

Thiago Lessa Aramaki

# Desenvolvimento e Validação de Métodos de Detecção e Localização de Vazamentos em Oleodutos

#### Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

> Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa Co-orientador: Prof. Elcio Cruz de Oliveira

> > Rio de Janeiro Fevereiro de 2016



## Thiago Lessa Aramaki

# Desenvolvimento e Validação de Métodos de Detecção e Localização de Vazamentos em Oleodutos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa Orientador Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

> Dr. Elcio Cruz de Oliveira Co-Orientador Petrobras

Dr. António Filipe Falcão de Montalvão Petrobras

**Prof. Sidney Stuckenbruck** Olympus Software Científico e Engenharia

Prof. José Franco Machado do Amaral UERJ

Prof. Marcio da Silveira Carvalho Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de fevereiro de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

#### Thiago Lessa Aramaki

Formado em engenharia elétrica com ênfase em eletrônica pelo Centro Federal Tecnológico Celso Suckow da Fonseca.

Ficha Catalográfica

Aramaki, Thiago Lessa

Desenvolvimento e validação de métodos de detecção e localização de vazamentos em oleodutos / Thiago Lessa Aramaki ; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa ; coorientador: Elcio Cruz de Oliveira. – 2016.

138 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2016.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Detecção de vazamento. 3. Localização de vazamento. 4. Balanço de massa. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Oliveira, Elcio Cruz de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Dedico à equipe de operação do centro de controle da Transpetro que pelos desafios encontrados fizeram com que eu buscasse sempre por melhorias no processo.

#### Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por me propiciar os caminhos que me levaram aqui.

A minha família toda em especial, a minha esposa, Venusa Angélica Machado Rocha, por seu apoio constante durante todo o curso e momentos de escrita desta dissertação. Principalmente pelas pequenas ausências. Sem o seu apoio incondicional não seria possível ter paz de espírito para execução deste trabalho e nem a infraestrutura necessária para realização do mesmo. Obrigado por me acompanhar em mais uma etapa.

Aos meus colegas de trabalho que permitiram e permitem até hoje, mesmo nas conversas de cafezinho, trocar ideias sobre assuntos diversos e que fazem do ambiente de trabalho um ambiente confortável e prazeroso. Agradeço a equipe toda por fomentar o desenvolvimento de ferramentas de apoio a operação que fiz e faço até hoje com muito prazer. Em especial, destaco a presença do colega e amigo, António Filipe Falcão de Montalvão pela parceria desses quase oito anos de engenharia no centro de controle da Transpetro. Foi e é grande motivador das minhas ideias.

Ao meu orientador Professor Carlos Roberto Hall Barbosa pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

A todos os professores e demais integrantes do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. O ambiente proporcionado por vocês é maravilhoso. Mesmo com um corpo técnico tão qualificado, não percebi em nenhum momento egos e vaidades exacerbadas.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

#### Resumo

Aramaki, Thiago Lessa; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Orientador). Desenvolvimento e validação de métodos de detecção e localização de vazamentos em oleodutos. Rio de Janeiro, 2015. 138p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Empresas que operam dutos possuem como uma de suas premissas básicas a segurança operacional. Dentro desse quesito, alguns fatores podem levar a acidentes com possibilidade de danos materiais, ambientais e pessoais, tais como: corrosão interna e externa, escavações acidentais, operações indevidas levando o duto a pressões excessivas, assim como ações de terceiros cujo objetivo seria o furto de produtos refinados, gasolina, diesel, álcool, entre outros. Esta dissertação está alinhada com necessidades reais de empresas relacionadas ao transporte de produtos líquidos por dutos, desenvolvendo sistemas que possam vir a ser utilizados nestas empresas. Foram desenvolvidos sistemas de detecção e localização de vazamentos a serem utilizados em um centro de controle operacional de oleodutos, investigando métodos não convencionais, além dos mencionados pela norma API 1130. Foram desenvolvidos sistemas de detecção de vazamento por balanço de massa, balanço de volume, lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais. Para localização de vazamentos, foram testados os métodos por redes neurais, pela estimativa da velocidade sônica e do gradiente hidráulico. Os produtos utilizados foram gasolina, diesel e óleo combustível. No quesito detecção de vazamento, o sistema baseado em redes neurais detectou vazamentos simulados, porém também indicou indevidamente. O sistema baseado em lógica fuzzy apresentou bons resultados, vazamentos corretamente sem falsos positivos, interpretando indicando corretamente os fenômenos inerentes à operação de dutos. O sistema de balanço de massa também apresentou bons resultados, ou seja, não gerou alarmes falsos, detectando corretamente os vazamentos simulados, inclusive para detecção de vazamento com duto parado e pressurizado. Para avaliar sistemas de detecção de vazamento é comum realizar testes de campo que podem ter um custo alto e levar muito tempo para realizar. Um método para realizar testes a um custo inferior deve ser desenvolvido e uma proposta está sendo mostrada nesta dissertação.

