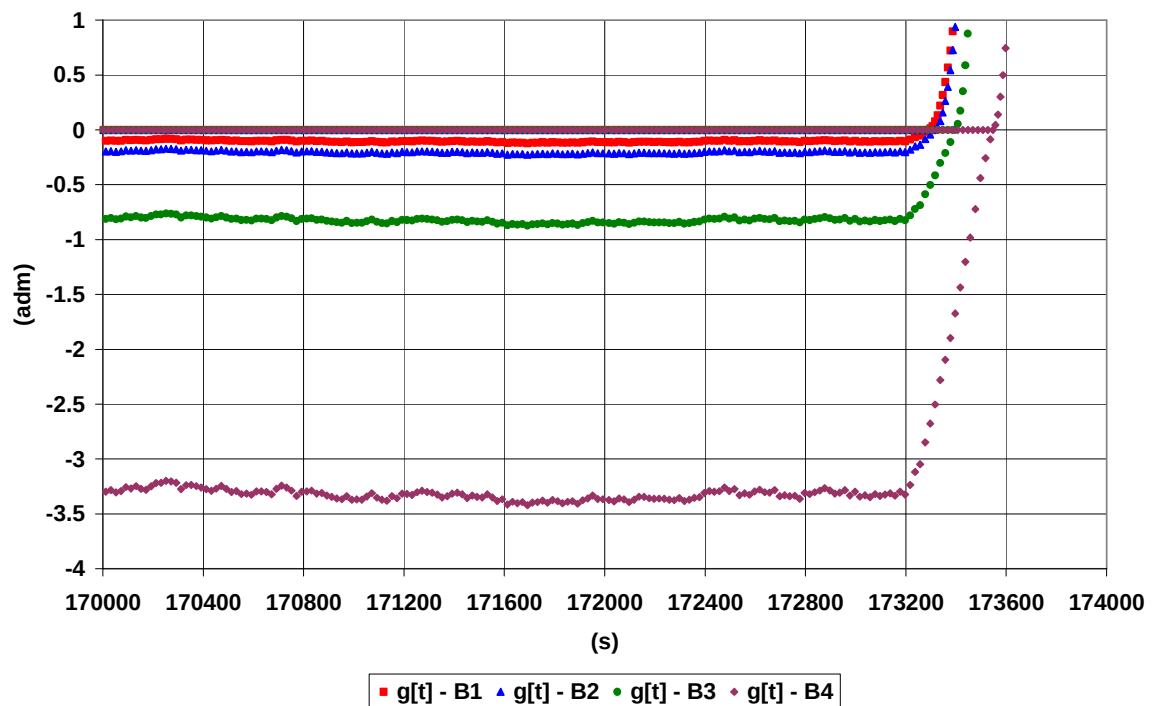


Figura II.10 – Segmento PL, 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

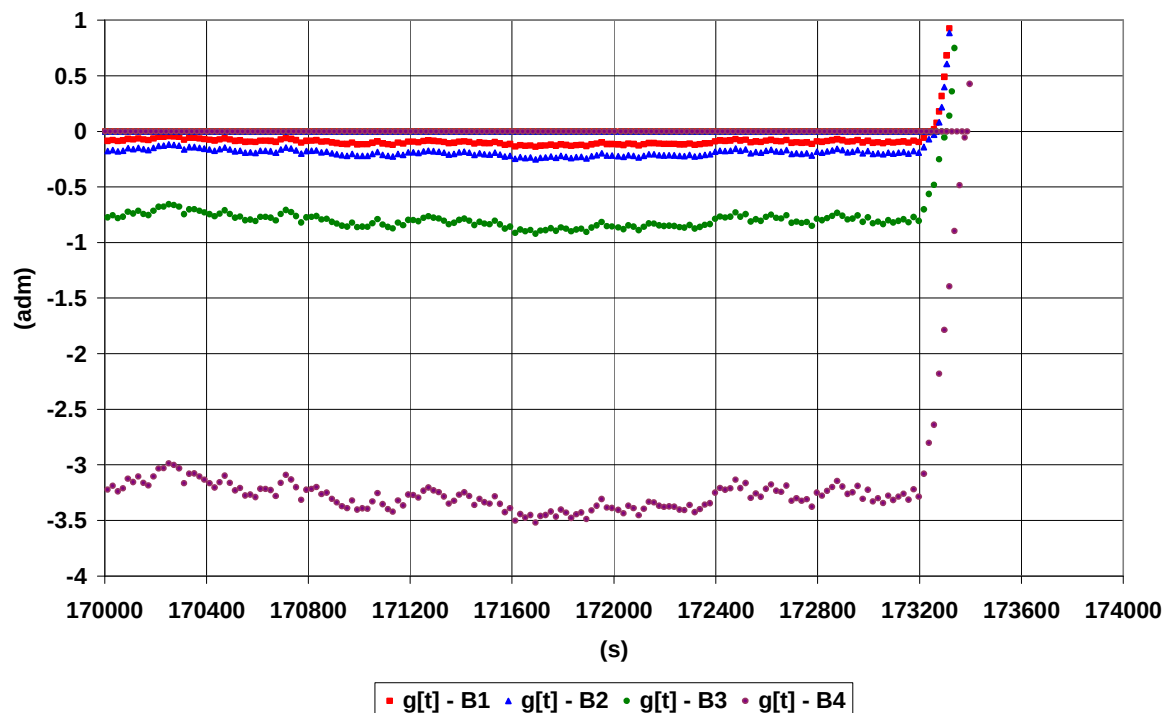


Figura II.11 – Segmento PL, 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

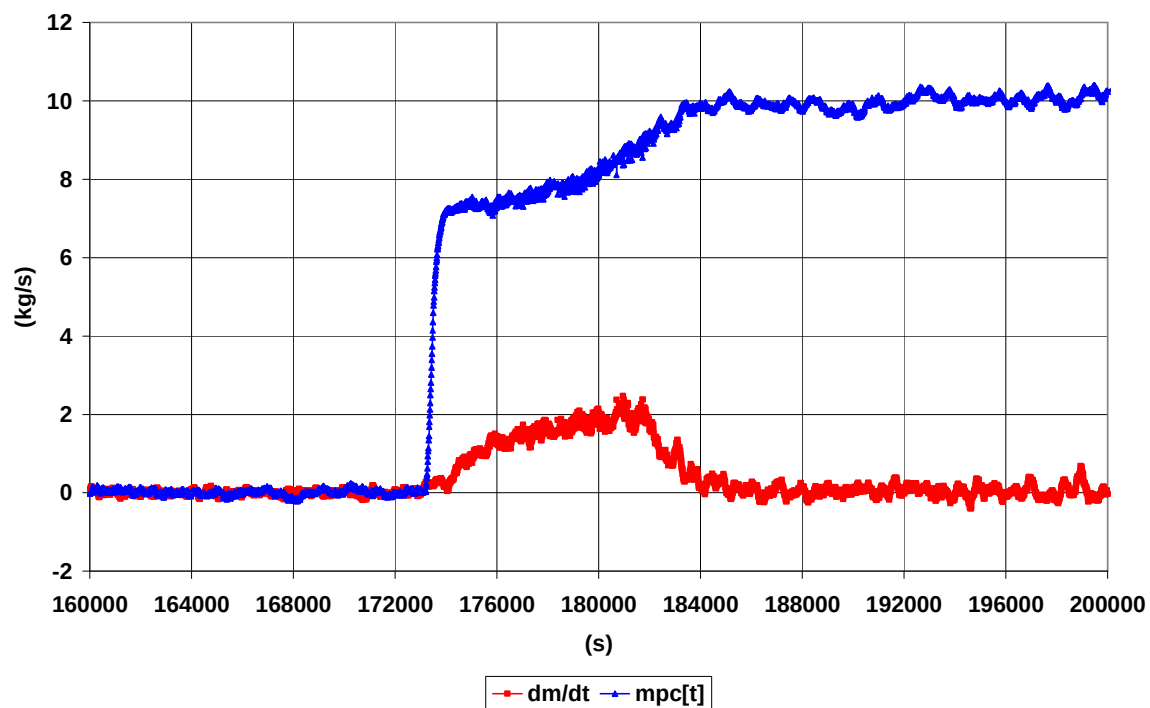


Figura II.12 – Segmento PL, 3,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_c[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,5 in, próximo ao meio, desempacotamento:

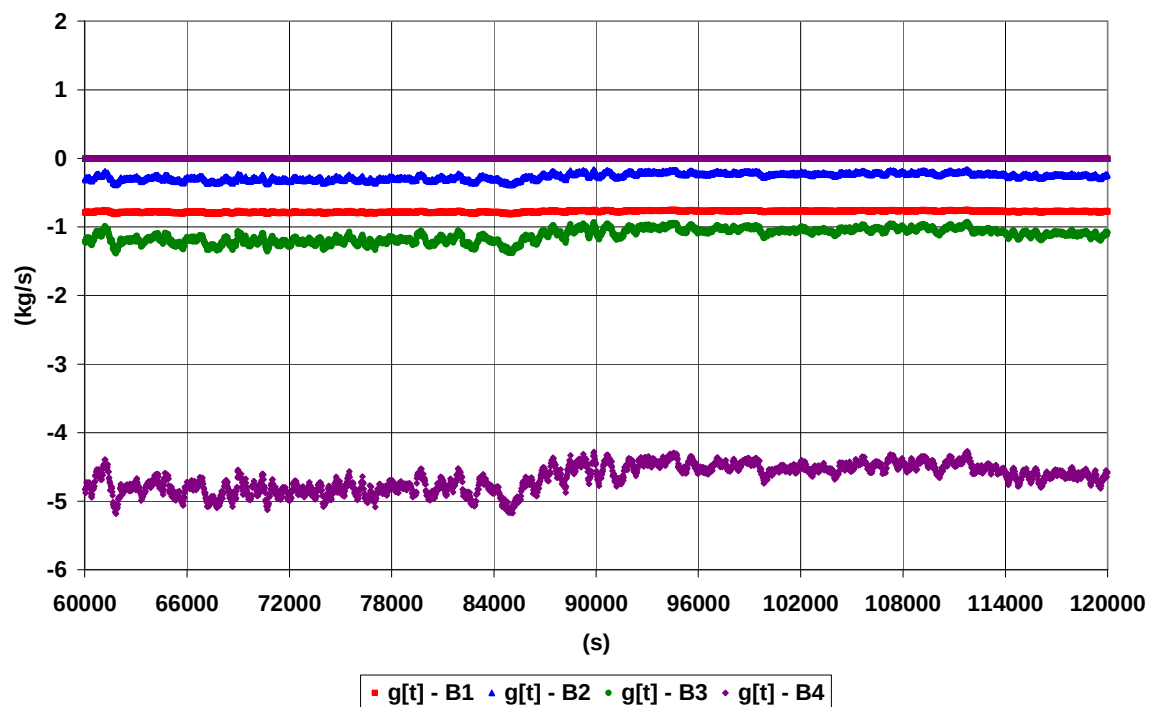


Figura II.13 – Segmento PL, 0,50 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

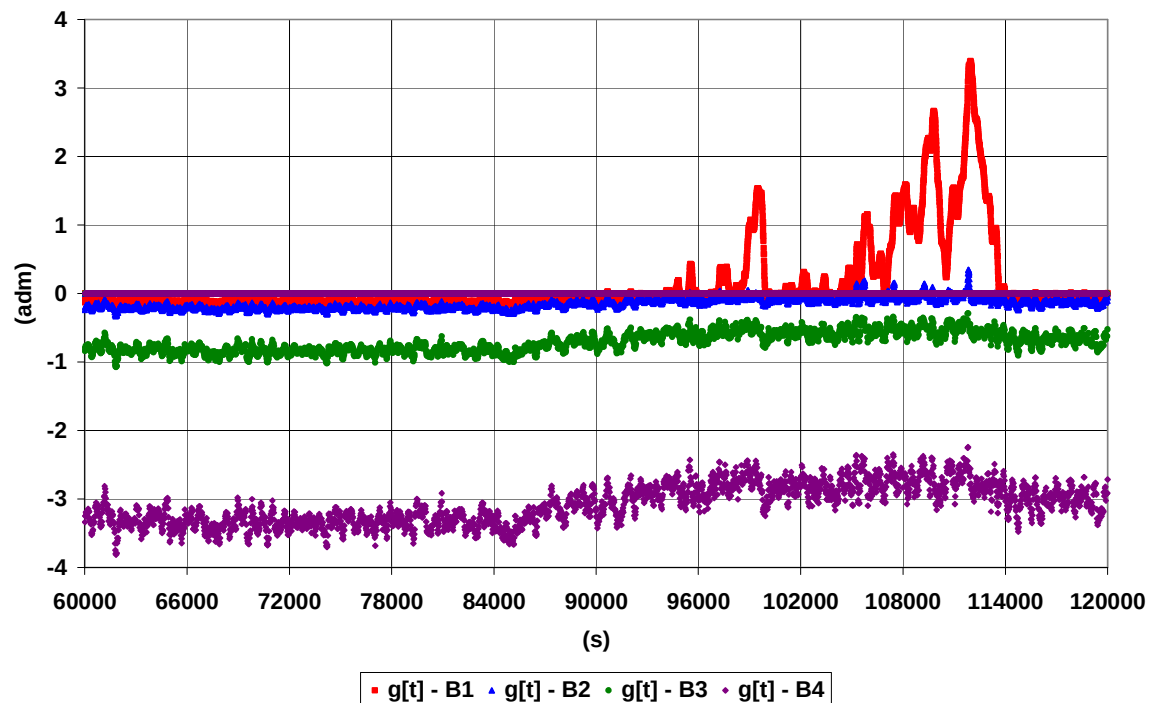


Figura II.14 – Segmento PL, 0,50 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

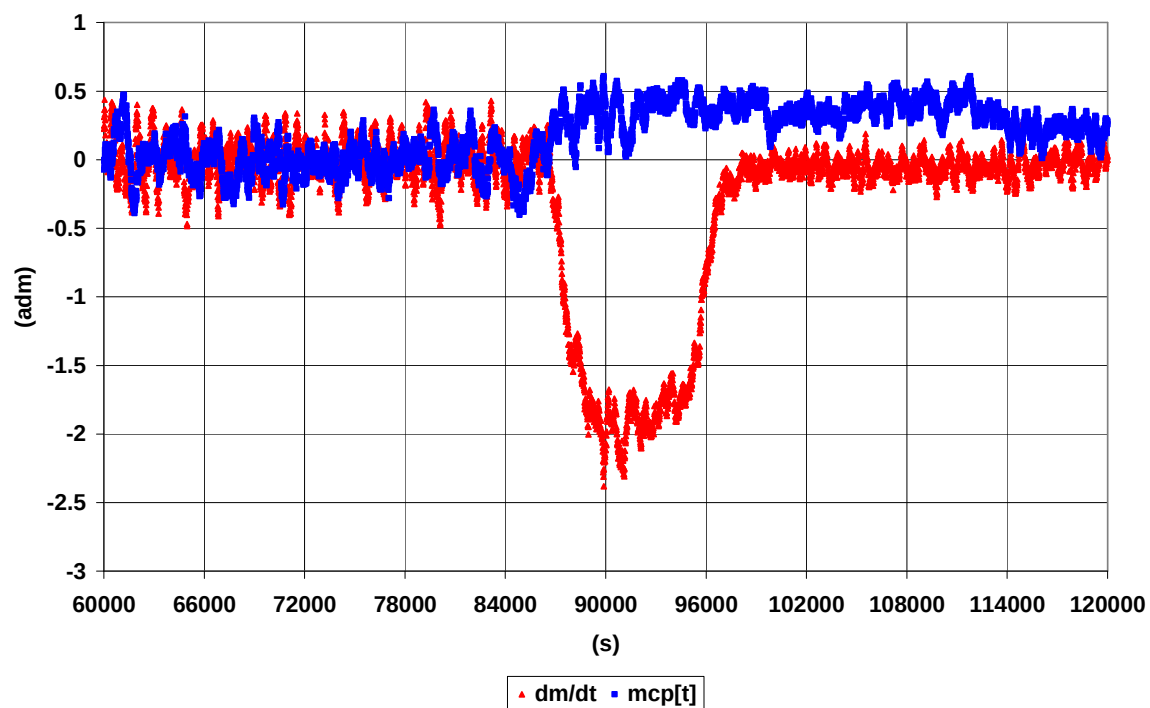


Figura II.15 – Segmento PL, 0,50 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo ao meio, desempacotamento:

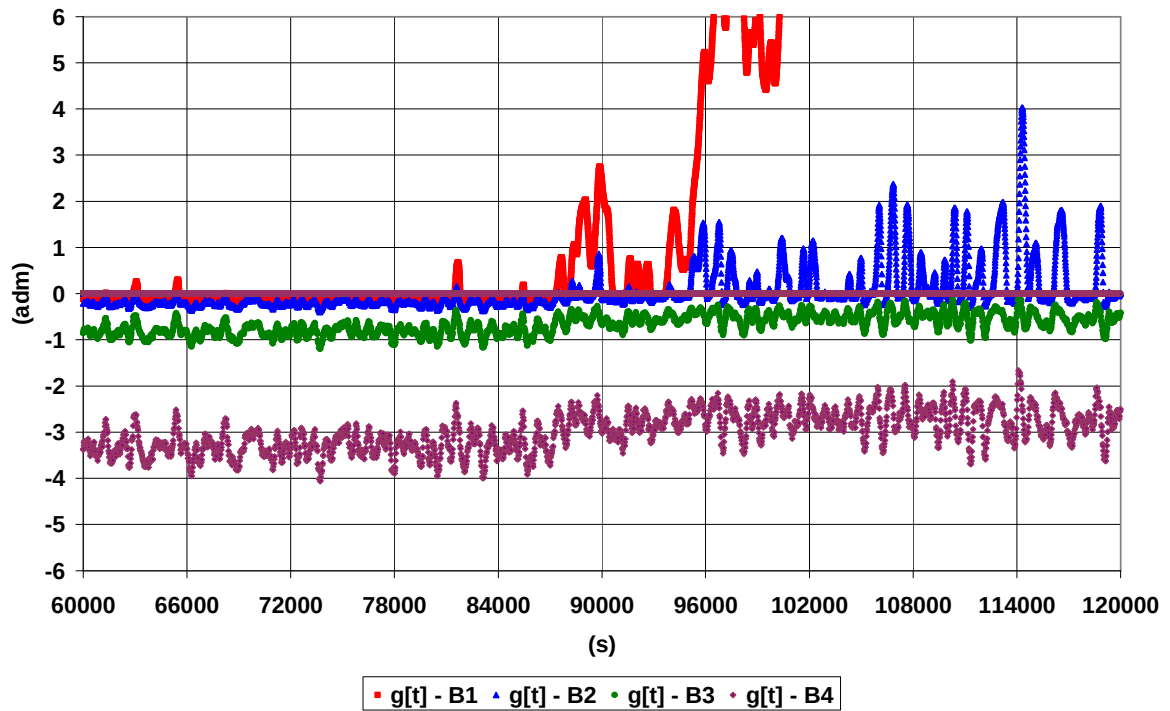


Figura II.16 – Segmento PL, furo de 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