## Palavras-chave

Metrologia; detecção de vazamento, localização de vazamento; balanço de massa

#### Abstract

Aramaki, Thiago Lessa; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor). **Development and Validation of Methods for Detection and Localization of Pipeline Leaks**. Rio de Janeiro, 2015. 138p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Companies in the business of pipeline operations have as a basic assumption, operational security. Concerning this issue, there are some factors that could lead to accidents with material, environment and personal damage possibilities such as: internal and external corrosion, accidental excavations, improper operation that could submit the pipe to high pressures and third party interventions interested in commodities theft. This dissertation is aligned with pipeline companies' real demands through the development of systems that could be used by these companies. Leak detection systems provided with leak location capabilities were developed to be used in liquid pipeline control centers, exploring non-conventional methods, besides the ones mentioned by API 1130. The leak detection systems developed were: mass balance, volume balance, fuzzy logic and neural networks. For the leak location systems the systems tested were: sonic velocity, hydraulic gradient and artificial neural networks. The products used were gasoline, diesel and fuel oil. On the issue of leak detection, the system based on neural networks detected simulated leakages, although there were some false indications. The system based on fuzzy logic presented good results, giving correct leak indications without any indication of false alarms, interpreting correctly the phenomena due to pipeline usual operations. The mass balance system has also presented good results, not generating false alarms, but detecting simulated leaks even with the pipeline in shut-in condition. To evaluate leak detection systems is common to conduct field tests that can be costly and take a long time to accomplish. A method for testing at a lower cost should be developed and a proposal is being shown in this work.

## **Keywords**

metrology; leak detection; leak localization; mass balance

## Sumário

1 Introdução	17
1.1. Contexto	17
1.2. Motivação	19
1.3. Objetivos	20
1.4. Estrutura da dissertação	23
2 Metodologias para detecção de vazamento para liquidos	25
2.1. Introdução	25
2.2. Principais normas e regulamentos	27
2.2.1. Regulamento Técnico de Dutos Terrestres	27
2.2.2. Norma API 1130	28
2.2.3. Norma API 1149	32
2.2.4. Normas de correção de volume	34
2.2.4.1. Petróleo, produtos refinados e óleos lubrificantes	34
2.2.4.2. Etanol	35
2.2.4.3. GLP, Gás Liquefeito de Petróleo e LGN, Líquido de Gás	
Natural	36
2.3. Métodos de detecção de vazamento	36
2.3.1. Balanço de massa	37
2.3.2. Lógica <i>Fuzzy</i>	43
3 Metodologias de localização de vazamentos para líquidos	17
2.1. Estimativa pola velocidado cônica	יד 17
3.1. Estimativa pela velocidade sonica	41 51
3.2. Brades Neurois Artificiais	51
3.3. Redes Neurais Antificiais	53
4 Modelagem do sistema de detecção e localização de vazamentos	spara
líquidos	57
4.1. Aquisição de dados	57
4.1.1. Driver para o simulador hidráulico	57
4.1.2. Driver para o sistema supervisório OASYS	58

4.2. Filtros digitais	60
4.3. Método de detecção de vazamentos	77
4.3.1. Balanço de massa	77
4.3.2. Lógica <i>Fuzzy</i>	80
4.4. Método de localização de vazamentos	85
4.4.1. Estimativa pela velocidade sônica	85
4.4.2. Gradiente hidráulico	87
4.4.2.1. Ajuste do coeficiente de expansão térmica (γ) dos produtos	88
4.4.2.2. Cálculo da vazão	89
4.4.2.3. Fator de atrito	90
4.4.2.4. Correção da Viscosidade com a Temperatura (VTMI)	92
4.4.2.5. Perfil de temperatura	93
4.4.2.6. Cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U)	93
4.4.2.7. Interseção de Gradiente Hidráulico	94
4.4.3. Redes Neurais	94
4.4.3.1. Treinamento	96
4.4.3.2. Sistema	100
5 Resultados	103
5.1. Localização de vazamento pela velocidade sônica	103
5.2. Localização de vazamento pelo gradiente hidráulico	105
5.3. Localização de vazamento por redes neurais	109
5.4. Detecção de vazamento pelo balanço de massa	116
5.5. Detecção de vazamento por lógica fuzzy	124
5.6. Comparação entre os métodos de detecção de vazamento	127
6 Canalusãos o trabalhos futuros	101
	101
7 Referências bibliográficas	134

# Lista de figuras

Figura 1: Relação de custo entre diversos modais. Adaptado de (Liu 2003) 15
Figura 2: Causas de acidentes em gasodutos18
Figura 3: Alarmes de um sistema de detecção de vazamento nos transientes 21
Figura 4: Métodos de detecção de vazamento. Adaptado de (Zhang 1997) 26
Figura 5: Requisitos de detecção de vazamento da norma TRFL,
extraída de (Geiger 2006)27
Figura 6: Assinatura clássica de detecção de vazamento
Figura 7: Efeito das válvulas de controle operando em modo automático 30
Figura 8: Exemplo de curvas de sensibilidades. Adaptado de (Geiger 2006) 31
Figura 9: Limites de alarmes para sistemas de detecção de vazamento
(API 2012a)
Figura 10: Interface gráfica para o cálculo de incertezas segundo a API 1149,
versão 1980
Figura 11: Variação de Vazão X Variação de Empacotamento
Figura 12: Sistema proposto em (Da Silva et al. 2005)
Figura 13: Variáveis de entrada e saída associadas ao estado operacional
Figura 14: Variáveis de entrada e saída associadas ao desvio
Figura 15: Diagrama de um sistema de detecção acústico, adaptado de
(Liu <i>et al.</i> 2015)
Figura 16: Método da interseção de gradientes. Extraído de (API 2015)51
Figura 17: Modelo de duto segmentado, extraído de (Barradas et al. 2009) 53
Figura 18: Esquema do sistema proposto por (Barradas et al. 2009)54
Figura 19: Saídas da rede neural, com estado real do duto, saída bruta da rede
neural e saída após filtro (Barradas et al. 2009)55
Figura 20: Comunicação do sistema NEURA com o simulador58
Figura 21: Comunicação do sistema Fuzzy com o simulador
Figura 22: Fluxo de informações do SPS Online. Adaptado de
(ADVANTICA 2008)
Figura 23: Sinal de densidade com elevada taxa de ruído61
Figura 24: Sinal de densidade para uso do sistema de detecção de vazamento 62

Figura 25: Sistema de detecção de vazamento para sinal de densidade	
mostrado na Figura 24	. 62
Figura 26: Composição do duto para a densidade mostrada na Figura 24	. 64
Figura 27: Fluxograma do sistema desenvolvido	. 64
Figura 28: Sinal bruto com ruído e referência criada para efeito de comparação	. 65
Figura 29: Filtro exponencial com <b>θ</b> igual a 0,08	. 66
Figura 30: Filtro exponencial não linear aplicado ao sinal de entrada	. 67
Figura 31: Filtro média móvel com janela igual a 6	. 68
Figura 32: Filtro de média móvel dinâmica com $r = 5$ e janela = 6	. 69
Figura 33: Filtro de média móvel exponencial com lambda	
igual a 0,08 e janela igual a 6	. 70
Figura 34: Sinal bruto e interpolado a cada 20 segundos	. 70
Figura 35: Sinal interpolado em confronto com o sinal de	
referência. IAE = 139,8 g cm <sup>-3</sup>	.71
Figura 36: Filtro exponencial com parâmetro igual a 0,08	.72
Figura 37: Filtro exponencial não linear com R = 5	. 72
Figura 38: Filtro média móvel com janela igual a 6	.73
Figura 39: Filtro média móvel dinâmica com janela igual a 6 e $r = 5$	.73
Figura 40: Filtro média móvel exponencial com parâmetro	
igual a 0,08 e r igual a 5	. 74
Figura 41: Aplicação dos filtros combinados, exponencial com média móvel	.75
Figura 42: Atraso do filtro combinado quando o filtro exponencial é aplicado	
antes da interpolação	. 75
Figura 43: Atraso do filtro combinado quando os filtros são aplicados após a	
interpolação	.76
Figura 44: Sinal original (azul), com filtro exponencial (laranja) e com filtro	
combinado (vermelho)	.76
Figura 45: Interface gráfica do sistema de detecção de vazamento por	
balanço de massa	. 78
Figura 46: Exemplo de arquivo excel de entrada	. 79
Figura 47: Configurações dos produtos existentes no duto	. 80
Figura 48: Esquema montado para o sistema de detecção fuzzy.	. 81
Figura 49: Sistema Fuzzy de Detecção de Vazamentos.	. 81

Figura 50: Funções de pertinências das funções de entrada
Figura 51: Saída do sistema de detecção <i>fuzzy</i>
Figura 52: Superfícies de controle relacionadas ao par, diferença de
vazão e variação de pressão em cada ponta
Figura 53: Arquitetura do sistema de detecção <i>fuzzy</i>
Figura 54: Interface gráfica para estimar a localização do vazamento
Figura 55: Interface gráfica do programa de gradiente hidráulico87
Figura 56: Exemplo de arquivo excel de entrada
Figura 57: Configuração com apenas um produto na linha90
Figura 58: Fator de atrito teórico (esquerda) e real (direita)
com somente um produto91
Figura 59: Inventário do duto com as propriedades do fluido
Figura 60: Fator de atrito teórico (esquerda) e o real (direita) com
mais de um produto
Figura 61: Gradientes plotados nos dois sentidos com diferentes
condições de contorno94
Figura 62: Topologia das redes neurais artificiais implementada95
Figura 63: Vazamentos em posições distintas com o duto discretizado,
extraído de (Barradas et al. 2009)96
Figura 64: Esquema proposto para o treinamento da rede
Figura 65: Modelo gráfico de vazamento realizado no simulador97
Figura 66: Normalização [-1,1] à esquerda e Normalização [0,1] à direita 100
Figura 67: Teste do OPC com o sistema Neura
Figura 68: XML padrão para entrada de tags no sistema NEURA101
Figura 69: Pesos e bias obtidos no treinamento realizado no Matlab 102
Figura 70: Saídas do Matlab e do sistema Neura para um mesmo conjunto de
dados
Figura 71: Simulação hidráulica com vazamento na posição longitudinal 78,479
km
Figura 72: Vazamento em regime transiente (esquerda) e regime permanente
(direita)
Figura 73: Primeiro vazamento simulado na posição 16,7 km

Figura 74: Gradientes plotados para as condições de contorno do primeiro
vazamento107
Figura 75: Segundo vazamento situado na posição 78,5 km 107
Figura 76: Gradientes plotados para as condições de contorno do segundo
vazamento108
Figura 77: Terceiro vazamento situado na posição 169,2 km 108
Figura 78: Gradientes plotados para as condições de contorno do terceiro
vazamento109
Figura 79: Condição inicial, duto operando em regime permanente 110
Figura 80: Saída do sistema Neura para o duto em regime permanente 110
Figura 81: Primeiro teste com vazamento na posição 23,76 km 111
Figura 82: Saída do sistema para o vazamento na primeira posição111
Figura 83: Segundo teste com dois vazamentos simultâneos 112
Figura 84: Saída do simulador para o segundo teste com dois vazamentos 112
Figura 85: Vazamento não treinado, na posição 197,53 km 113
Figura 86: Saída do sistema para o vazamento não treinado na
posição 197,53 km 113
Figura 87: Desligamento de uma bomba no expedidor114
Figura 88: Saída gerada com o desligamento de uma bomba 114
Figura 89: Teste com despressurização lenta do lado recebedor 115
Figura 90: Saída do sistema com despressurização lenta no recebedor115
Figura 91: Duto com produto aquecido116
Figura 92: Vazamento gerado na posição 26,944 km 117
Figura 93: Vazamento detectado no transiente
Figura 94: duto estabilizado com vazamento em regime permanente 118
Figura 95: Localização após estabilização do vazamento118
Figura 96: Vazões normalizadas 119
Figura 97: Detecção de vazamento com vazões normalizadas 120
Figura 98: Localização inicial com vazões normalizadas120
Figura 99: Localização após estabilização com vazões normalizadas121
Figura 100: Regime permanente em <i>shut-in</i>
Figura 101: Vazamento no instante em que é detectado com o duto
inicialmente em <i>shut-in</i>