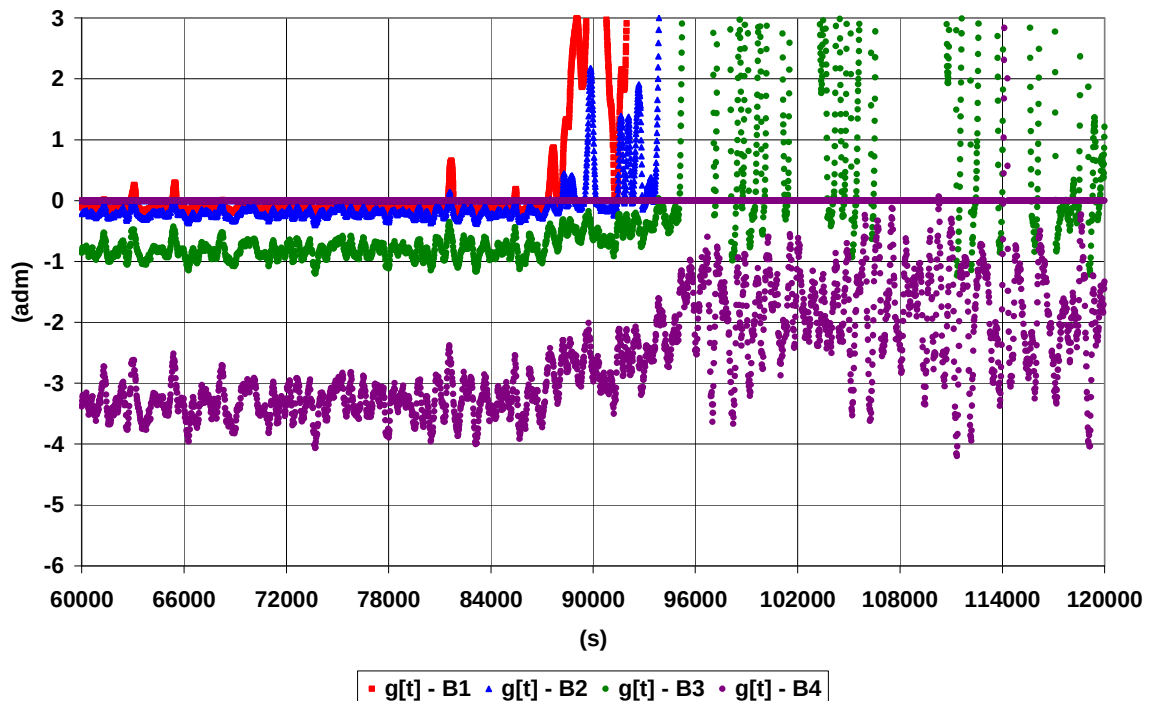


Figura II.17 – Segmento PL, furo de 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

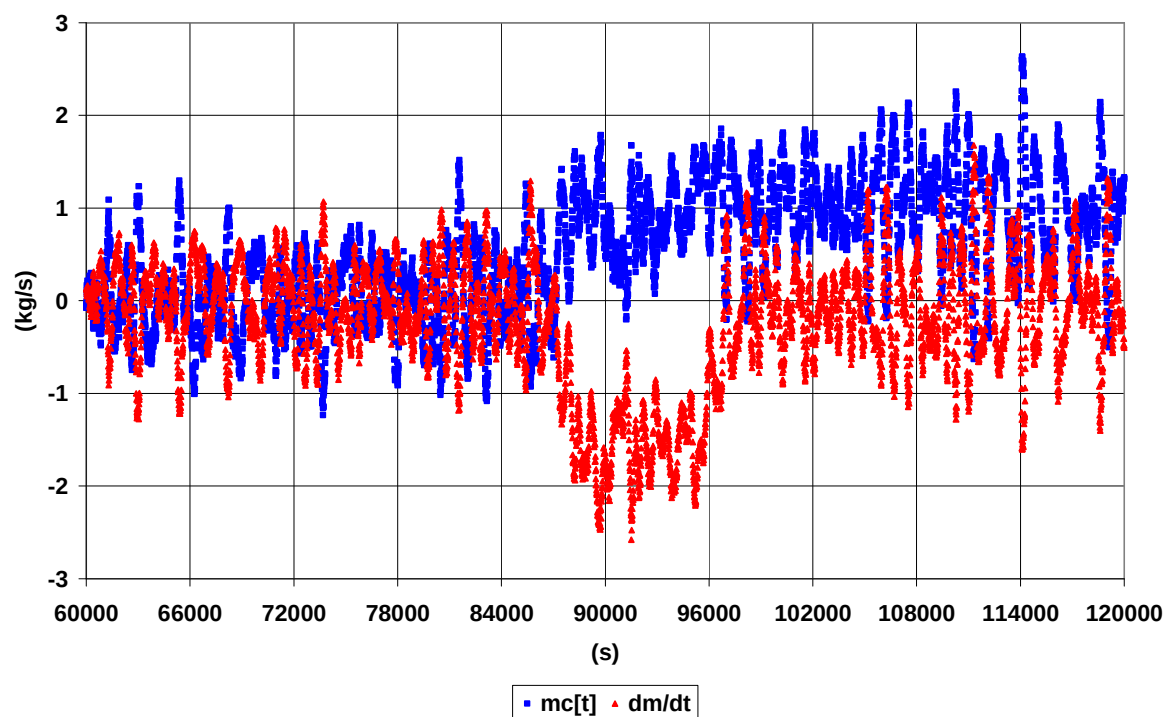


Figura II.18 – Segmento PL, 1,0 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 2,0 in, próximo ao meio, desempacotamento:

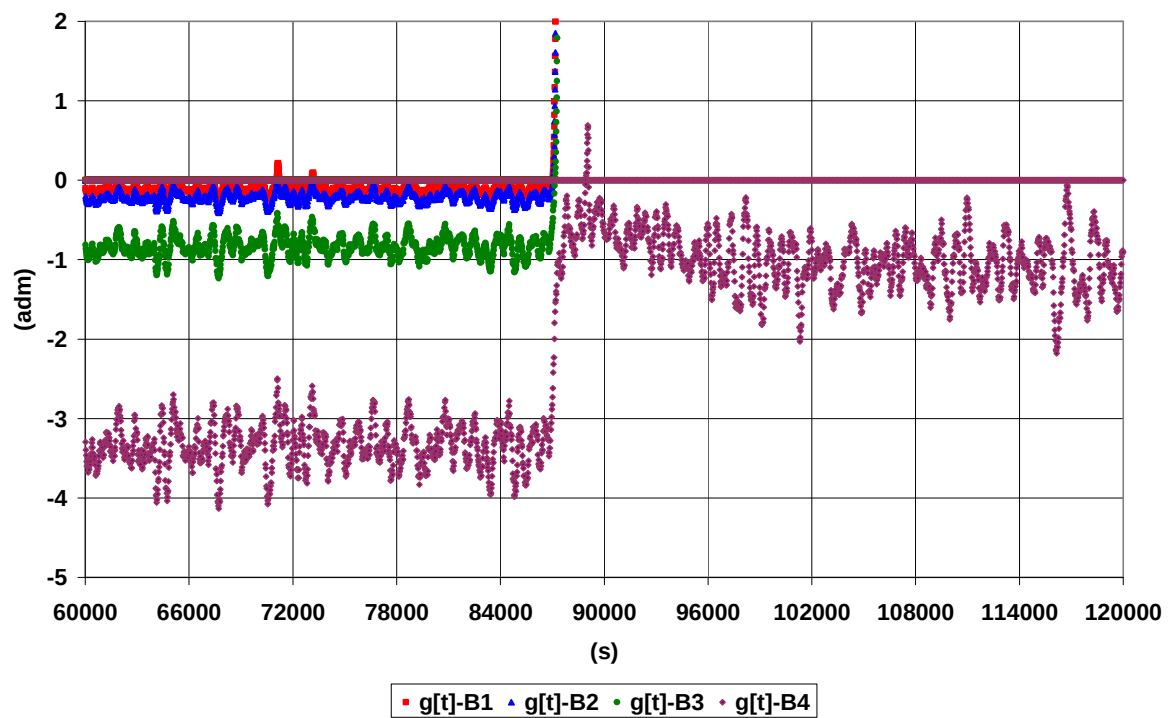


Figura II.19 – Segmento PL, 2,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

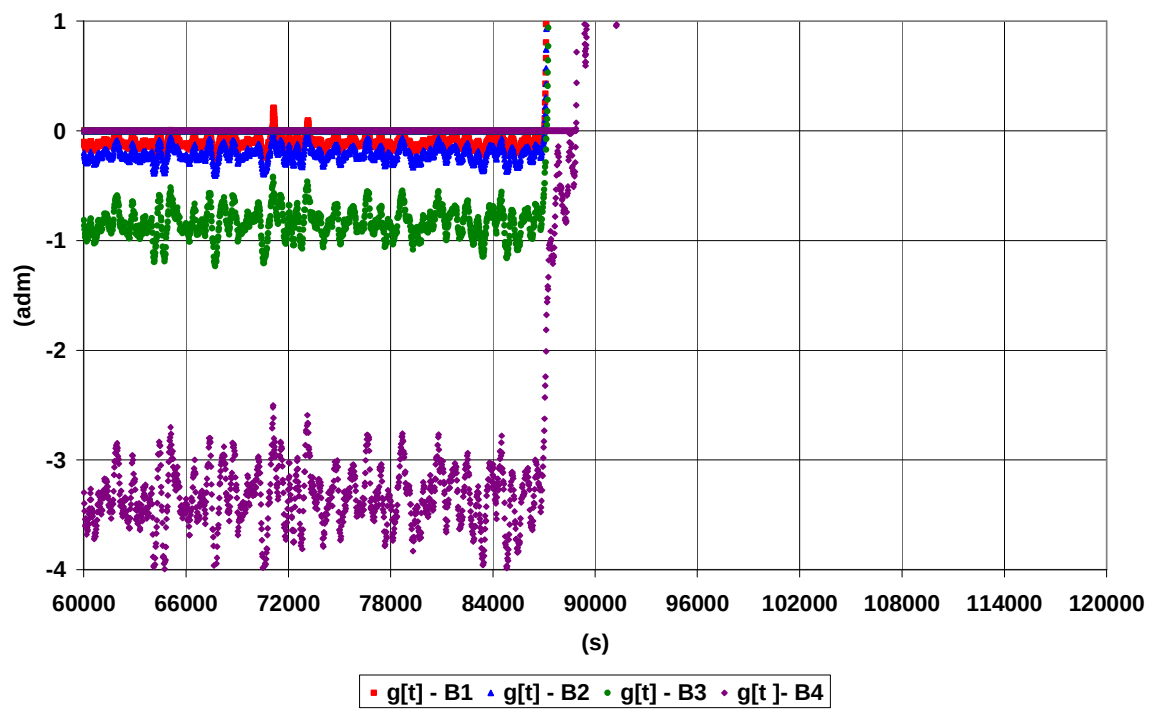


Figura II.20 – Segmento PL, 2,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

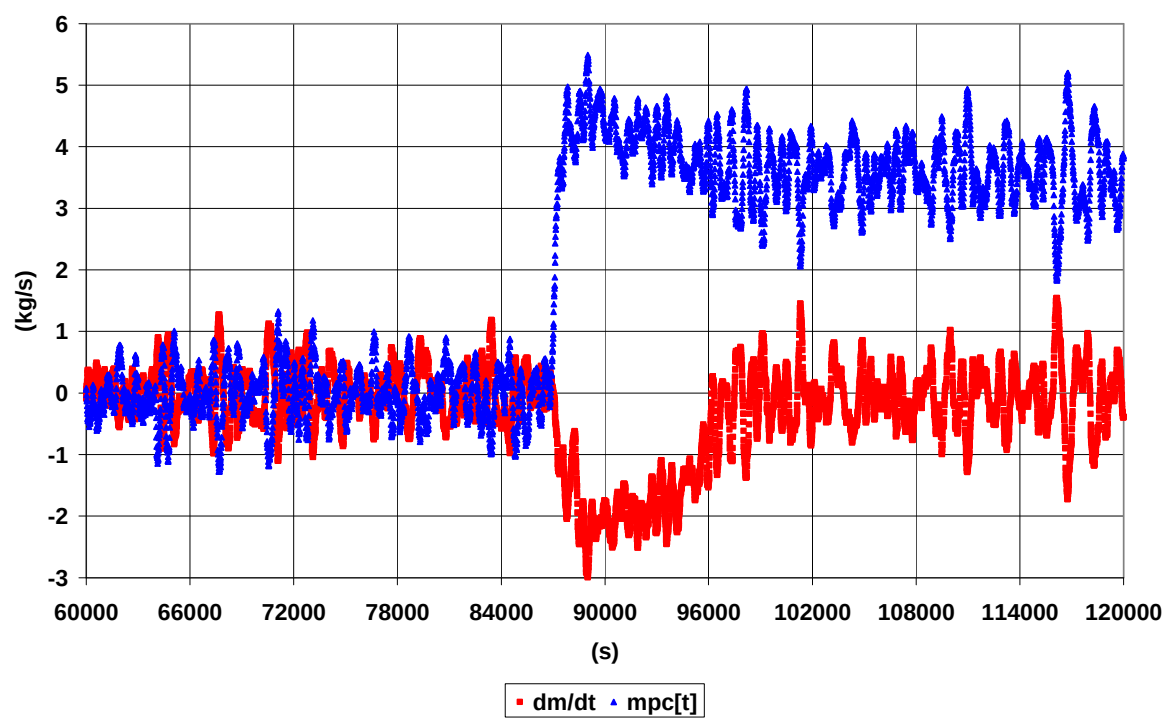


Figura II.21 – Segmento PL, 2,0 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 3,0 in, próximo ao meio, desempacotamento:

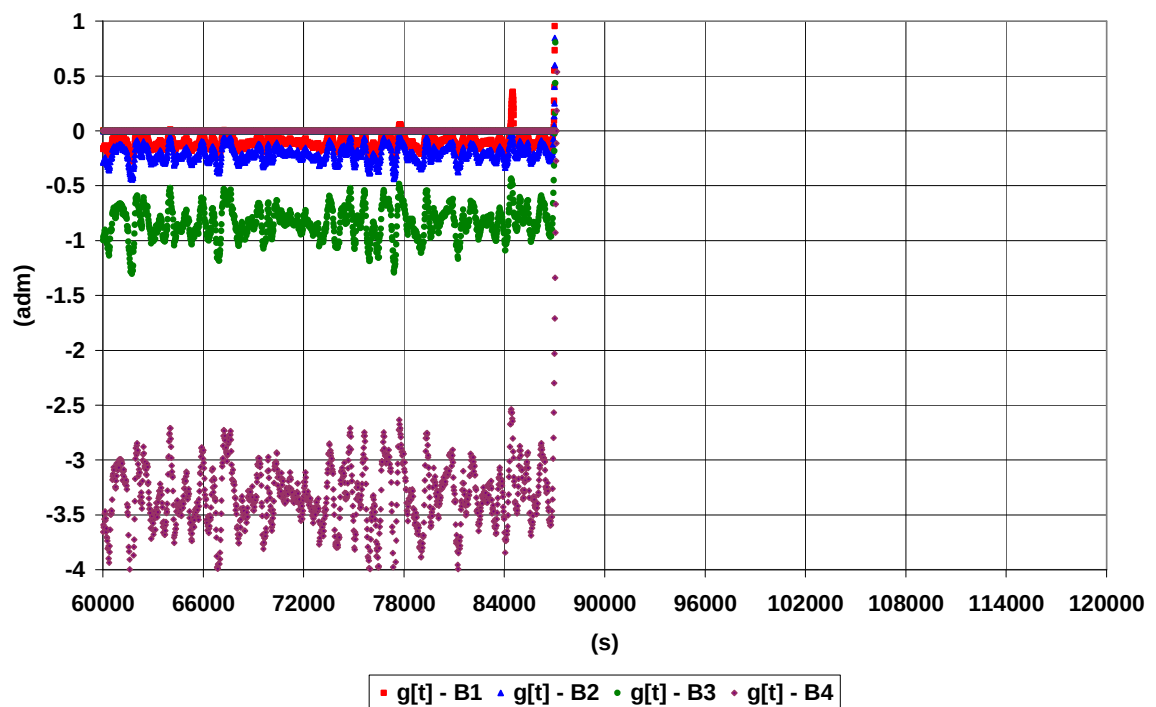


Figura II.22 – Segmento PL, furo de 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

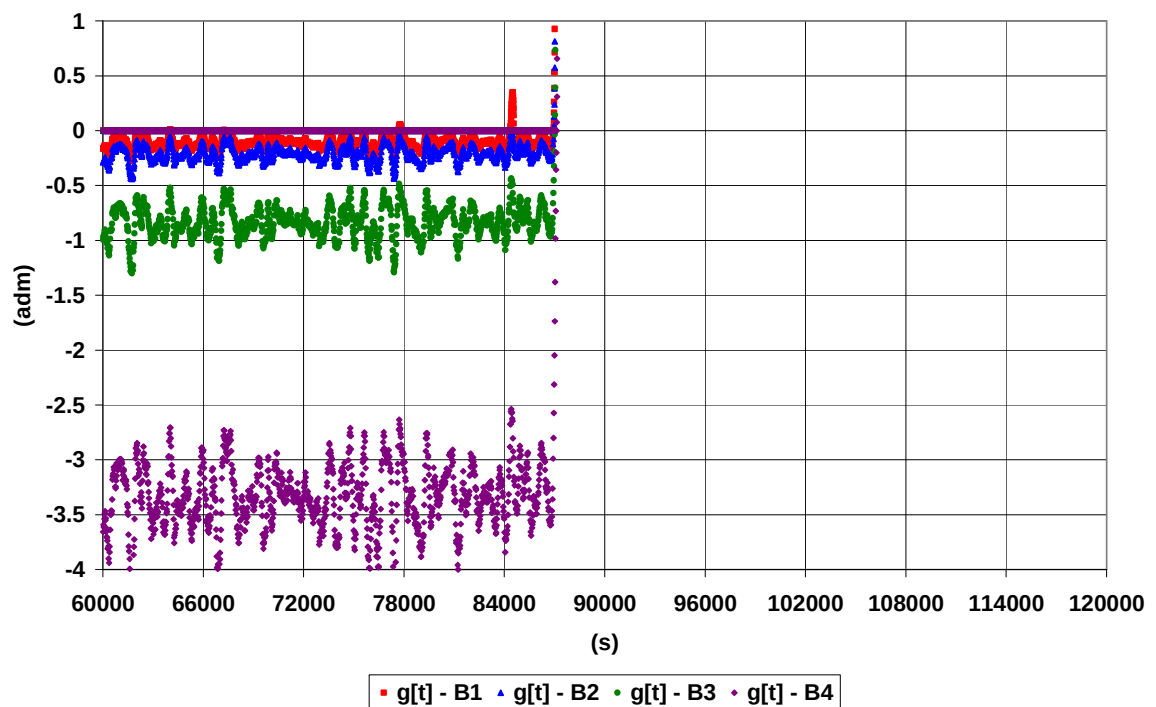


Figura II.23 – Segmento PL, furo de 3,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

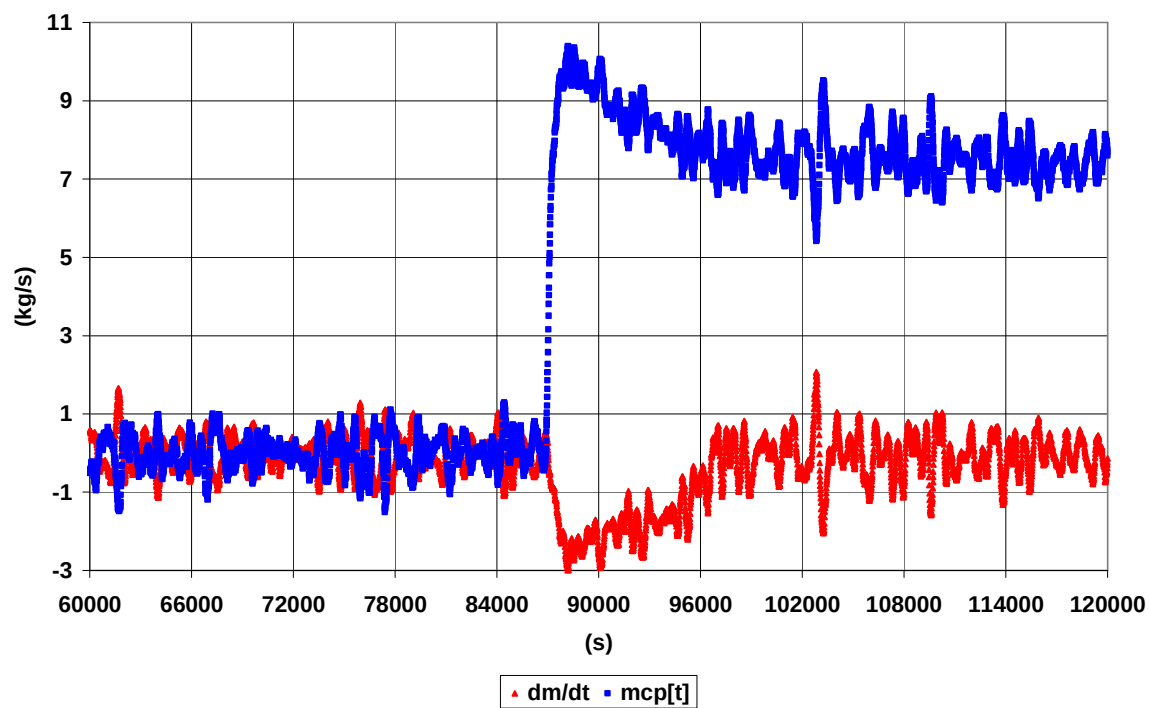


Figura II.24 – Segmento PL, furo de 3,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Anexo III – Gráficos para o segmento ML, regime permanente