Figura 102: Comportamento do sistema para duto em shut-in sem vazamento	123
Figura 103: Vazamento detectado com duto em shut-in	123
Figura 104: Condição de shut-in.	124
Figura 105: Duto operando em regime permanente	125
Figura 106: Vazamento simulado próximo ao expedidor	125
Figura 107: Simulação de pequenos transientes devido à atuação	
em válvula de controle	126
Figura 108: Pressurização na saída, teste para possível alarme falso	126
Figura 109: Despressurização na entrada, possível alarme falso	127

# Lista de tabelas

Tabela 1: Parâmetros típicos para o aço empregado em dutos na
indústria de petróleo
Tabela 2: Adaptado de Barradas et al. (2009)
Tabela 3: Limiares para seleção de cada produto.
L1: limiar inferior. L2: limiar superior
Tabela 4: Comparação entre os filtros nos dois cenários74
Tabela 5: Regras mapeadas por especialista
Tabela 6: Coeficiente de expansão cúbica típicos para hidrocarbonetos
líquidos e água
Tabela 7: Comportamento esperado do sistema de rede neural95
Tabela 8: Exemplo de dados de treinamento considerando somente
a parte transiente
Tabela 9: Dados de treinamento considerando todo o período do vazamento 99
Tabela 10: Simulação para avaliar confiabilidade e robustez do sistema 128
Tabela 11: Simulação para avaliar sensibilidade do sistema 128
Tabela 12: Sensibilidade do sistema por balanço de massa    129
Tabela 13: Sensibilidade do sistema baseado em lógica fuzzy

## 1 Introdução

#### 1.1. Contexto

O termo duto pode ser definido, segundo (Liu 2003), como sendo um conduíte fechado, normalmente de seção transversal circular. Pode ser construído com algum tipo de aço ou plástico.

O termo em inglês *pipe* difere de *pipeline*, uma vez que este último se refere ao sistema no qual o duto, *pipe*, está conectado, isto é, inclui bombas, válvulas, dispositivos de controle e qualquer outro componente que seja necessário para a operação do duto. O termo *pipeline* normalmente supõe que a extensão seja relativamente grande. A Transpetro, por exemplo, opera um duto cuja extensão aproxima-se de 1000 km. Em português costuma-se utilizar o termo oleoduto para dutos que transportam produtos na fase líquida e gasoduto para dutos que transportam produtos na fase gasosa. Nesta dissertação, o escopo do trabalho referese somente ao escoamento de líquidos monofásicos.

Para o transporte de grandes quantidades de líquidos ou gás, o modal dutoviário possui vantagens econômicas sobre outros modais, como mostrado na Figura 1.



Figura 1: Relação de custo entre diversos modais. Adaptado de (Liu 2003).

Além disso, o custo de energia utilizado durante o transporte é menor em dutos do que em outros modais, segundo (Liu 2003).

A utilização do transporte dutoviário causa menos danos ao ambiente do que os outros modais, com risco associado menor. Também são considerados mais seguros quando comparados com o transporte rodoviário, segundo (Liu 2003). Não são afetados pelas condições climáticas e, devido ao alto nível de automação presente, são mais confiáveis, operando continuamente 24 horas por dia.

Mesmo sendo mais seguros que outros modais, acidentes podem acontecer e por isso um sistema de detecção de vazamento é necessário para que os danos sejam mitigados, além de ser uma imposição de agências reguladoras. A Figura 2 mostra as causas de acidentes em gasodutos europeus de 2004 a 2013, segundo (EGIG 2015), devidos à intervenção de terceiros.



Figura 2: Causas de acidentes em gasodutos.

Alguns sistemas são muito caros e muito complexos para sintonizar, ou seja, demandam dedicação quase que exclusiva para sintonizar o modelo. Entende-se por sintonia, realizar todos os ajustes necessários no modelo de forma que o sistema de detecção de vazamento possa funcionar da melhor forma possível, ou seja, detectando vazamentos o mais rapidamente possível sem gerar alarmes falsos. Além disso, sempre existem empresas que não passam o conhecimento completo de uma ferramenta, pois isso entra em conflito com interesses na prestação de serviços de sintonia.

Assim, uma equipe de engenharia de operação cujo principal objetivo seja fornecer suporte para os técnicos de operação que efetivamente operam os dutos,

não podem aceitar sistemas de detecção de vazamento do tipo *black box*<sup>1</sup>. Do contrário, a qualidade do serviço de suporte e apoio na análise de alarmes ou cenários em que há necessidade de uma interpretação dos resultados fornecidos pelo processo e pelo sistema de detecção de vazamento ficariam prejudicados.

Outro ponto importante é a dificuldade para testar e avaliar sistemas de detecção de vazamento. É muito caro preparar um teste de campo, que envolve uma quantidade de recursos humanos e material bastante ampla. Um método para realizar testes a um custo inferior deve ser desenvolvido e uma proposta está sendo mostrada nesta dissertação.

#### 1.2. Motivação

O tema abordado nesta dissertação é fundamental para uma empresa de transporte por meio de dutos (*pipelines*), principalmente em um setor operacional como o centro nacional de controle e operação (CNCO) da Transpetro, subsidiária da Petrobras. A responsabilidade com o meio ambiente é, ou, pelo menos deveria ser, pauta prioritária dentro de uma empresa cuja área de atuação permeia o meio ambiente.

Desde o início na fase de planejamento do trabalho realizado e mostrado neste documento, buscou-se direcionar a pesquisa e desenvolvimento de modo que o produto final pudesse ser diretamente aplicado ao mercado em questão.

A experiência adquirida no setor operacional permitiu a observação de pontos fortes e de melhoria de diversos sistemas comerciais, utilizados ou não no centro de controle. Esse conhecimento motivou a implementação de um sistema computacional que fosse superior aos sistemas de balanço de massa existentes no centro de controle.

A tendência de aumento, tanto no exterior quanto dentro do Brasil, a partir da legislação definida pelos órgãos reguladores, do rigor com a disciplina de detecção de vazamentos, indicou uma oportunidade de desenvolvimento nesta área. Como exemplo, no último regulamento técnico emitido pela ANP, a questão da realização de testes de vazamento periódicos se mostrou um ponto importante a conhecer. A

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Este termo deve ser compreendido como um sistema fechado em que o entendimento completo acerca de seu funcionamento não esteja acessível, de forma a não capacitar a empresa usuária do sistema de detecção de vazamento a realizar a sintonia do mesmo com recursos próprios.

possibilidade de realizar um teste virtual (Montalvão *et al.* 2015) capaz de ser representativo de um teste de campo pareceu promissora e veio a corroborar com a versão atualizada da norma API 1149, publicada em Setembro de 2015.

Finalmente, outro ponto importante seria o desenvolvimento de critérios que pudessem ser empregados para melhorar os modelos hidráulicos tão amplamente usados no setor operacional de dutos.

#### 1.3. Objetivos

Os objetivos desta dissertação de mestrado envolveram o desenvolvimento de sistemas internos (API 2012a), de detecção e localização de vazamentos baseados em técnicas convencionais e não convencionais.

A detecção de vazamento refere-se à indicação com confiabilidade de que existe um vazamento no sistema que compreende o oleoduto. A localização estima a posição do vazamento no oleoduto com um certo nível de confiabilidade, uma vez que, após a detecção e confirmação da posição do vazamento, uma equipe local deverá se deslocar para o ponto de vazamento.

Para realizar o desenvolvimento destes sistemas, alguns objetivos específicos foram propostos. Pode-se citar a avaliação de diferentes metodologias, além das mencionadas na API 1130, o que nesse caso levou a avaliação de um modelo baseado em redes neurais e outro baseado em lógica *fuzzy*.

Alguns sistemas de detecção de vazamento, principalmente os do tipo balanço de massa, são projetados para detectar vazamentos somente em regime permanente. Desta forma, alguns sistemas simplesmente alarmam nos grandes transientes, tais como a partida e a parada do oleoduto, como mostrado na Figura 3. As linhas em azul representam a vazão do oleoduto e os pontos em vermelho são alarmes de um determinado sistema de detecção de vazamento utilizado na Transpetro. Por meio da observação da vazão é possível observar que, nas partidas e paradas do oleoduto, o sistema de detecção de vazamento alarma indevidamente. Outros sistemas simplesmente inibem a detecção de vazamento nestas condições, ou possuem um limite de alarme dinâmico que aumenta durante os transientes.



Figura 3: Alarmes de um sistema de detecção de vazamento nos transientes.

Visto isso, um dos objetivos foi desenvolver um sistema de balanço de massa que pudesse reconhecer os transientes hidráulicos e somente alarmasse na ocorrência de um vazamento.

Também foi necessário a identificação de forma automática da condição de quebra de coluna, ou seja, verificar que em nenhum volume de controle exista pressão interna abaixo da pressão de vapor do produto, uma vez que nessa condição o produto começa a vaporizar. Essa condição pode fazer com que produtos possam ter alguma propriedade alterada. Outra consequência refere-se a detecção de vazamento, uma vez que essa condição pode levar um sistema de detecção de vazamento a alarmar erroneamente.

Outra proposta seria a avaliação de diferentes metodologias de sistemas internos para detecção de vazamento para líquidos e localização de vazamentos além dos mencionados na API 1130, e para isso desenvolveram-se sistemas baseados em lógica *fuzzy* e em redes neurais artificiais.

Outro objetivo desta dissertação foi a elaboração de um sistema de detecção de vazamentos para dutos em *shut-in*, condição em que o duto se encontra parado pressurizado, que pudesse diferenciar para o técnico de operação se a despressurização é por temperatura, ou fluido deslocado.

Aproveitou-se o sistema desenvolvido de balanço de massa para testar se seria possível utilizá-lo para detectar vazamentos com o duto na condição de *shut-in*, utilizando os conceitos mostrados por (Christie 2012).

Para o caso do sistema de detecção de vazamentos por balanço de massa um objetivo foi incorporar rotinas para correção de volume por pressão e e temperatura de acordo com normas vigentes.

Outro objetivo desta dissertação foi encontrar uma forma de testar os sistemas desenvolvidos que também servisse para testar sistemas comerciais de forma simples e com custo baixo. Para conseguir isso foi necessário acoplar um modelo de simulação hidráulica ao sistema a ser testado.