Furo 0,3 in, próximo à entrada:

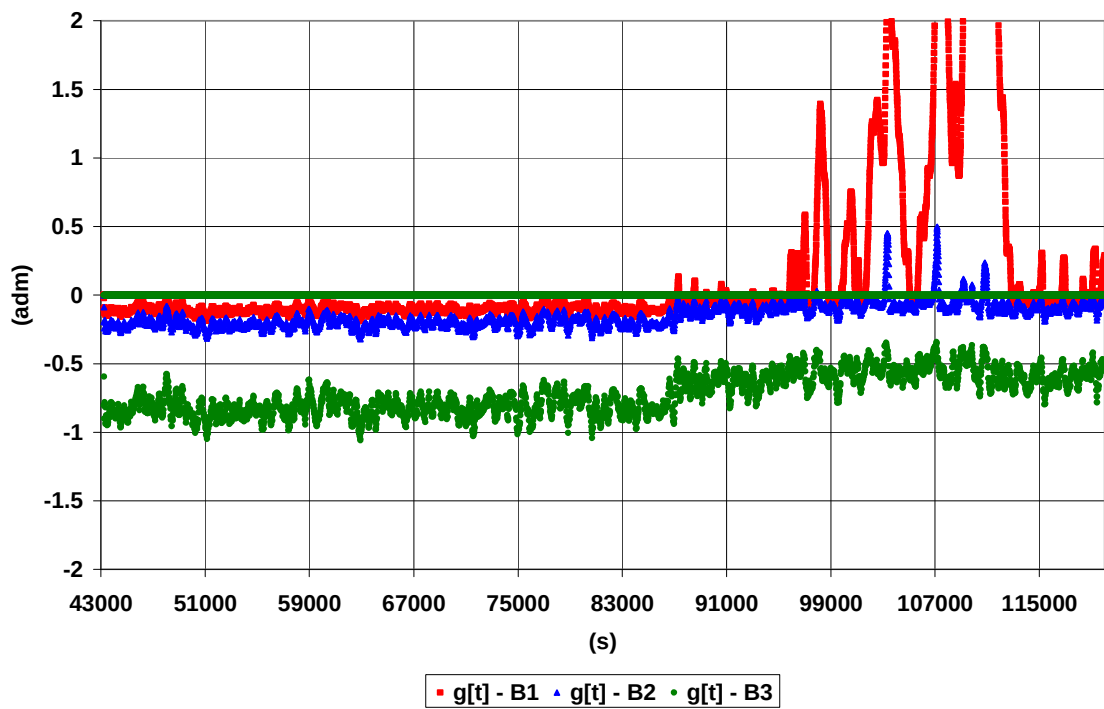


Figura III.1 – Segmento ML, 0,3 in, entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

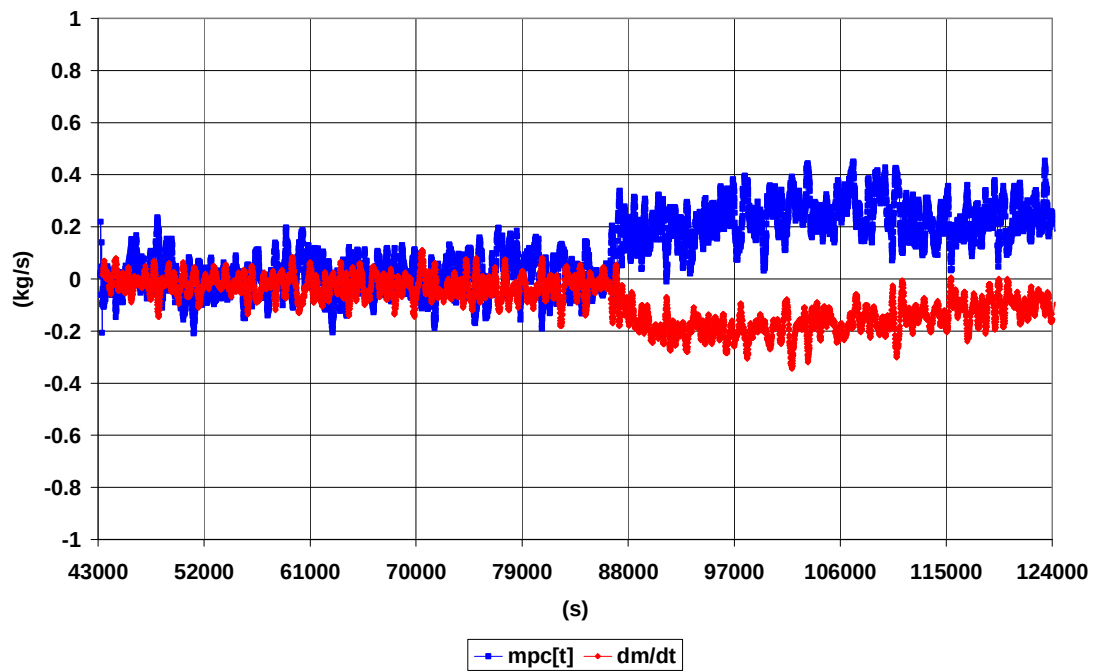


Figura III.2 – Segmento ML, 0,3 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,5 in, próximo à entrada:

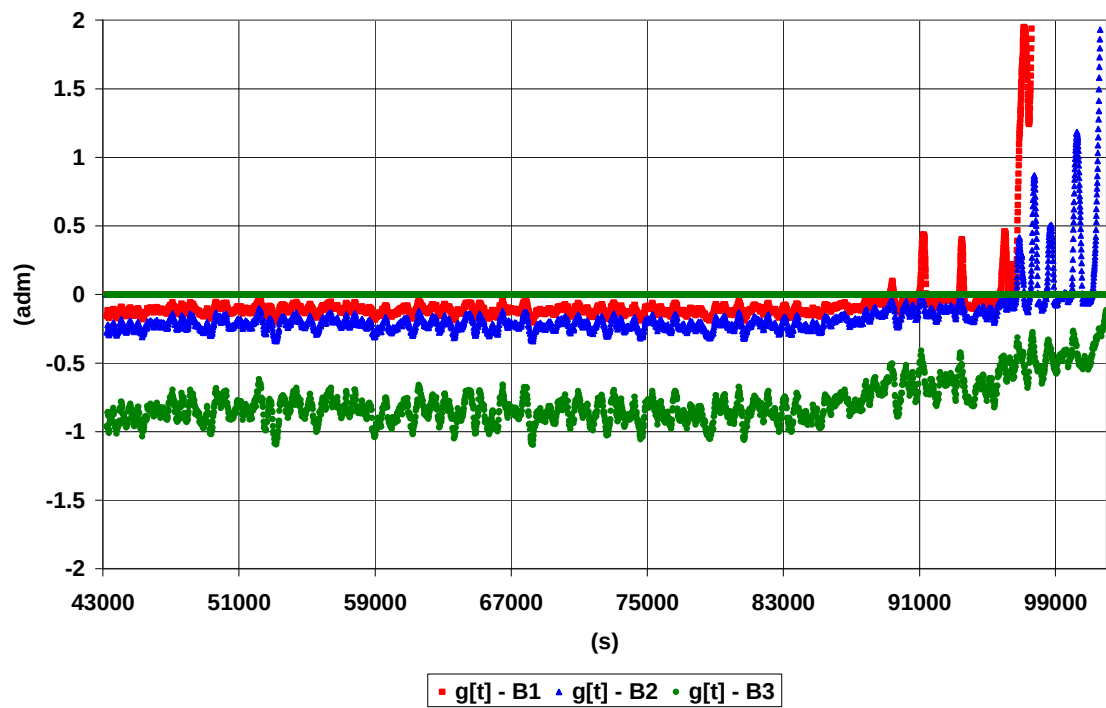


Figura III.3 – Segmento ML, 0,5 in, entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

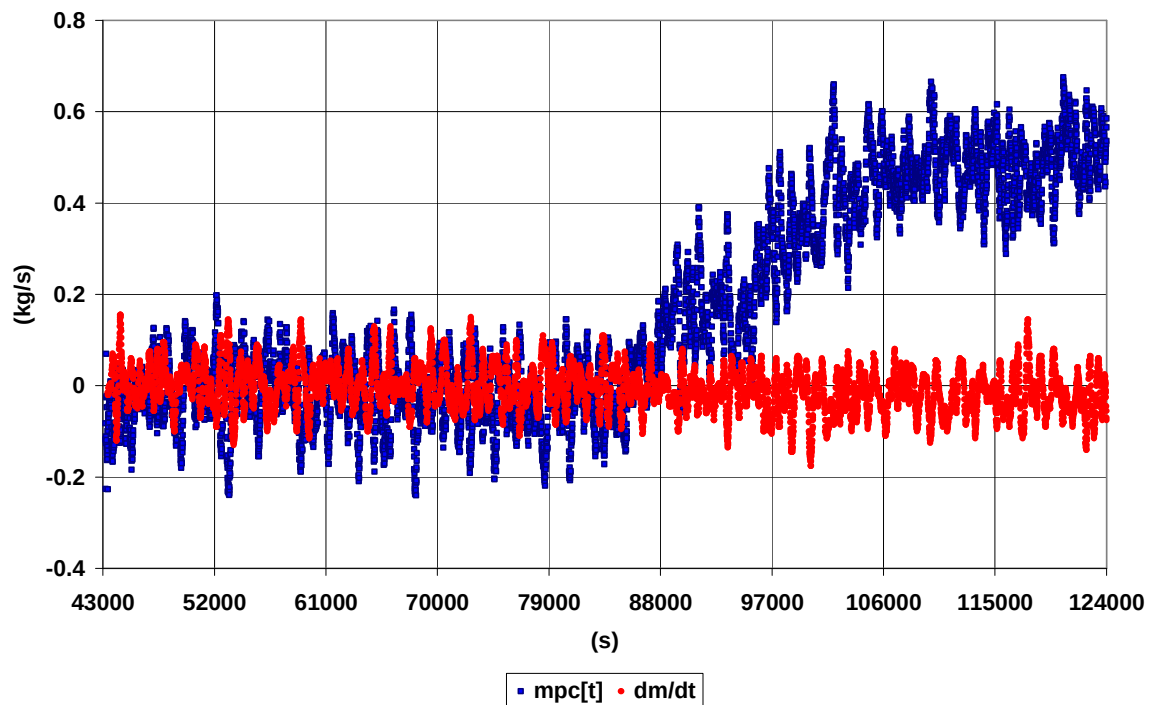


Figura III.4 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo à entrada:

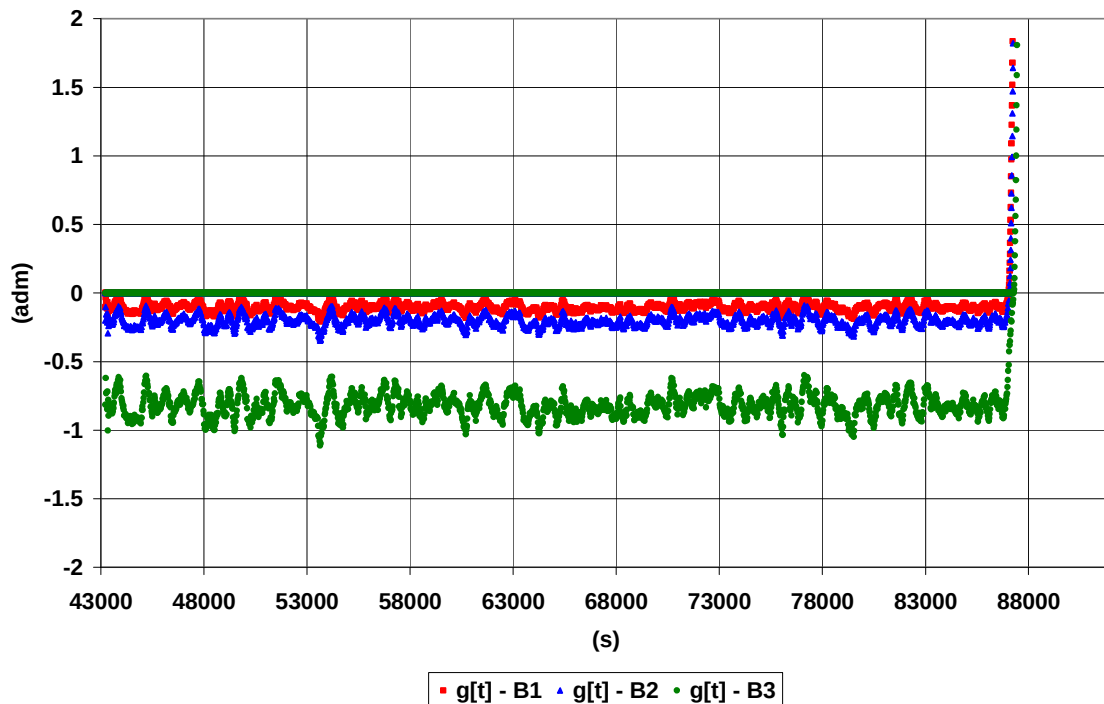


Figura III.5 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

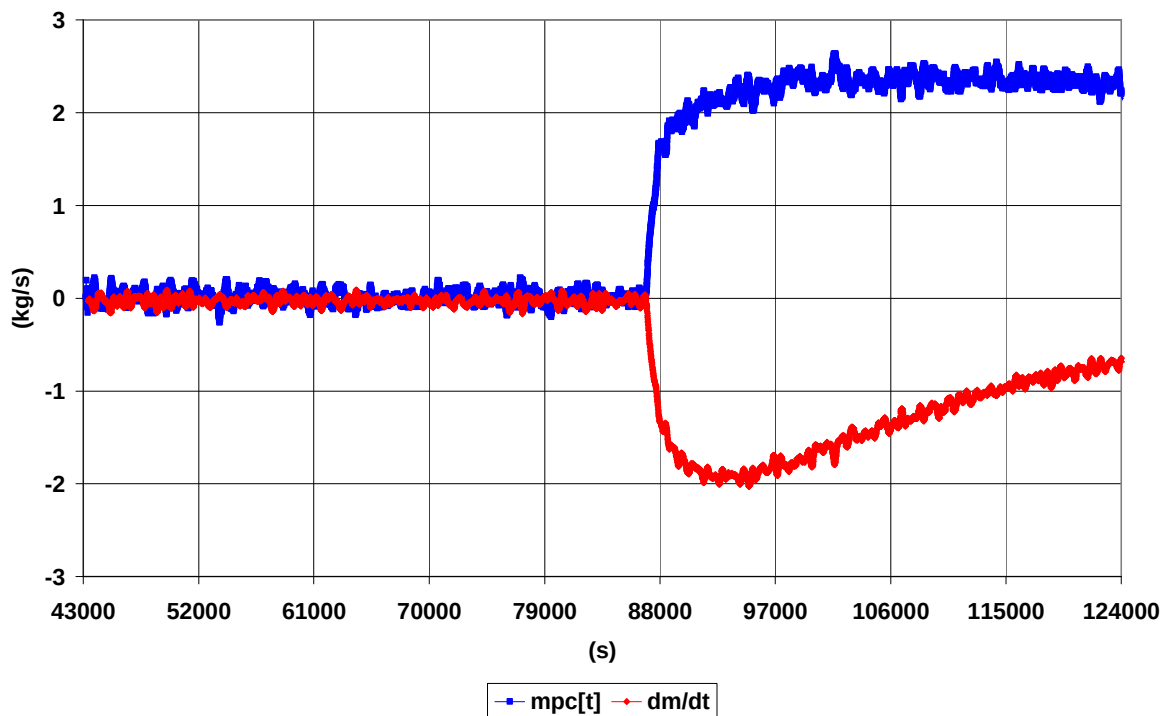


Figura III.6 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,5 in, próximo à entrada:

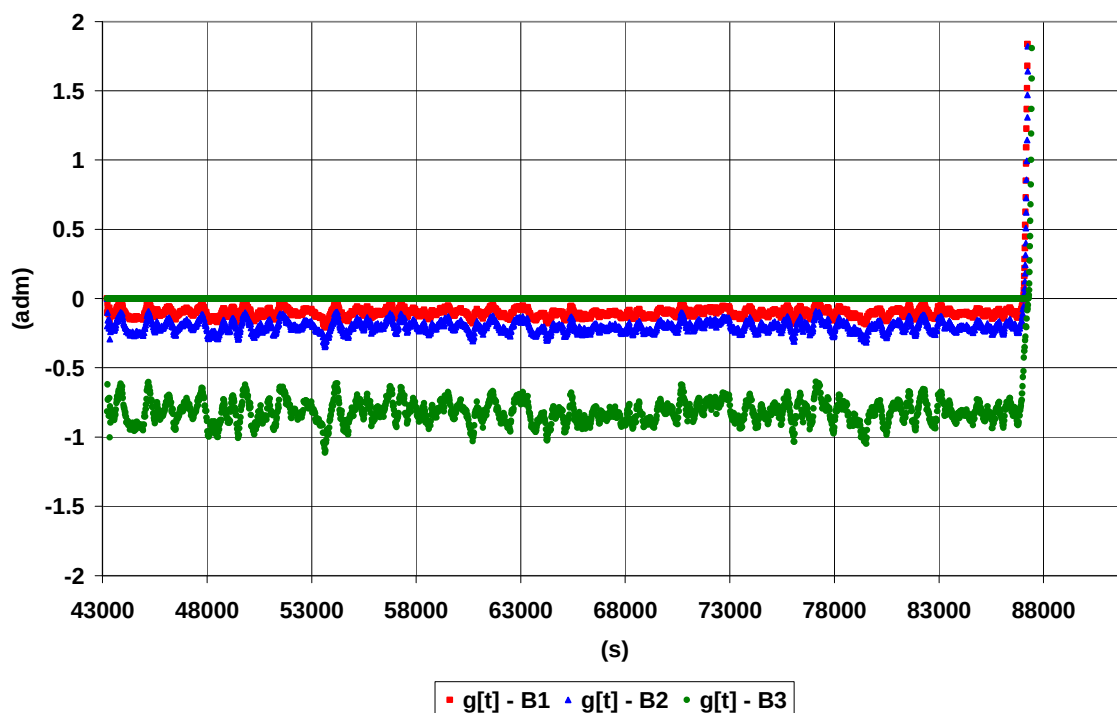


Figura III.7 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à entrada, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

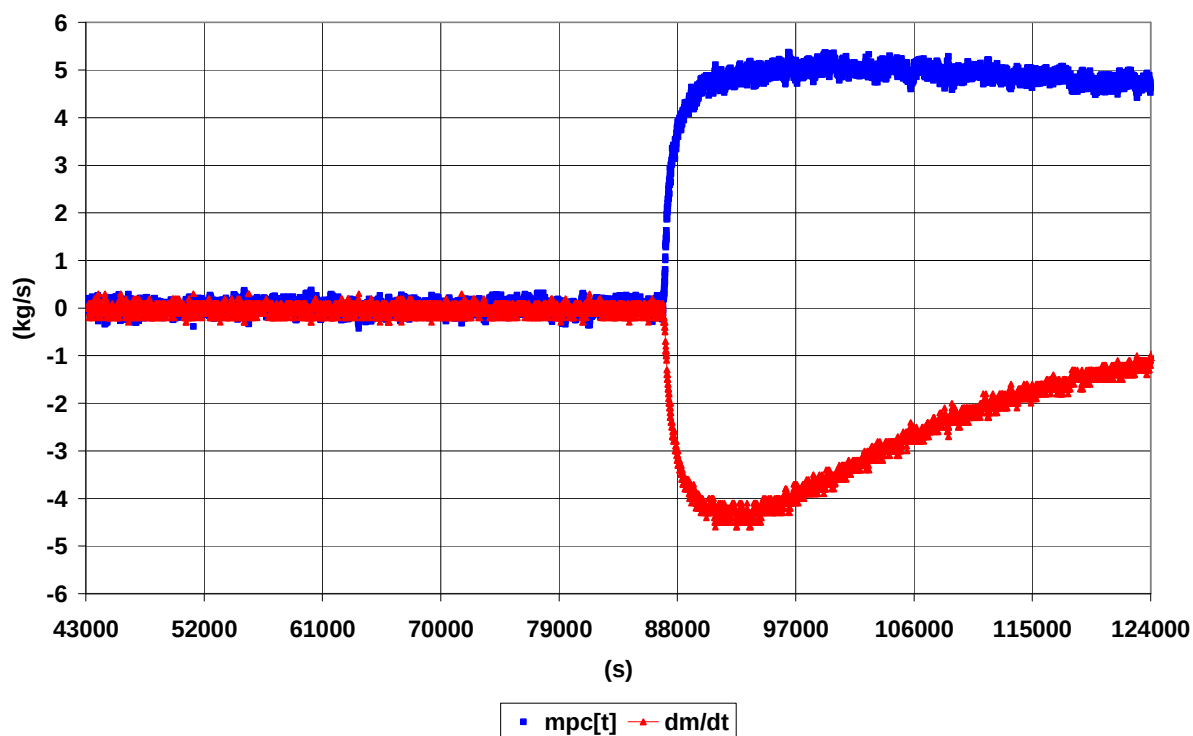


Figura III.8 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à entrada, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,3 in, próximo ao meio:

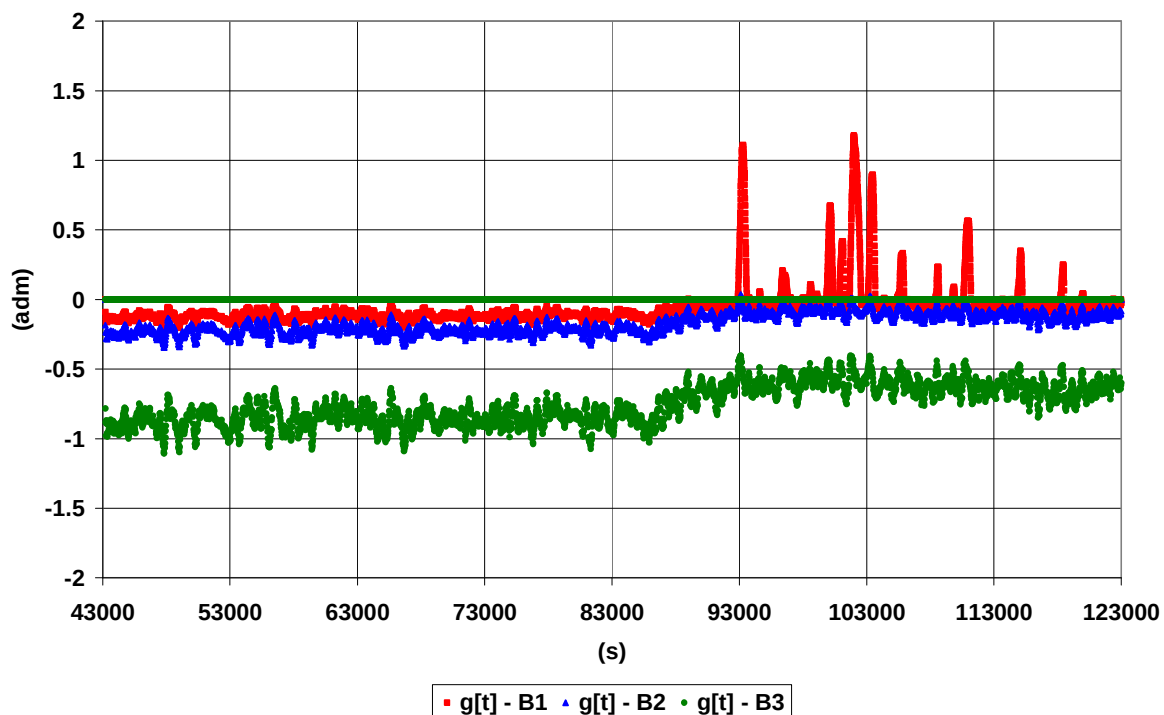


Figura III.9 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

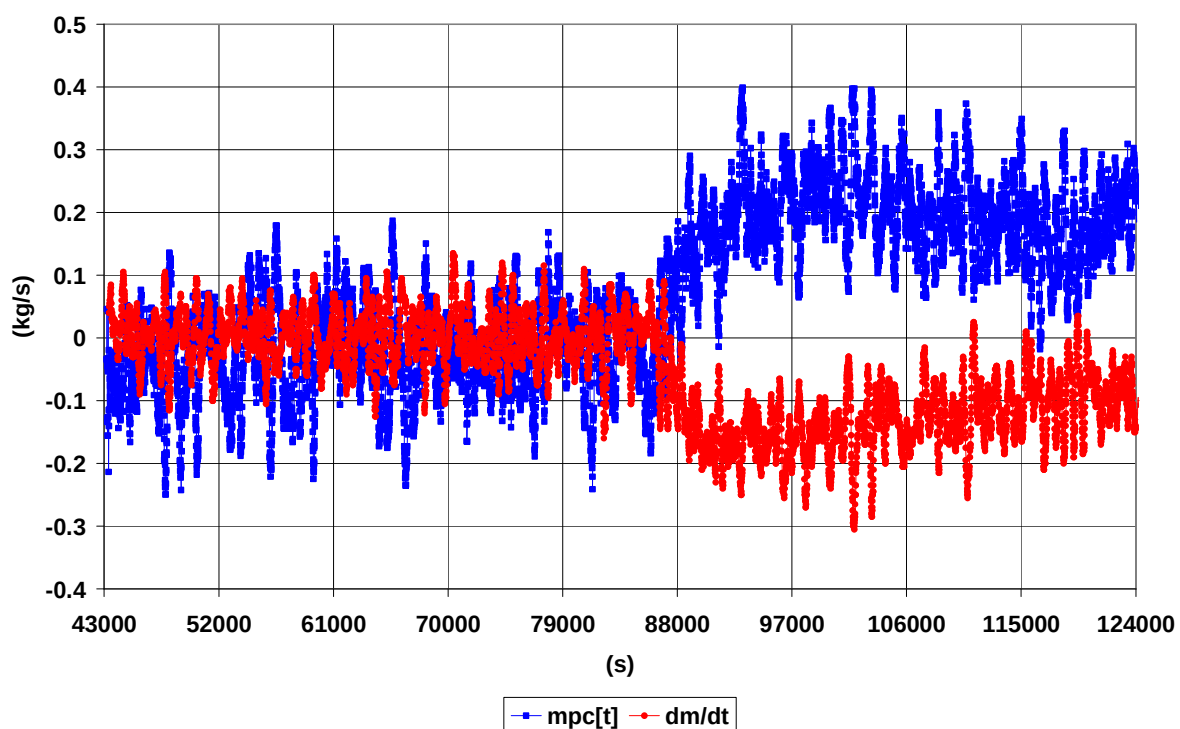


Figura III.10 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,5 in, próximo ao meio:

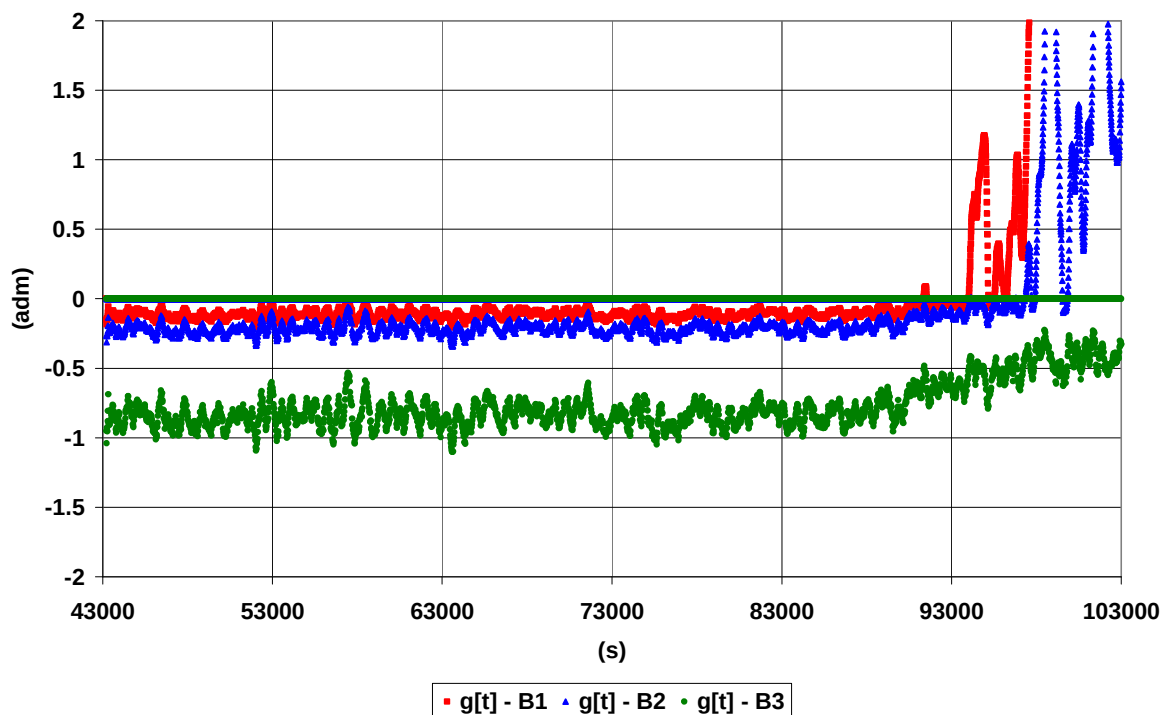


Figura III.11 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

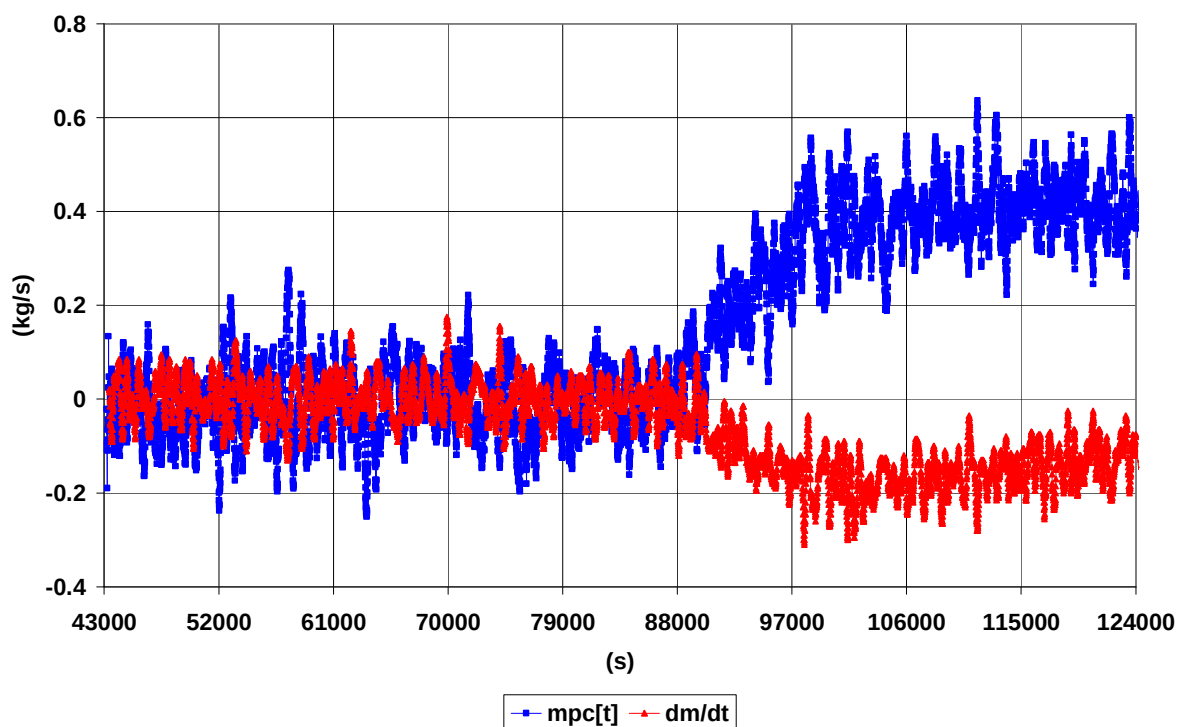


Figura III.12 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo ao meio:

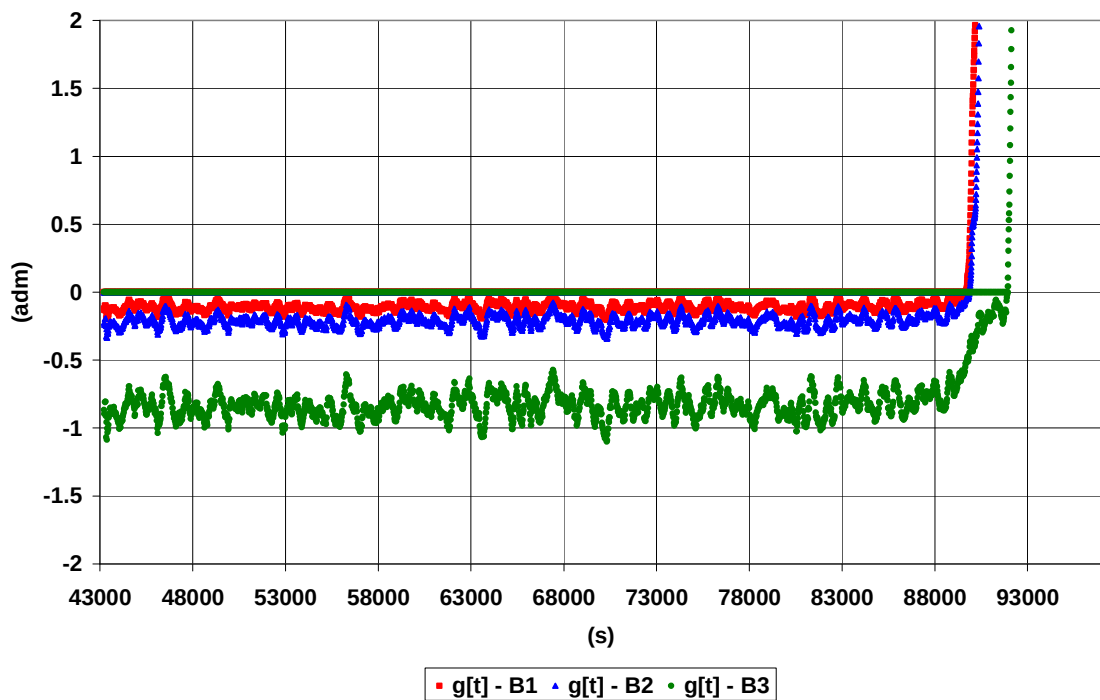


Figura III.13 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

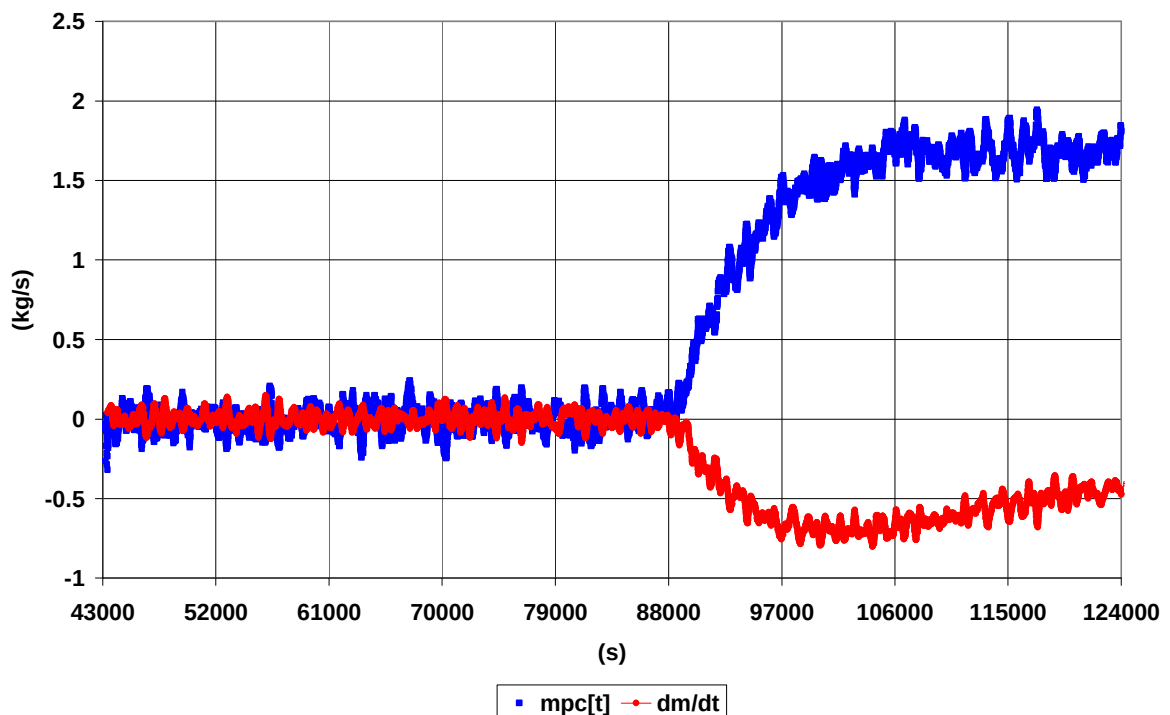


Figura III.14 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,5 in, próximo ao meio:

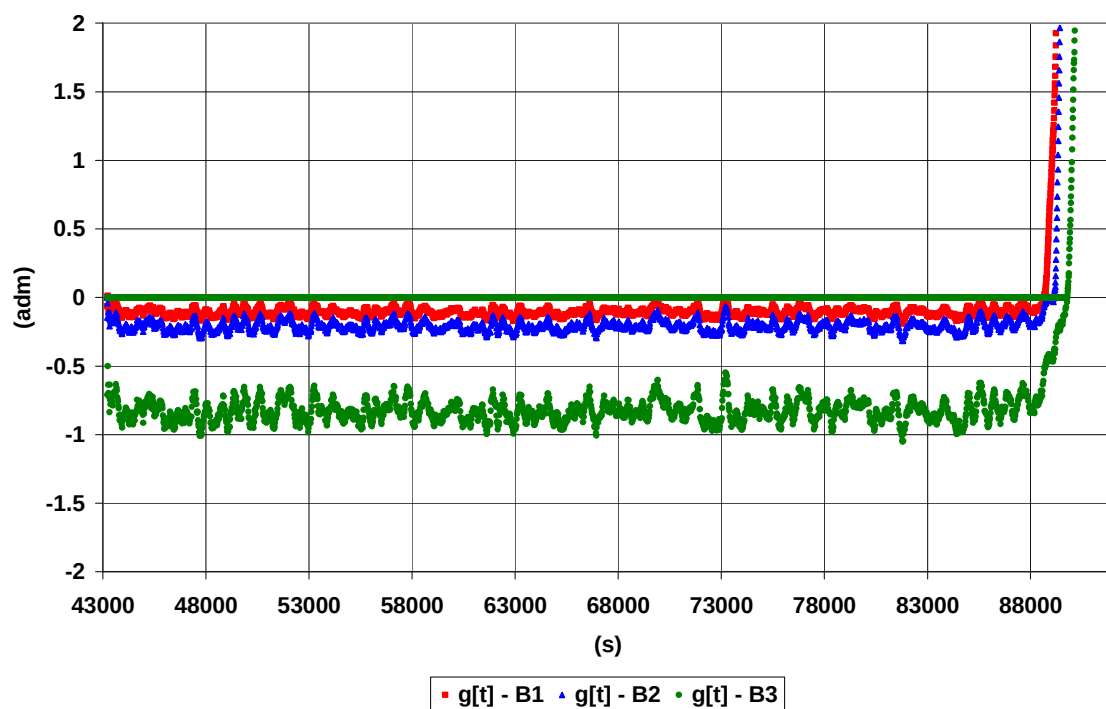


Figura III.15 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo ao meio, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