Um objetivo decorrente do mencionado no parágrafo anterior é que, para o teste ser representativo, o modelo de simulação hidráulica deve representar o duto real de forma fidedigna, o que levou também à necessidade de ajustes do modelo de simulação hidráulica. Isso levou à determinação da curva de bombas por meio de dados experimentais para modelos em que a folha de dados da curva da bomba estivesse desatualizada (Aramaki e Barbosa 2015).

Um método de ajuste de viscosidade de forma automática foi desenvolvido e está descrito na seção que descreve o sistema de balanço de massa.

Devido à possibilidade de aquisição de sinais com ruído, um dos objetivos foi a avaliação de filtros digitais para uso nos sistemas de detecção de vazamento desenvolvidos.

#### 1.4. Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo fala sobre aspectos que levaram à escolha deste tema para o desenvolvimento do trabalho de mestrado. A motivação, o problema a ser pesquisado e os objetivos a serem perseguidos estão descritos. Uma pequena introdução sobre o assunto detecção de vazamento ajuda a entender o contexto do tema.

O segundo capítulo foca nas metodologias desenvolvidas para detecção de vazamentos neste trabalho. O objetivo não foi esgotar as possibilidades e sim testar alguns métodos convencionais e outros não convencionais, para que as dificuldades encontradas em cada um pudessem ser constatadas. As principais normas de detecção de vazamento, assim como as normas vigentes para correção de pressão e temperatura, são descritas nesta seção. Uma introdução teórica dos métodos desenvolvidos é apresentada neste capítulo, mostrando a abordagem que foi base do trabalho desenvolvido na elaboração dos métodos de detecção de vazamento por lógica *fuzzy* e por balanço de massa.

O terceiro capítulo foca nas metodologias para localização de vazamento. A estimativa para a velocidade sônica e o método do gradiente hidráulico são perscrutados e são métodos conhecidos na literatura, porém as implicações práticas no desenvolvimento somente foram observadas após o desenvolvimento de protótipos. Um método não convencional (redes neurais artificiais) que, inicialmente, estava sendo direcionado para detecção de vazamento, foi colocado nesta seção, em virtude dos resultados obtidos terem sido melhores para localização de vazamento.

O quarto capítulo apresenta os detalhes do sistema desenvolvido, orientado para o centro de controle da Transpetro. Nesta parte é mostrada a aquisição de dados pelo simulador hidráulico que foi objeto desta dissertação e como seria a aquisição de dados para o sistema supervisório utilizado no referido centro de controle, intitulado OASYS. Este sistema de aquisição de dados associado ao supervisório OASYS conecta-se diretamente à rede de automação e foi testado no centro de controle por meio da implantação de um sistema de processamento de sinal que aplica filtros digitais em tempo real. O capítulo cinco mostra os resultados dos três métodos de localização de vazamento e dos sistemas de detecção de vazamento desenvolvidos no capítulo anterior.

O capítulo seis apresenta algumas conclusões importantes verificadas no capítulo anterior, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Metodologias para detecção de vazamento para líquidos

#### 2.1. Introdução

Em se tratando de detecção de vazamento, muitas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos, porém algumas técnicas ditas mais conservadoras continuam sendo a mais comumente utilizadas na indústria do petróleo.

Segundo (Bai e Bai 2014) a seleção de um sistema de detecção de vazamento depende de uma variedade de fatores, tais como características do oleoduto, características do produto, instrumentação, comunicação de dados, revestimentos do duto, isolamento térmico do duto, profundidade em que o duto está enterrado, temperatura de operação, ruído, condições de operação e demandas econômicas.

Algumas métricas para avaliar o desempenho do sistema podem ser vistas em (API 2012a) que podem ser utilizadas para comparação entre sistemas de detecção de vazamento. Por exemplo, o ajuste de alarmes realizado de forma a detectar pequenos vazamentos aumenta a sensibilidade do sistema, porém pode comprometer a especificidade do mesmo uma vez que o sistema poderá gerar uma quantidade maior de alarmes falsos.

Existem métodos diferentes aplicados à indústria. Ainda de acordo com (API 2012a) os sistemas podem ser classificados como sistemas internos e externos. Outros tipos de classificação podem ser encontrados na literatura, tais como os apresentados em (Zhang 1997), mostrados na Figura 4.

Segundo esta classificação os métodos podem ser agrupados em três categorias. Métodos biológicos, métodos baseados em hardware e métodos baseados em software.

Os métodos biológicos são aqueles que utilizam pessoas ou cães treinados para detectar o vazamento por inspeção visual, som ou odor.

Os métodos baseados em hardware utilizam sensores dedicados para detecção de vazamento.

Os métodos baseados em software utilizam software para processar as variáveis de processo disponíveis, tais como pressão, vazão, densidade e temperatura. Esta categoria é equivalente aos sistemas internos descritos em ((API 2012a).



Figura 4: Métodos de detecção de vazamento. Adaptado de (Zhang 1997).

Observa-se ainda que a norma técnica alemã, para sistemas de dutos, intitulada TRFL (*Technische Regel für Fernleitungsanlagen*) determina que existam sistemas de detecção de vazamento apropriados para cada condição operacional. Por exemplo, deve haver um sistema para regime permanente e outro para regime transiente, assim como um para a condição de *shut-in*, um algoritmo eficiente para localização de vazamentos e um sistema para vazamentos pequenos. Nada impede que um sistema possa englobar, por meio de módulos distintos, diferentes funcionalidades que atendam aos requisitos da norma alemã, porém em alguns casos pode ser necessária uma separação dos sistemas. Um exemplo que foi explorado neste trabalho é a localização do vazamento por meio do método da velocidade sônica. Este método exige uma taxa de aquisição significativamente maior do que a usualmente utilizada em sistemas internos, diferentemente do método da localização por meio do gradiente hidráulico, que pode ser utilizado acoplado a um sistema de detecção de vazamento do tipo interno.

Um esquema proposto pela norma alemã pode ser visto na Figura 5, onde SDV significa sistema de detecção de vazamento.



Figura 5: Requisitos de detecção de vazamento da norma TRFL, extraída de (Geiger 2006).

#### 2.2. Principais normas e regulamentos

As principais normas de detecção de vazamento são as normas API 1130 e API 1149. As normas de correção de volume mostradas a partir da seção 2.2.3 são importantes para transformar um sistema de balanço de volume em balanço de massa.

#### 2.2.1. Regulamento Técnico de Dutos Terrestres

RTDT é o acrônimo para regulamento técnico de dutos terrestres para movimentação de petróleo, derivados e gás natural. O documento ((Petróleo 2011) possui um item sobre detecção de vazamentos, conforme transcrição abaixo.

15.7.1 O Transportador deve selecionar e implementar um processo de monitoramento vazamentos do duto, compatível com o nível de complexidade operacional e o produto transportado. Este processo deve basear-se no Risco de vazamentos e no tempo de resposta aos eventos para cada trecho, mediante a utilização de equipamentos, sistemas ou procedimentos que tenham capacidade de detecção de vazamentos.

15.7.1.1 A documentação relativa ao processo de monitoramento deve estar disponível para as atividades de operação, inspeção e manutenção do Duto.

15.7.2 Quando este processo for dependente de equipamentos de medição estes devem ser regularmente calibrados.

15.7.3 Qualquer que seja o método de detecção de vazamentos utilizado o Trasportador deve periodicamente analisar seu desempenho e fazer os ajustes necessários.

15.7.4. Os procedimentos relativos ao processo de detecção de vazamentos devem ser revisados e atualizados sempre que necessário, ou no mínimo a cada 3 (três) anos. 15.7.5 Os procedimentos relativos ao processo de detecção de vazamentos devem ser arquivados pelo Transportador por 3(três) anos, após a sua revisão.

#### 2.2.2. Norma API 1130

Esta norma (API 2012a) cunhou o termo CPM, *Computational Pipeline Monitoring*, para descrever os algoritmos baseados em software utilizados para fornecer recursos para o técnico de operação identificar anomalias no duto, tais como vazamentos.

Inicialmente, esta norma foi prevista apenas para dutos operando com coluna cheia, isto é operação de líquido monofásica. Para dutos com operação, temporária ou permanente, apresentando quebra de coluna, também conhecida como *slack line* ou *slack flow* (Nicholas 1995), deve-se verificar o que pode ser aplicado, uma vez que as incertezas de medição das variáveis de pressão e vazão aumentam nesta condição.

Outra condição não prevista por esta norma é a condição denominada *shutin*, ou seja, duto parado pressurizado. O método de balanço de volume não pode avaliar perdas de volumes, uma vez que não há registro de vazão nesta condição.

A seção 2.3.1, que descreve o balanço de massa, e a seção 5.4, resultados da detecção de vazamento por balanço de massa, mostram que este método, mantida as condições descritas no parágrafo anterior, pode detectar vazamentos, desde que a função de empacotamento, variações do inventário do duto em função da pressão e temperatura, esteja corretamente configurada e ativa.

Esta norma classifica os sistemas de detecção de vazamento em dois grupos: internos e externos.

Os sistemas externos são aqueles que dependem de um hardware, instrumentação e/ou sensores específicos para operarem, tais como: fibras ópticas, detectores de emissão acústica, entre outros.

Os sistemas internos, que são os mais comuns, são aqueles que utilizam a infraestrutura existente e sensores já instalados, tais como: pressão, vazão, temperatura e densidade.

Dentre os sistemas internos, existem duas tecnologias principais: conservação de massa (ou balanço de massa) e métodos de reconhecimento de assinatura de vazamento. Os tipos de sistemas internos podem ser classificados como métodos de balanço de linha, Sistemas do tipo RTTM (*Real Time Transient Model*), Monitoramento pressão/vazão, método acústico/onda de pressão negativa e análise estatística.

O reconhecimento de assinatura de vazamento está baseado na assinatura clássica de um vazamento, que pode ser observada na Figura 6.



Figura 6: Assinatura clássica de detecção de vazamento.

O gráfico da Figura 6 mostra o que acontece com as variáveis de processo vazão, pressão e *head*<sup>2</sup>. Na Figura 6, VC significa válvula de controle, P, pressão e Q, vazão. A montante do vazamento a vazão aumenta e a jusante do vazamento ela diminui. As pressões nas duas pontas decrescem. A situação mostrada considera que as válvulas de controle do expedidor e recebedor estão operando em modo manual. Essa situação se modifica ligeiramente quando as controladoras estão operando em modo automático. Neste caso, dependendo da variável controlada, essa assinatura pode ser mais ou menos acentuada. Esse efeito das controladoras em modo automático pode ser observado na Figura 7.

Na Figura 7, são mostradas as influências de algumas variáveis na assinatura de vazamento a partir das informações descritas na Figura 6. As variáveis indicadas pelo símbolo percentual indicam o percentual de abertura das válvulas de controle, que pode ser do lado expedidor ou do lado recebedor. O subscrito "in", refere-se ao

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Head é a pressão convertida em metros de coluna de líquido.

lado do expedidor, enquanto que o subscrito "out", refere-se ao lado do recebedor. Dito isso, as variáveis de P e Q representam as grandezas pressão e vazão respectivamente. O sentido das setas indica aumento ou diminuição da variável adjacente à mesma. Para exemplificar, conforme mostrado na Figura 6, na ocasião de um vazamento, se as controladoras estiverem em modo manual, a vazão no expedidor aumenta, e a pressão diminui, porém, se o controle estiver no modo automático pela pressão, a válvula de controle tenderá a abrir para tentar manter a pressão constante. Se o controle automático estiver definido pela vazão, a válvula de controle tentará fechar para manter a vazão constante no *setpoint* previamente ajustado. Outras combinações podem acontecer de forma simultânea do lado expedidor e recebedor.