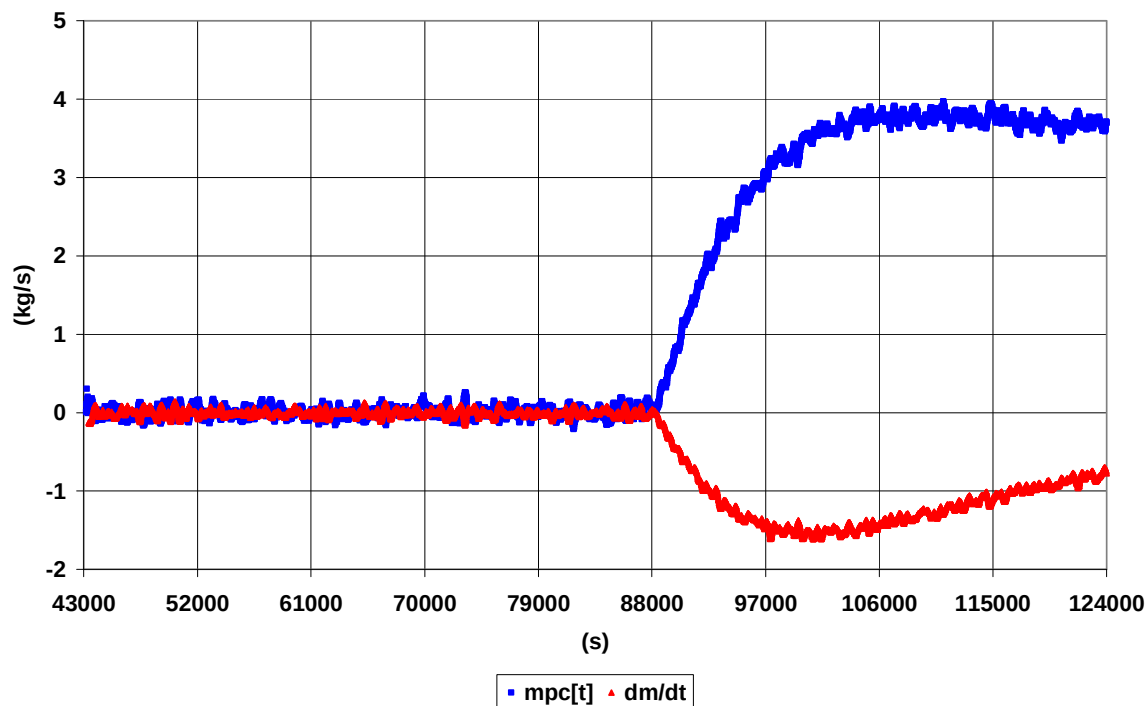


Figura III.16 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo ao meio, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,3 in, próximo à saída:

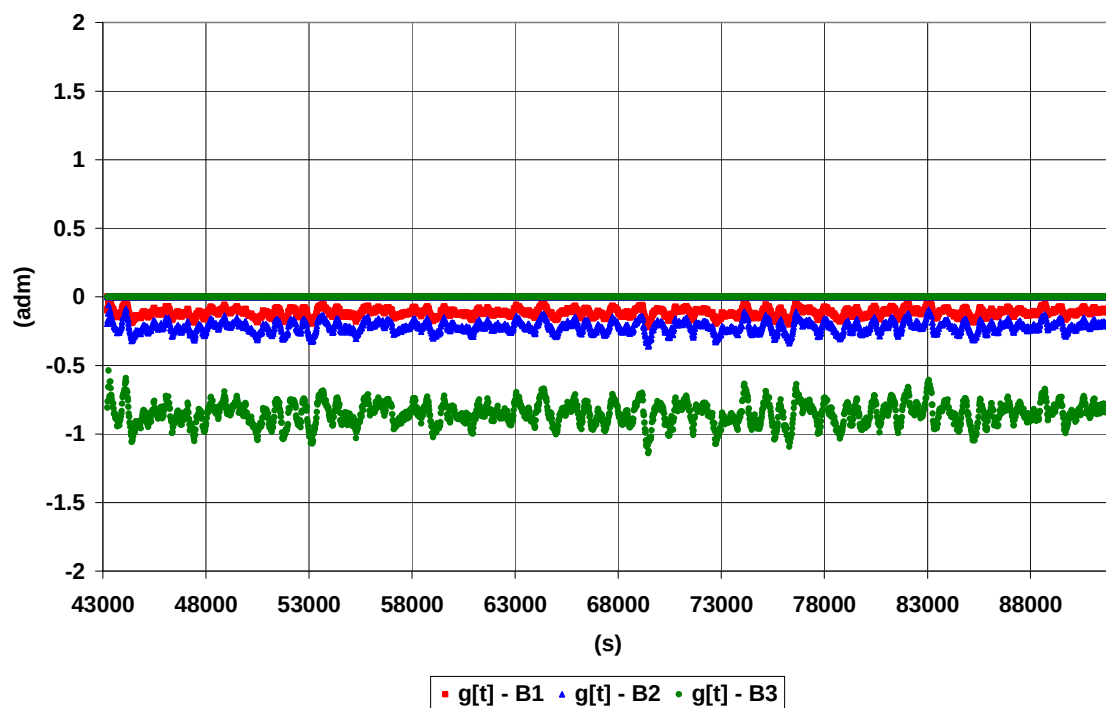


Figura III.17 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

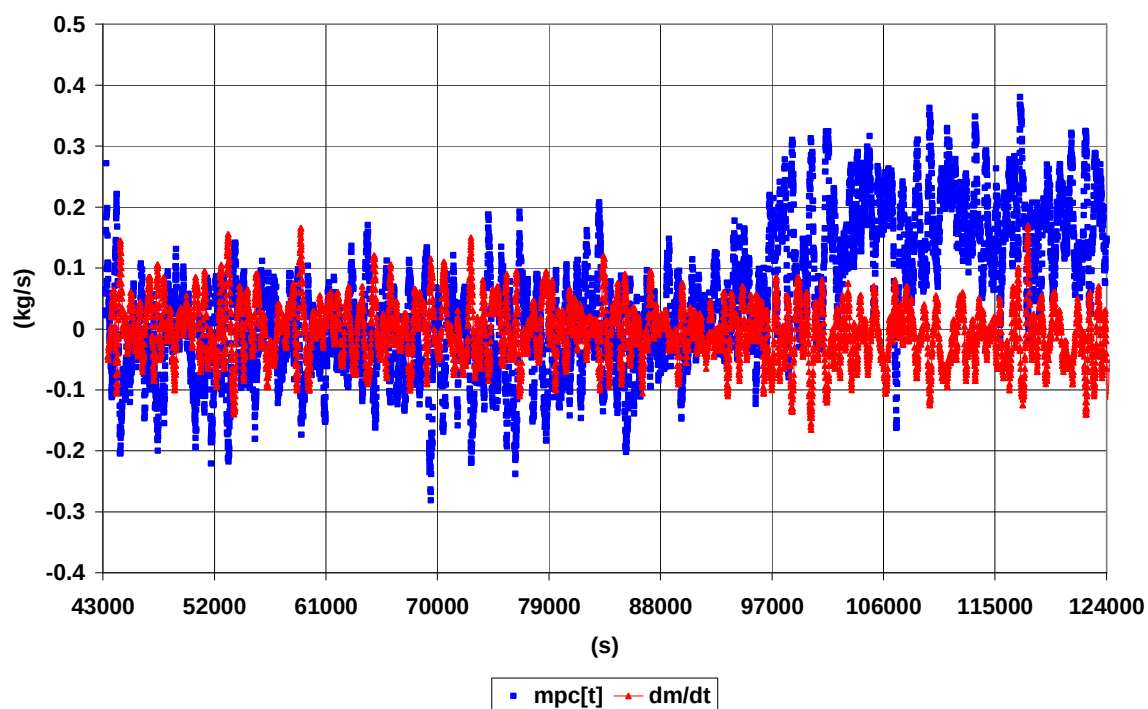


Figura III.18 – Segmento ML, furo de 0,3 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,5 in, próximo à saída:

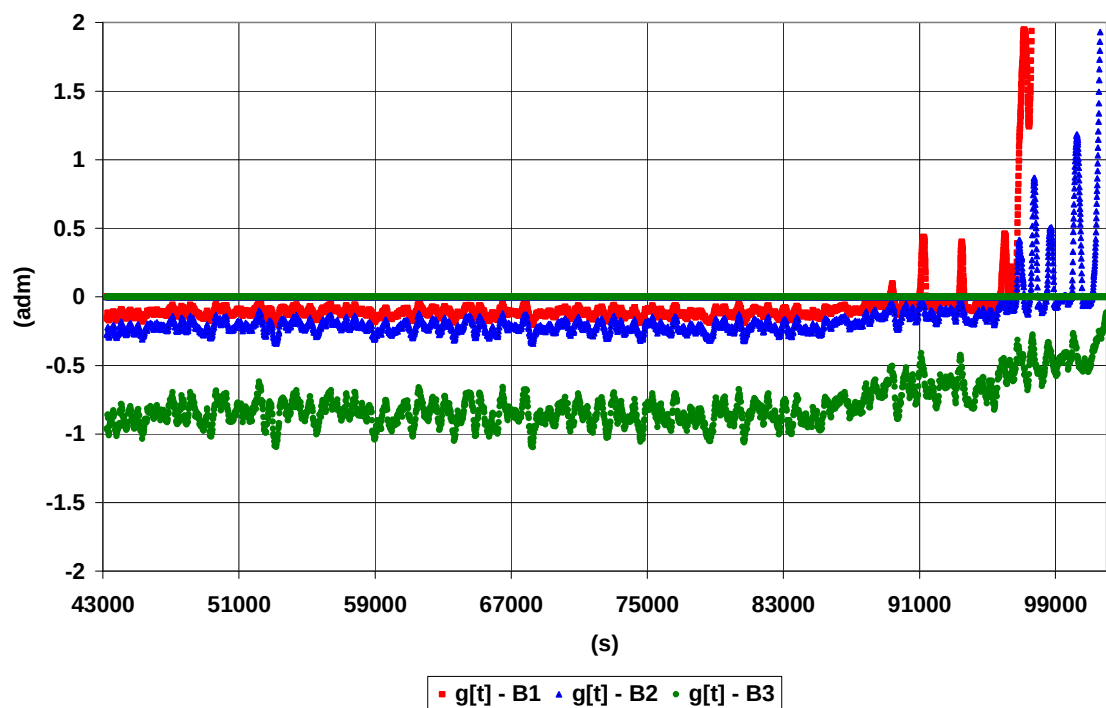


Figura III.19 – Segmento ML, furo de 0,5 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

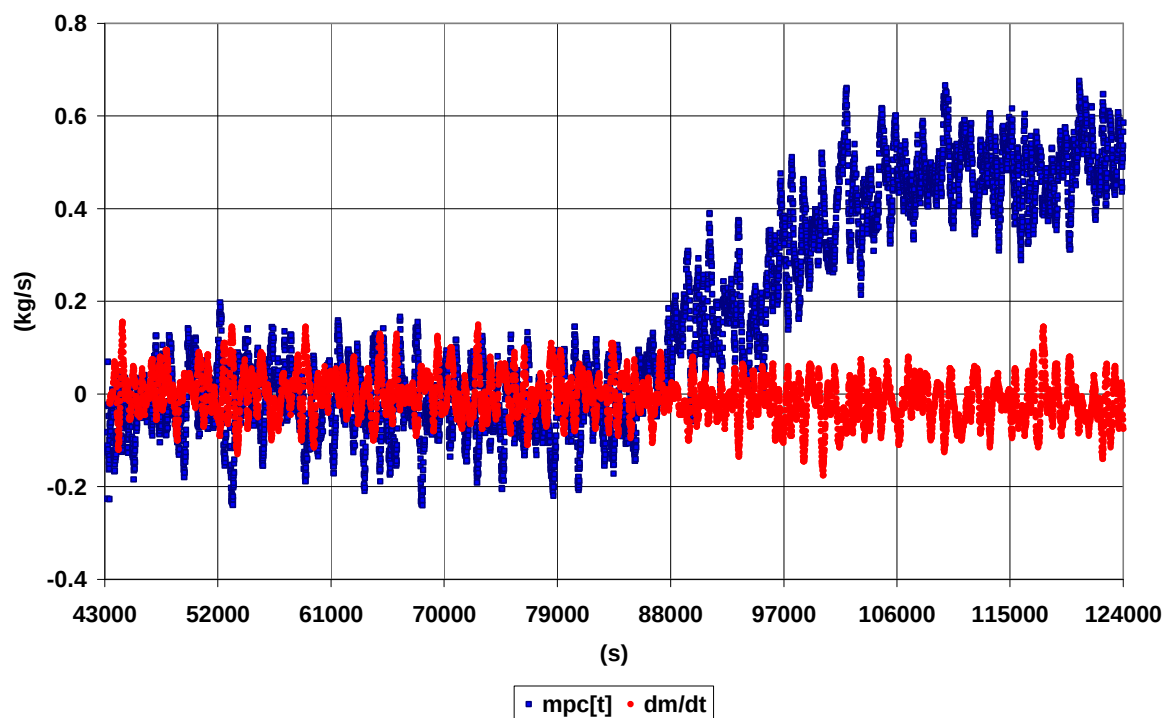


Figura III.20 – Segmento PL, furo de 0,5 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times \dot{m}_{total} / dt$

Furo 1,0 in, próximo à saída:

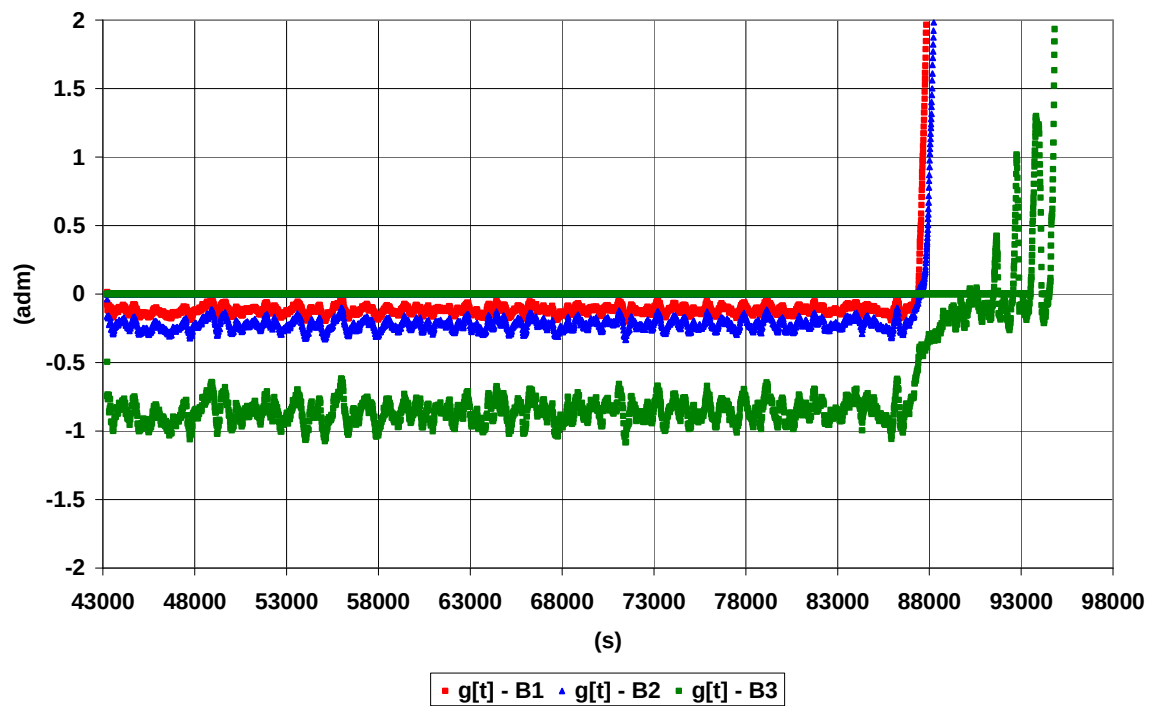


Figura III.21 – Segmento ML, furo de 1,0 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

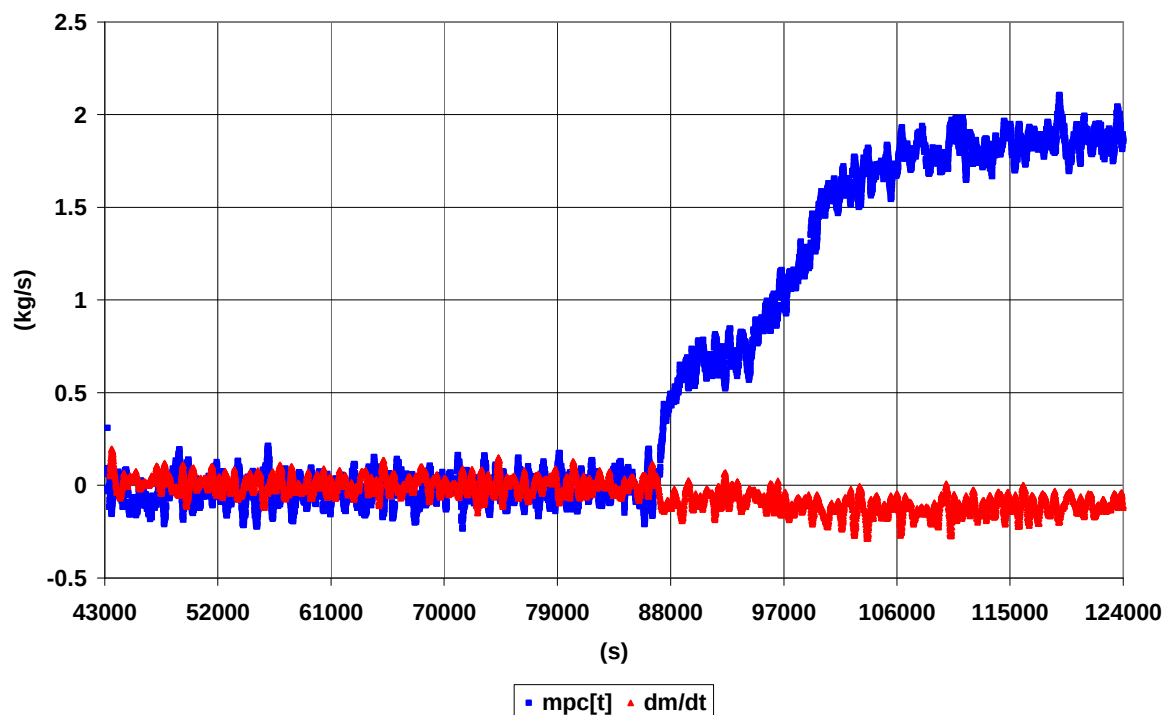


Figura III.22 – Segmento PL, furo de 1,0 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times \dot{m}_{total} / dt$

Furo 1,5 in, próximo à saída:

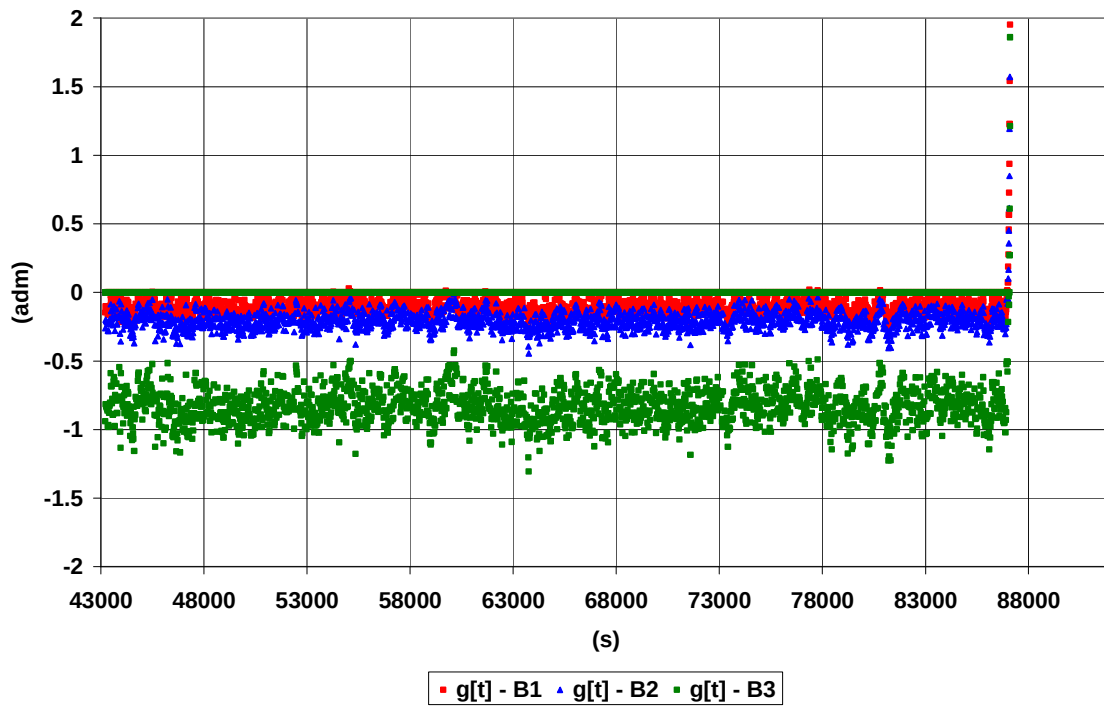


Figura III.23 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à saída, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

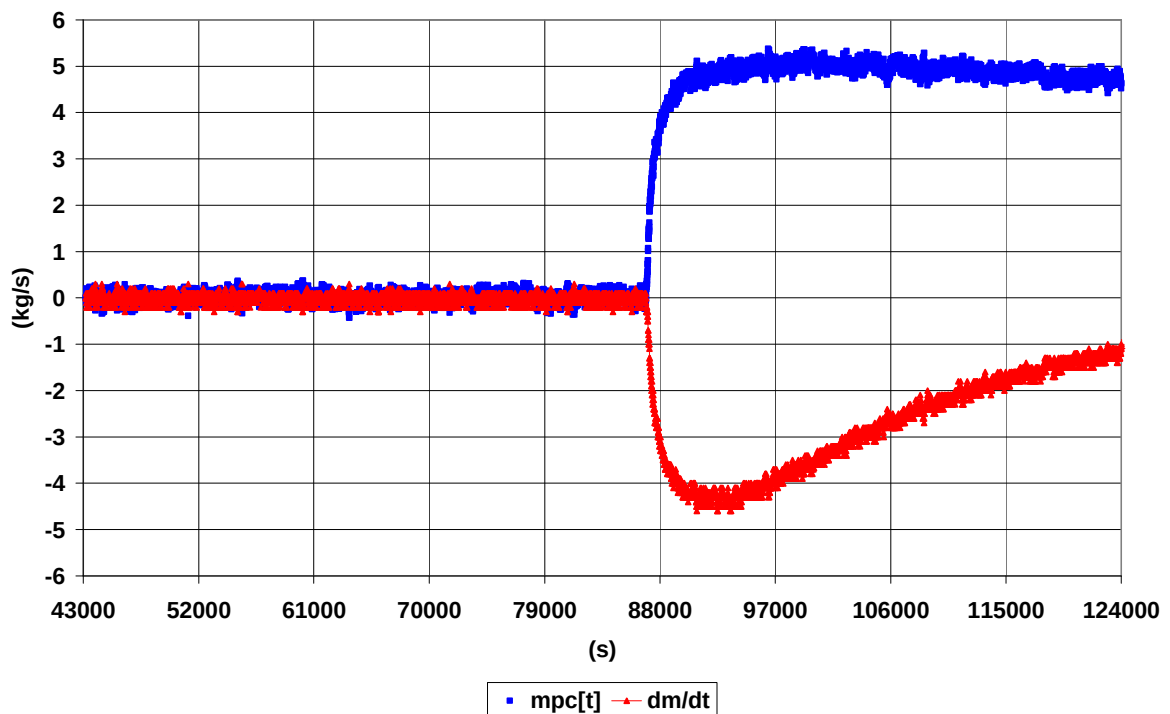


Figura III.24 – Segmento ML, furo de 1,5 in, próximo à saída, $\dot{m}_C[t] \times \partial m_{total} / \partial t$

Anexo IV – Gráficos para o segmento ML, regime transiente

Furo 0,30 in, próximo ao meio, empacotamento:

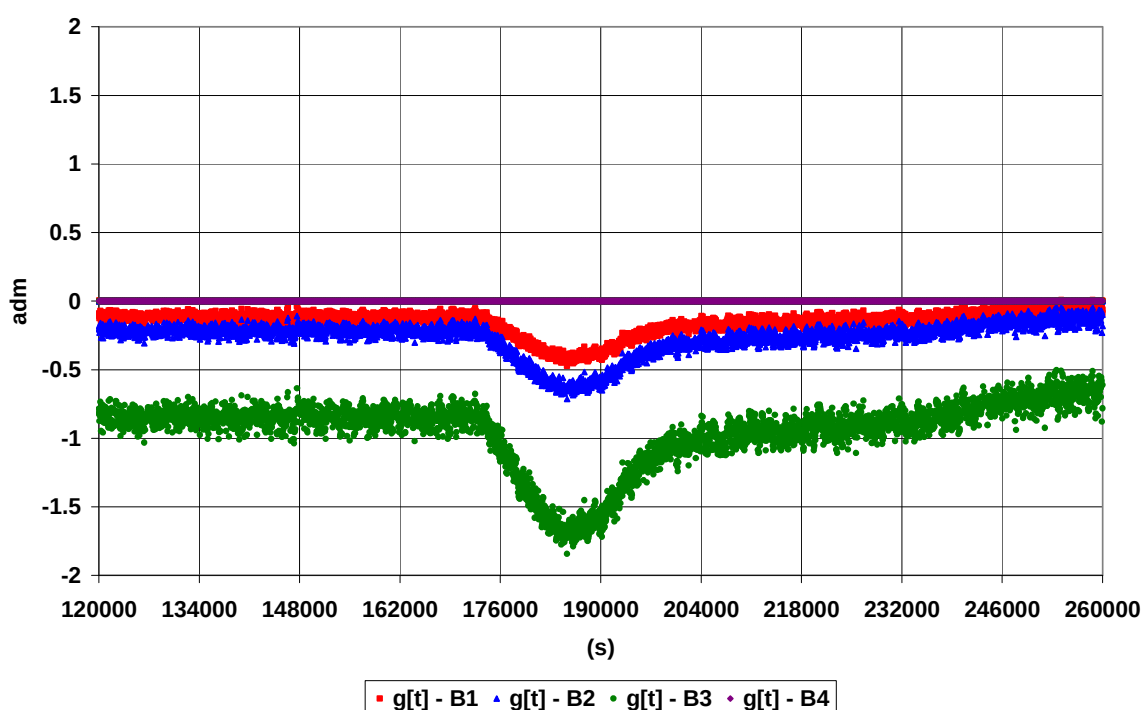


Figura IV.1 – Segmento ML, 0,30 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

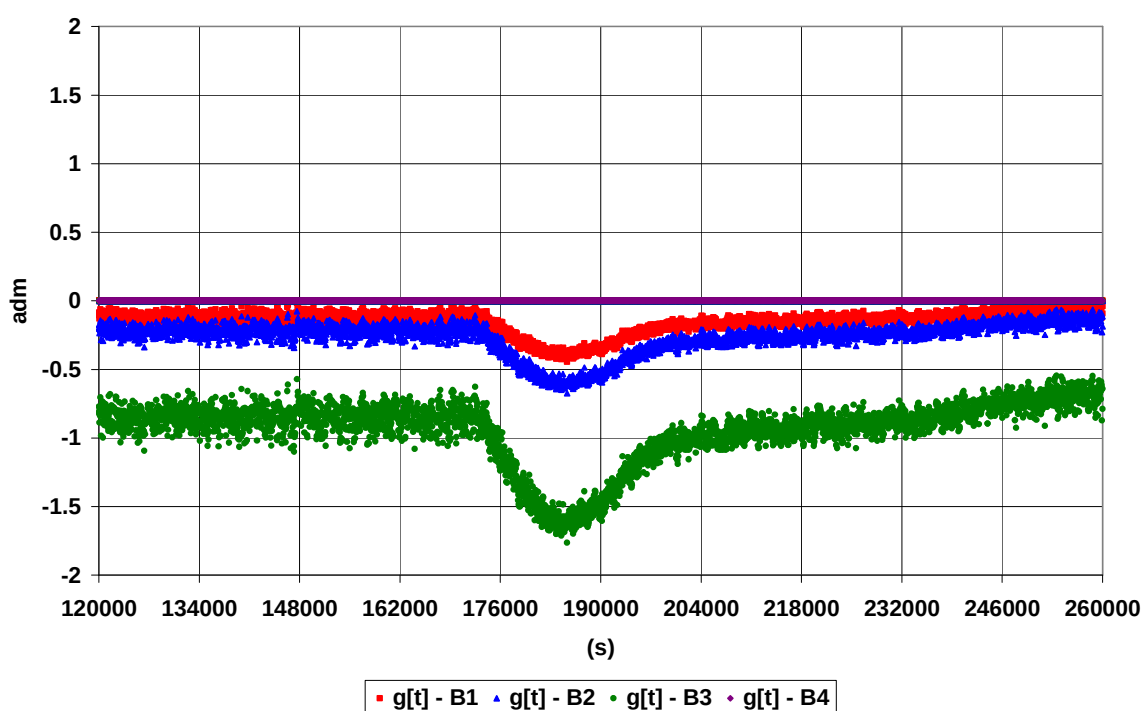


Figura IV.2 – Segmento ML, 0,30 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

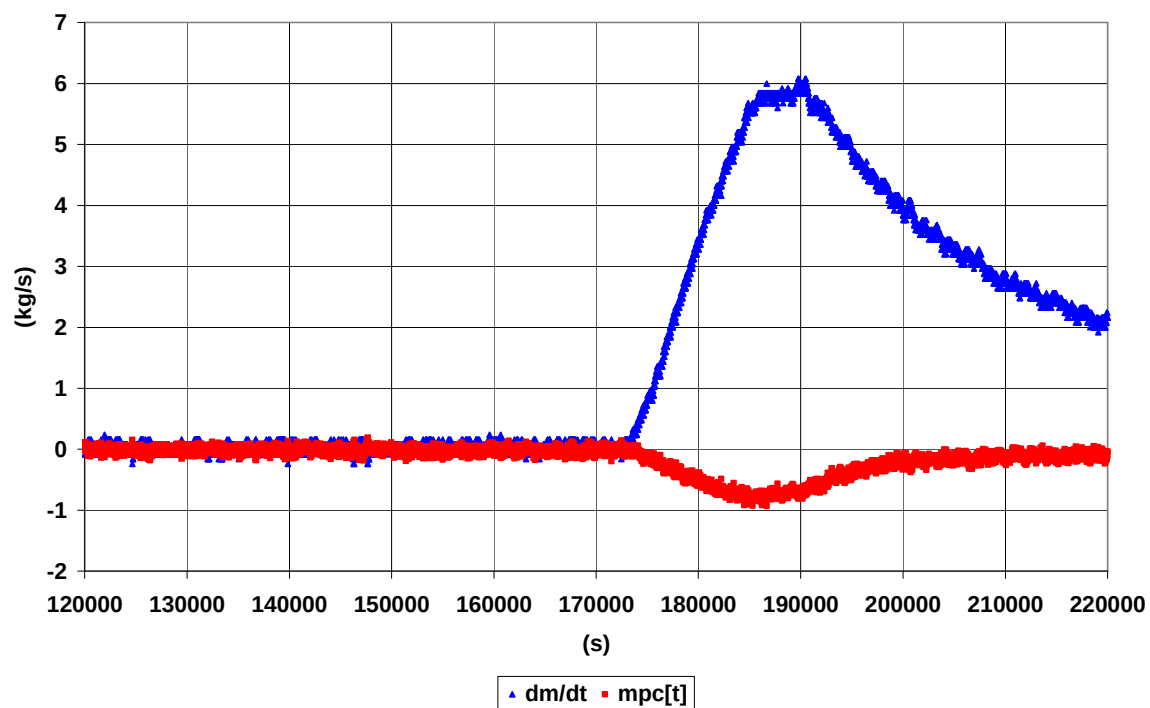


Figura IV.3 – Segmento ML, 0,30 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 0,50 in, próximo ao meio, empacotamento:

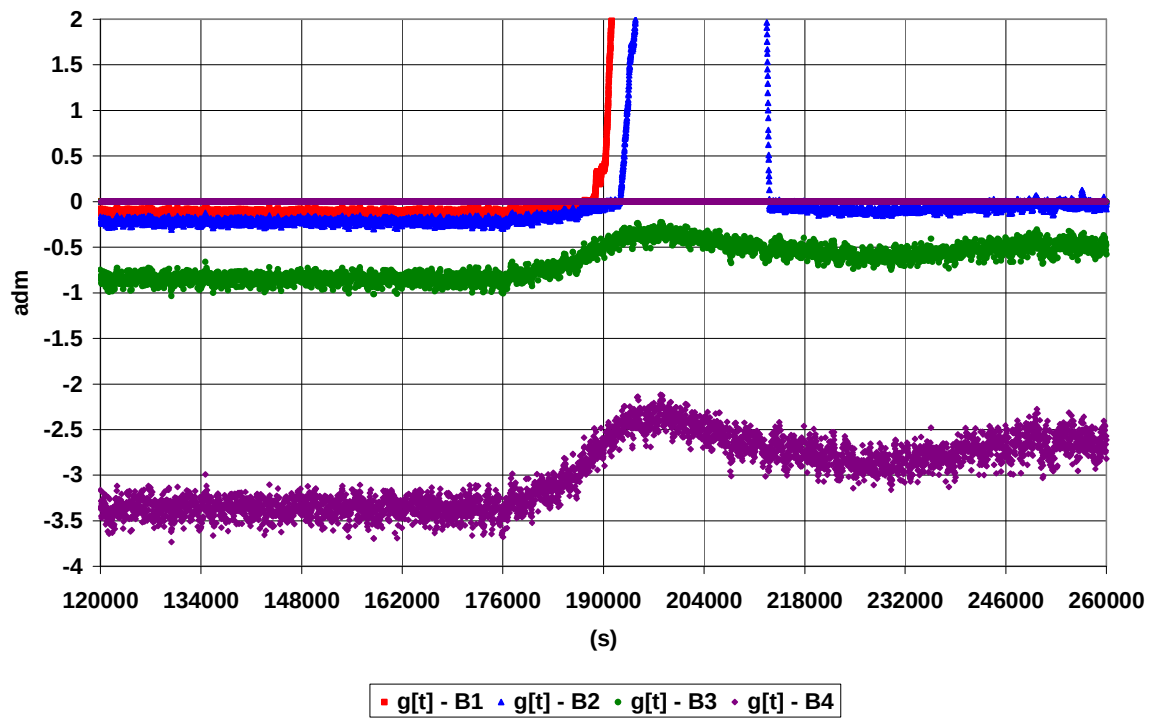


Figura IV.4 – Segmento ML, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

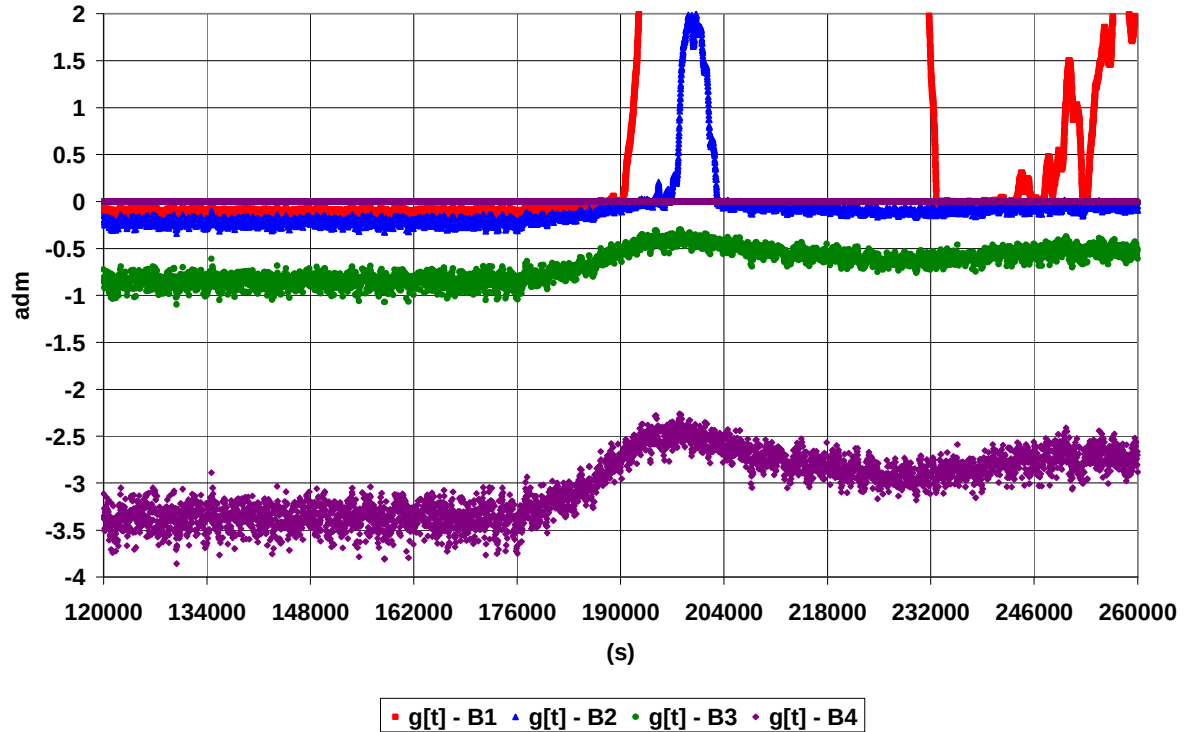


Figura IV.5 – Segmento ML, 0,50 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

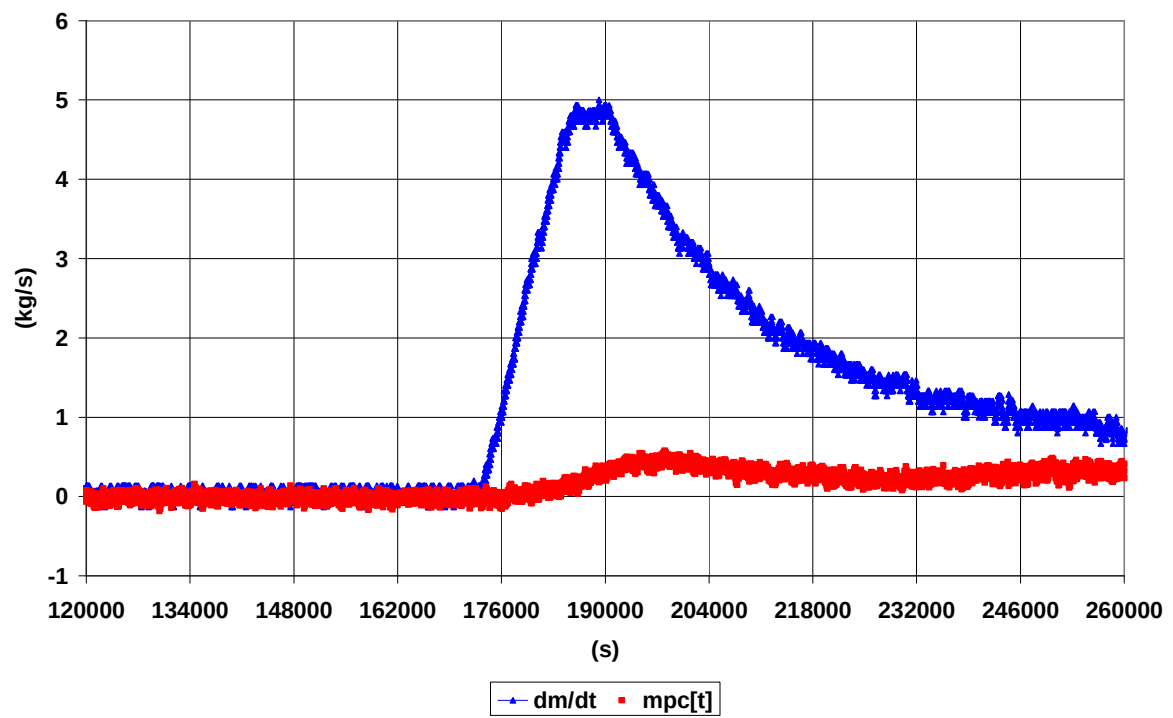


Figura IV.6 – Segmento ML, 0,50 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo ao meio, empacotamento:

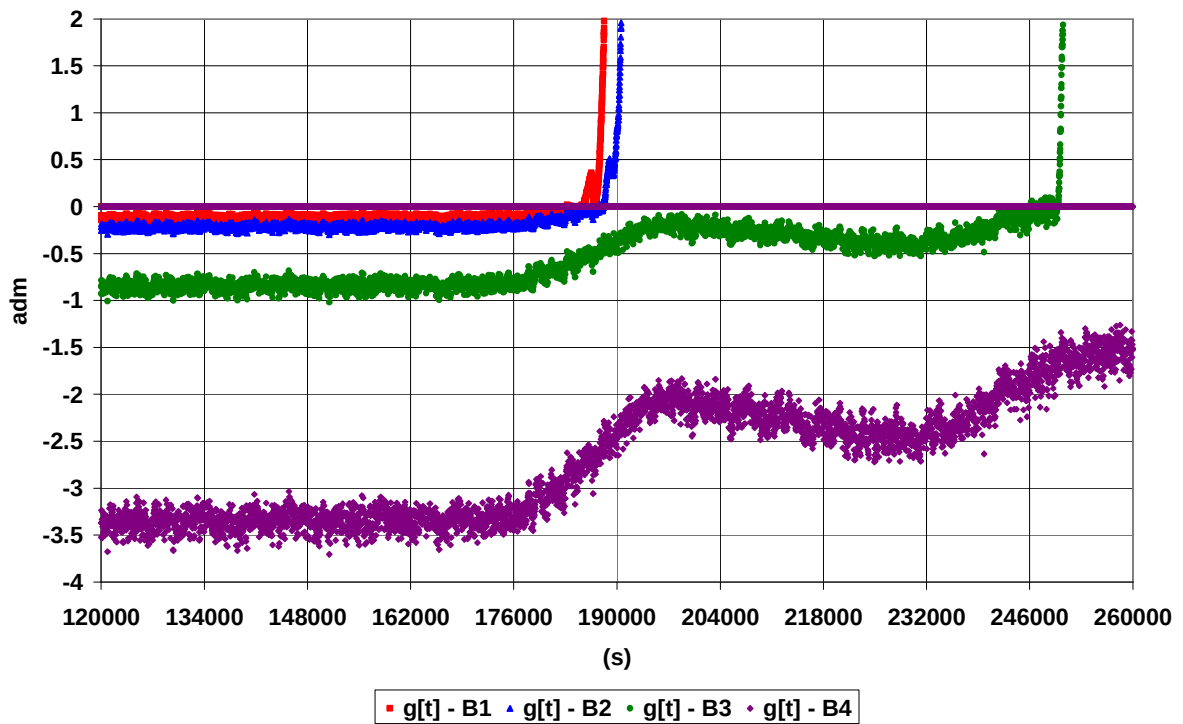


Figura IV.7 – Segmento ML, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

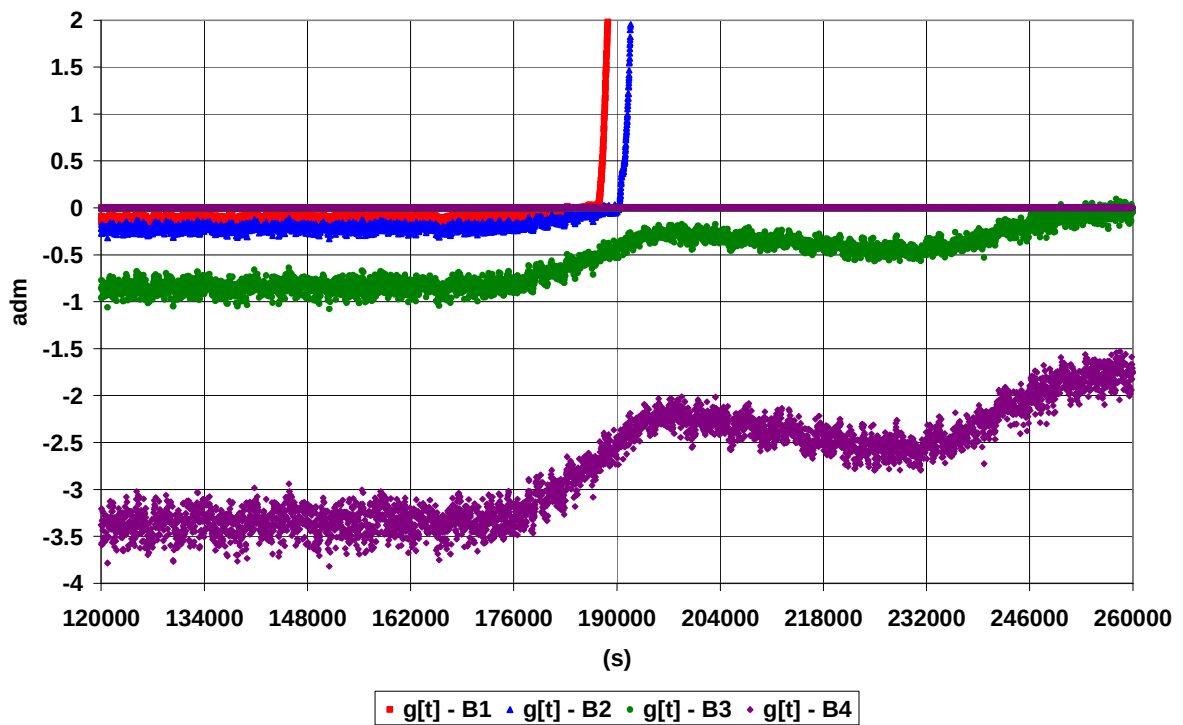


Figura IV.8 – Segmento ML, 1,0 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

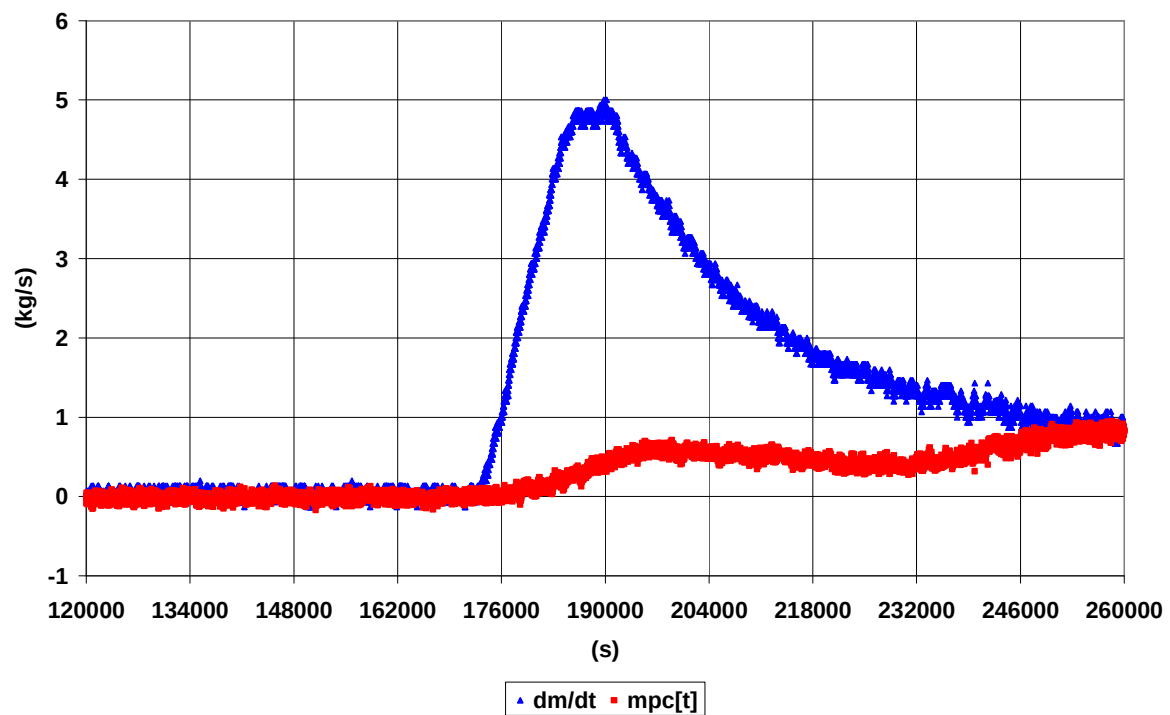


Figura IV.9 – Segmento ML, 1,0 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,5 in, próximo ao meio, empacotamento:

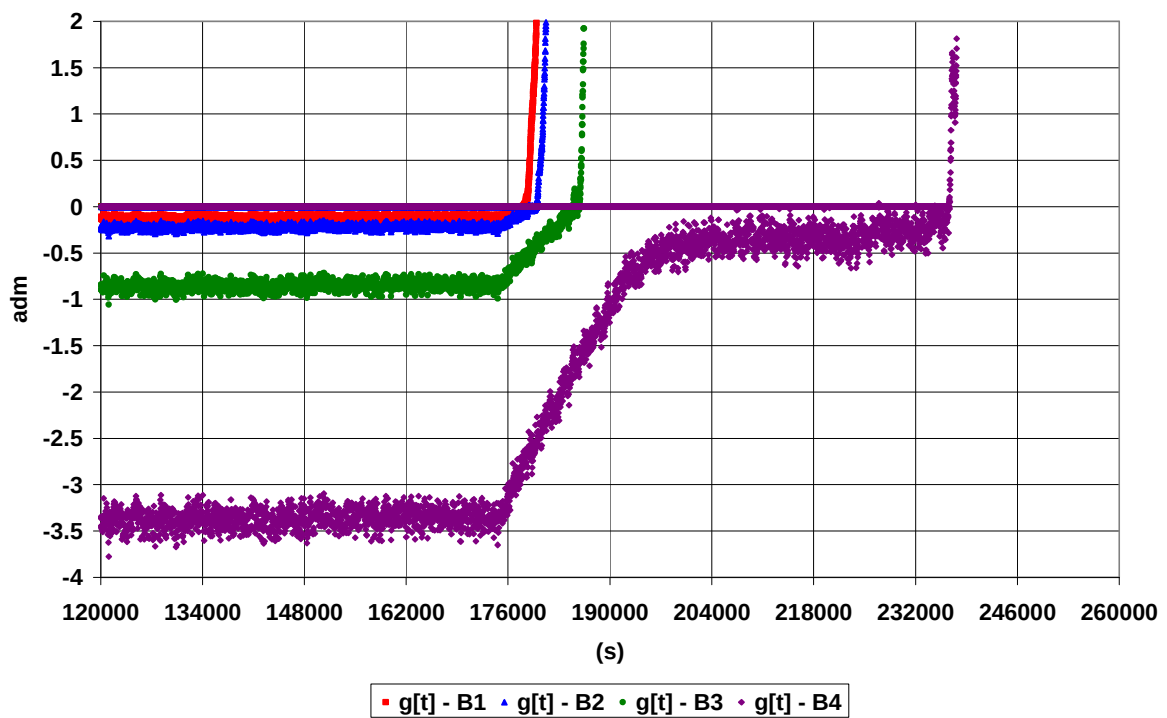


Figura IV.10 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

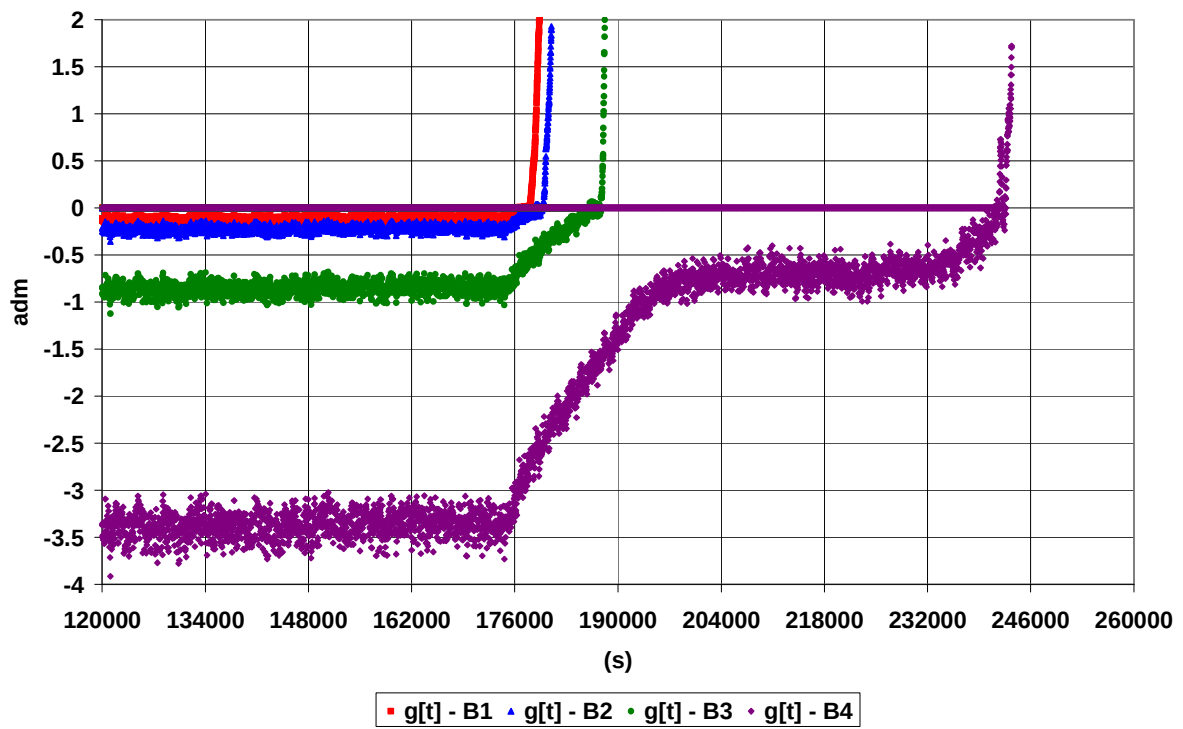


Figura IV.11 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

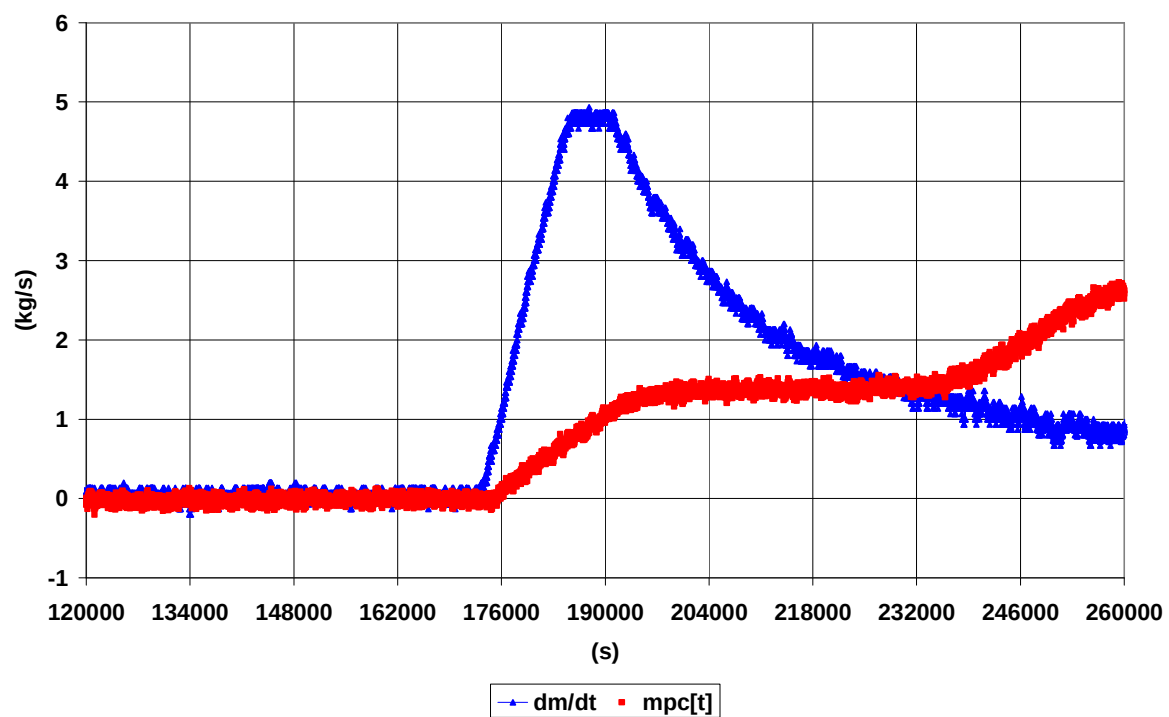


Figura IV.12 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times \dot{m}_{total}/dt$

Furo 0,50 in, próximo ao meio, desempacotamento:

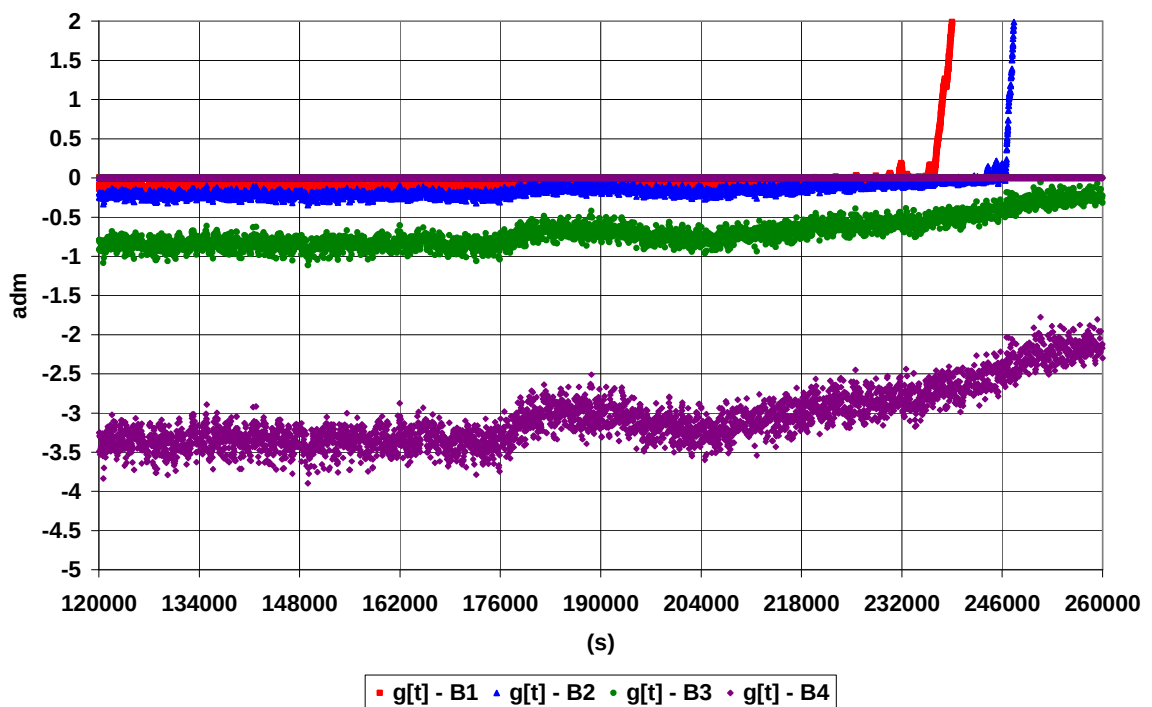


Figura IV.13 – Segmento ML, 0,5 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

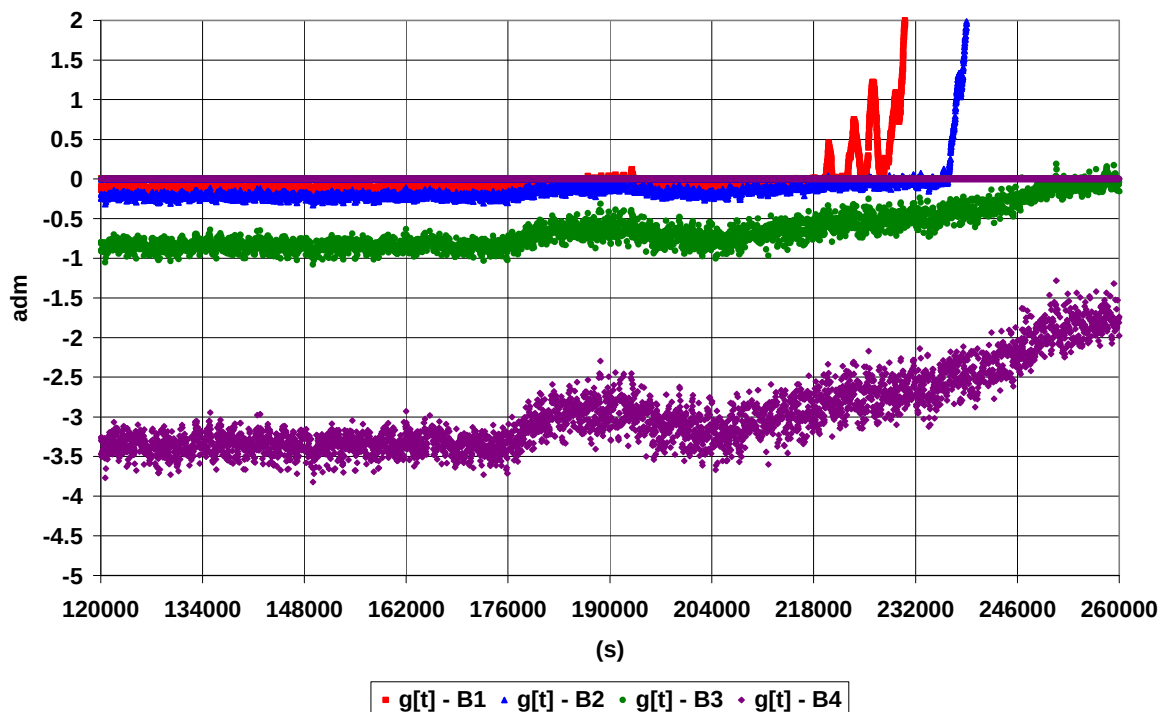


Figura IV.14 – Segmento ML, 0,5 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

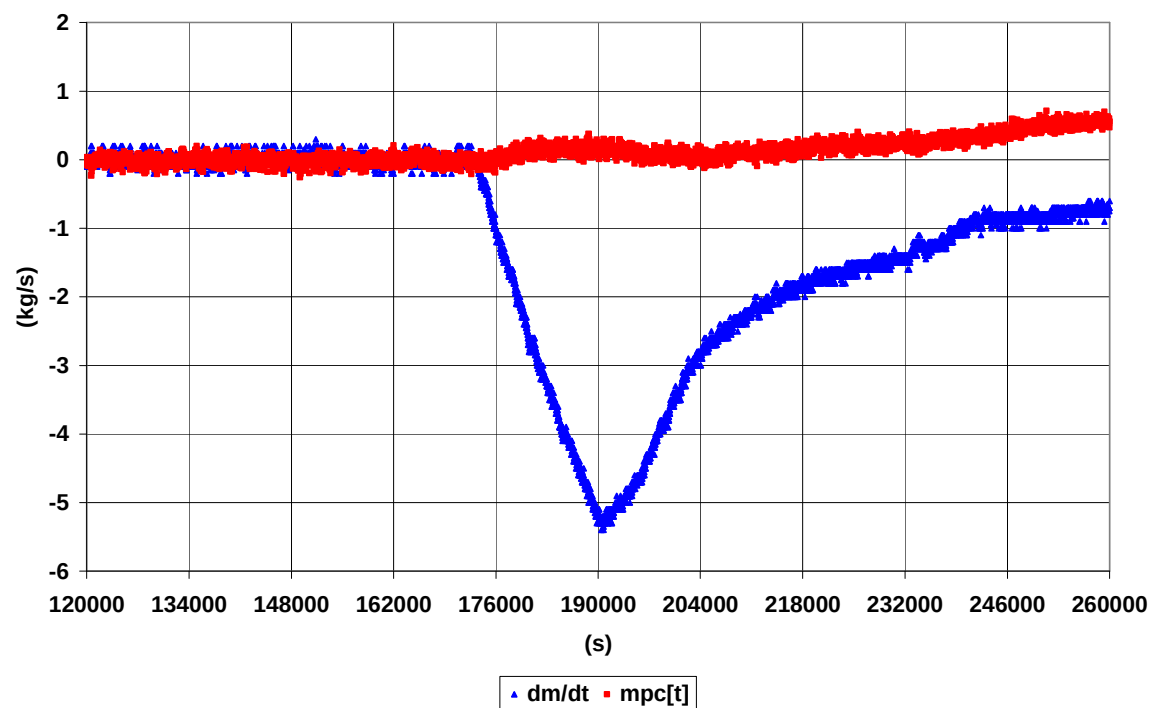


Figura IV.15 – Segmento ML, 0,5 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,0 in, próximo ao meio, desempacotamento:

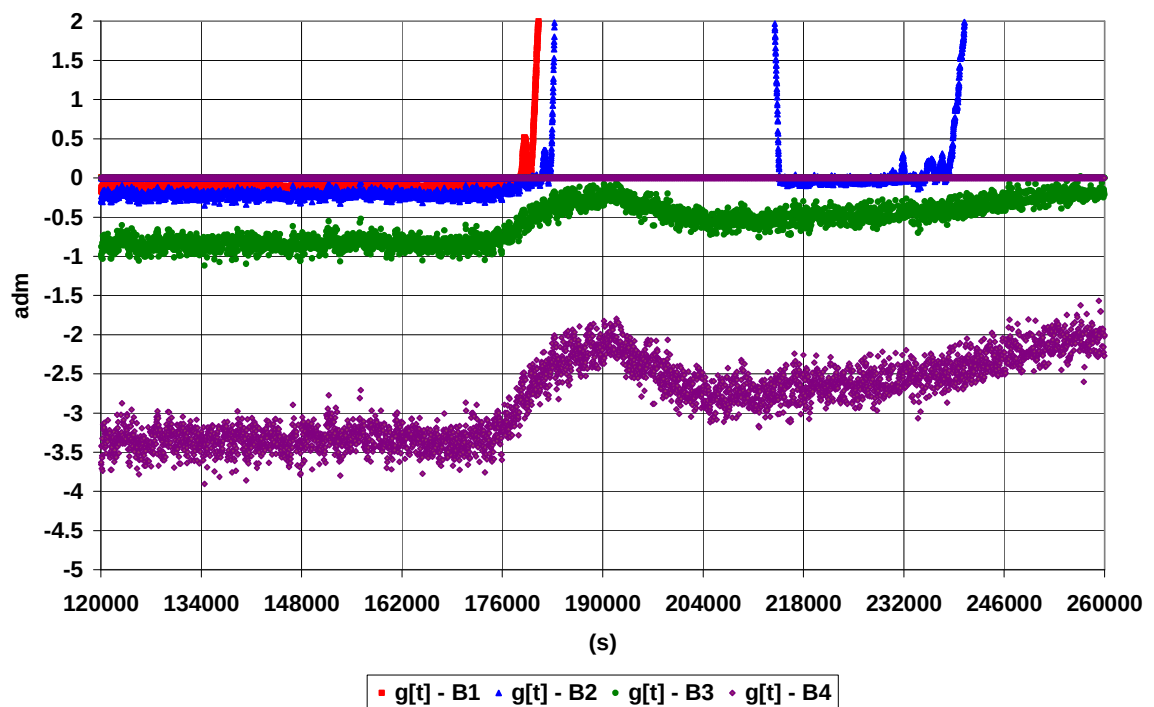


Figura IV.16 – Segmento ML, 1,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

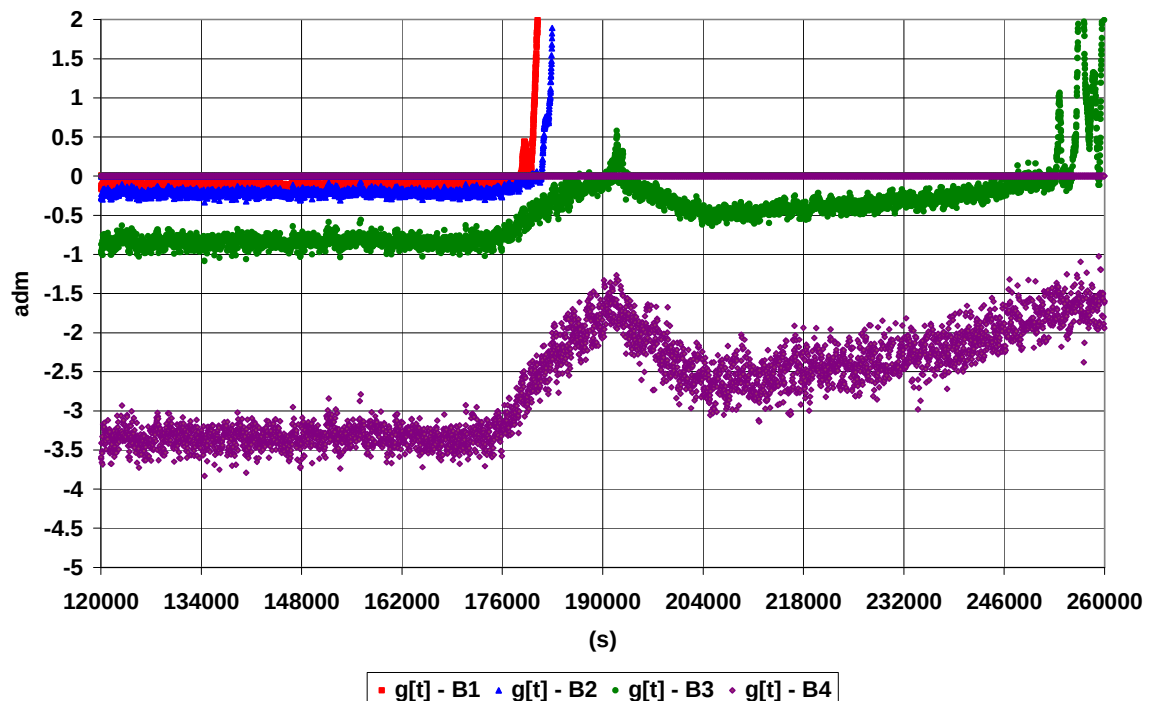


Figura IV.17 – Segmento ML, 1,0 in, meio, desempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

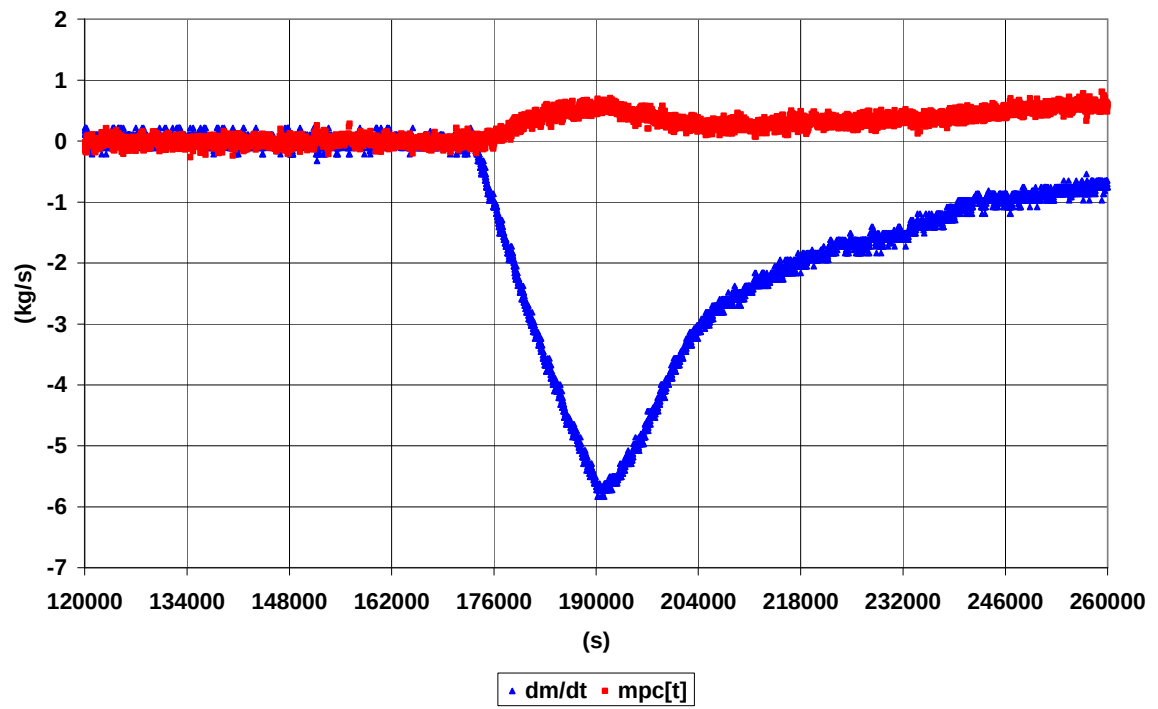


Figura IV.18 – Segmento ML, 1,0 in, meio, desempacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$

Furo 1,5 in, próximo ao meio, desempacotamento:

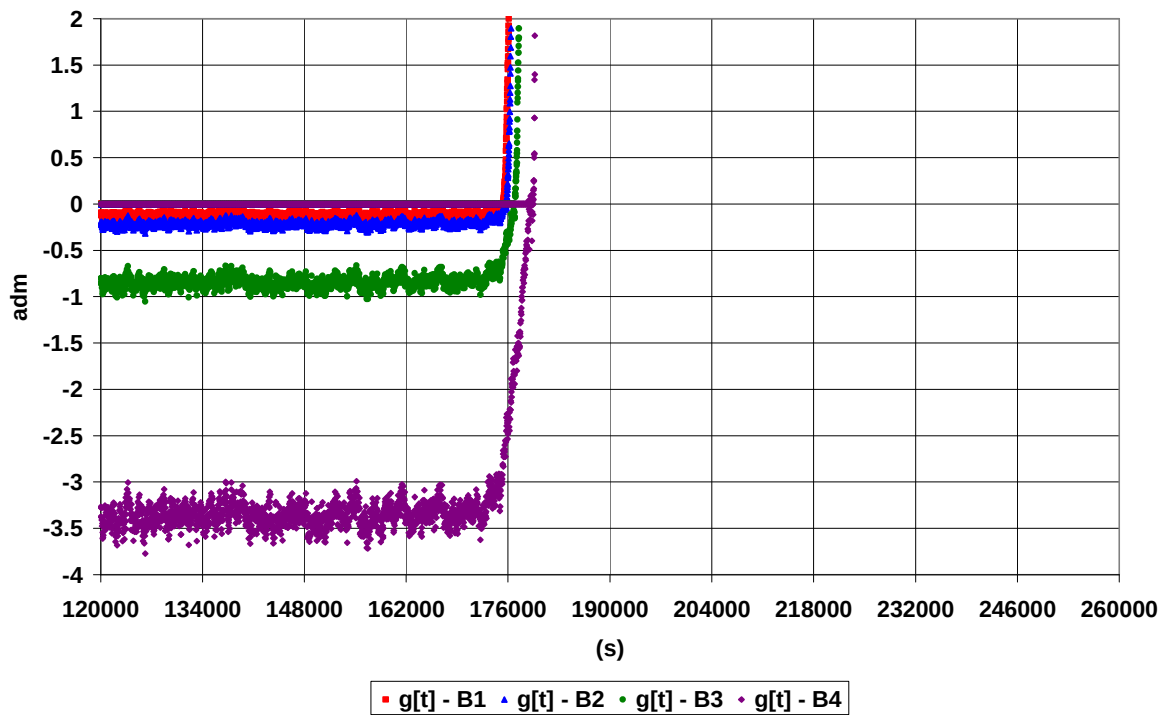


Figura IV.19 – Segmento ML, 1,5 in, meio, desempacotamento, ref. vazão nominal, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

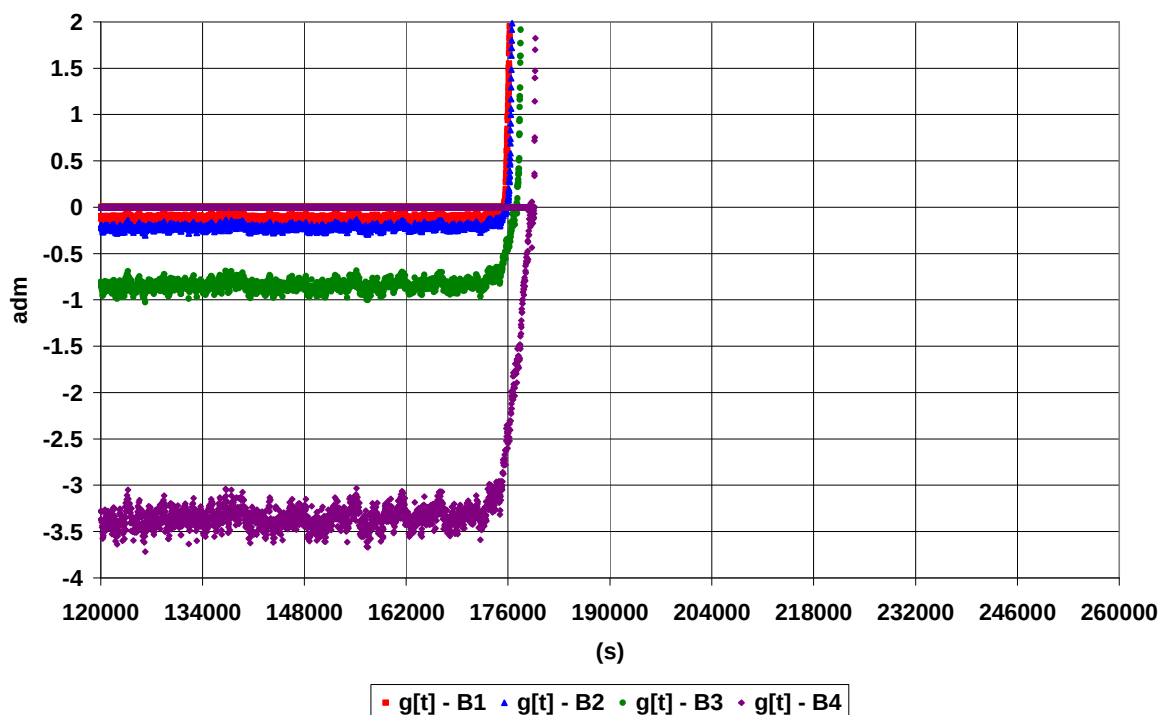


Figura IV.20 – Segmento ML, 1,5 in, meio, dempacotamento, ref. vazão momentânea, funções $g[t]$ para diferentes batentes de $\dot{m}_{vaz}$

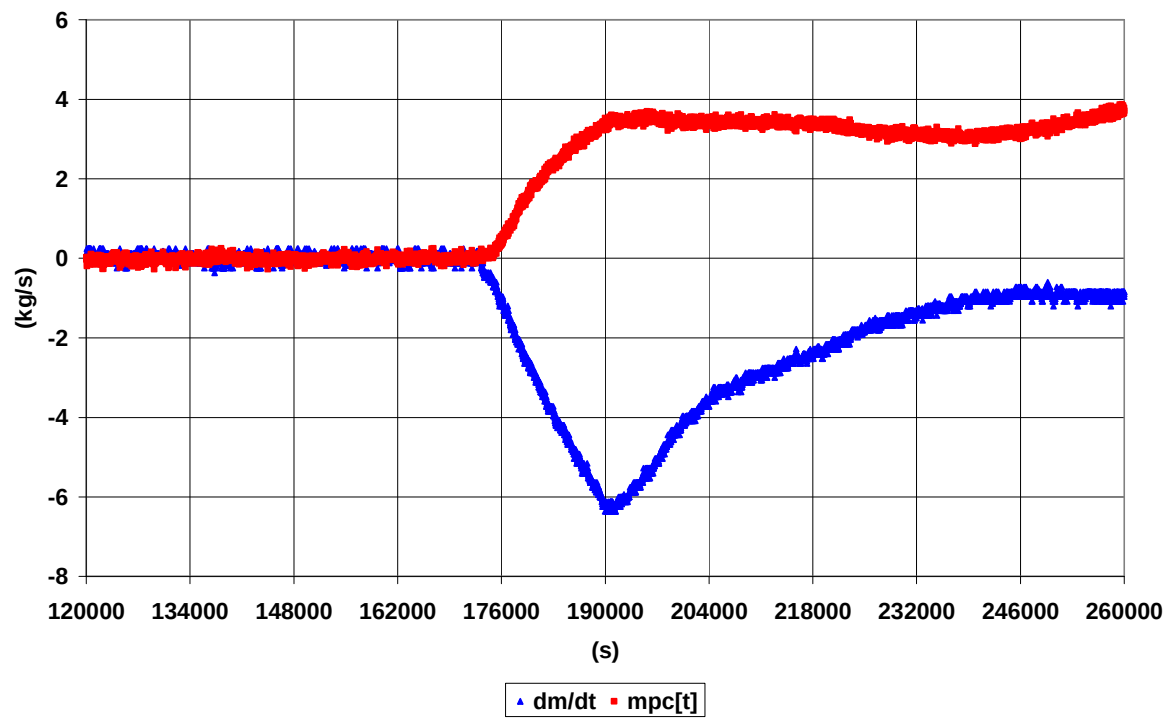


Figura IV.21 – Segmento ML, 1,5 in, meio, empacotamento, $\dot{m}_C[t] \times dm_{total}/dt$