Figura 7: Efeito das válvulas de controle operando em modo automático.

Algumas métricas foram incorporadas da norma API 1155 (API 1995) que atualmente é um anexo da norma API 1130. Estas métricas foram definidas como: confiabilidade, sensibilidade, precisão e robustez. Deve-se atentar que as definições encontradas para estes parâmetros podem diferir das definições metrológicas encontradas no VIM (INMETRO 2012).

Alguns sistemas de detecção de vazamento provêm informações adicionais, tais como: localização do vazamento e vazão do vazamento. A qualidade destas informações está associada à métrica precisão, conforme definido na API 1130.

Outra métrica de desempenho é a robustez, definida como a capacidade de um determinado sistema de detecção de vazamento continuar operando mesmo na falta de condições ideais de operação, por meio de um algum mecanismo de redundância.

A métrica confiabilidade diz respeito à detecção de vazamento caso este ocorra, e a não geração de falsos positivos no caso de não existir um vazamento, ou seja, incorpora as métricas estatísticas de sensibilidade e de especificidade.

A sensibilidade é definida pela API 1130 como a relação entre o vazamento mínimo detectável e o tempo de resposta para a detecção do vazamento. Normalmente, utiliza-se uma curva de sensibilidade para esta métrica, tal como mostrado na Figura 8. No eixo vertical está a vazão mínima do vazamento em relação à vazão do duto. No eixo horizontal está o tempo em minutos para detecção do vazamento (API 2015).



Figura 8: Exemplo de curvas de sensibilidades. Adaptado de (Geiger 2006).

A Figura 8 mostra dois sistemas distintos e hipotéticos representados pelas curvas verde e azul. É possível verificar que o sistema representado pela cor azul possui um tempo de resposta menor do que o sistema representado pela cor verde, isto é, para um mesmo vazamento a detecção é mais rápida, embora o vazamento mínimo detectável pelos dois sistemas seja o mesmo.

É importante ratificar que a resposta de um sistema de detecção de vazamento varia com as propriedades do duto, dos fluidos operados, da condição de operação do duto e principalmente da magnitude do vazamento. Os limiares de alarme para o sistema podem ser observados na Figura 9.



Figura 9: Limites de alarmes para sistemas de detecção de vazamento (API 2012a).

Analisando a figura de baixo para cima, é possível observar que existe um vazamento mínimo que só pode ser detectado por testes hidrostáticos, que consistem em preencher um duto com água e pressurizá-lo dentro de limites definidos, verificando se após um determinado tempo ocorre alguma despressurização, usualmente variações maiores do que 0,5% e não justificáveis por variações de temperatura.

Acima deste limite, existe outro que é determinado pela incerteza de medição do sistema de detecção de vazamento e que pode ser estimado pela API 1149.

Um limite acima deste último deve ser utilizado, pois podem existir pequenos transientes e limitações devido às próprias características do sistema de detecção de vazamento, os quais, se não respeitados, ocasionam a geração de alarmes falsos, comprometendo assim a confiabilidade do sistema.

É possível observar ainda na Figura 9 que existe um limite no qual o técnico de operação detecta um vazamento e muitas vezes é muito mais eficiente do que o próprio sistema de detecção de vazamento. Isso ocorre para vazamentos grandes, tais como rupturas do duto.

2.2.3. Norma API 1149 Esta norma, originalmente publicada em 1980, (API 1980), mostra como calcular as incertezas de medição de um sistema de detecção de vazamento por balanço de massa, trazendo como resultado uma curva de sensibilidade tal como mostrado na Figura 8. No entanto, esta versão da norma possui algumas limitações, uma vez que considerava somente o regime permanente, não considerando pequenos transientes que usualmente ocorrem na operação de oleodutos.

Com base nesta norma, (API 1980), desenvolveu-se um software, (Montalvão e Aramaki 2012), para calcular as incertezas de medição, cuja interface gráfica pode ser vista na Figura 10.

Esta norma foi atualizada em setembro de 2015 (API 2015) trazendo modificações extensas em seu conteúdo e apresentando melhorias tais como o cálculo da incerteza de medição do sistema de detecção de vazamentos considerando os transientes.

Outros pontos importantes são:

- Inclusão de outros métodos de detecção de vazamento não listados na versão anterior, que se restringia somente ao método de balanço de massa;
- Inclusão de produtos considerados leves, cuja pressão de vapor é considerada alta, além do gás natural;
- Reconhecimento da não linearidade;
- Inclusão de processos fortemente dependentes do tempo;
- Inclusão de componentes de incerteza de medição associados à telemetria, tais como taxa de aquisição de dados, tempo de propagação, perda de sinal, diferenças temporais, entre outros;
- Inclusão de filtros digitais; e
- Apresentação de métodos de localização de vazamentos.

🖣 Incerteza			
Duto			Incerteza no volume de líquido
Comprimento	97,9	Km	Volume 11.728,08 m³ Gamma 8,82E-04 (m³/m³)/°C
Diâmetro	16	Pol	BM 14.179,57 kgf/cm² FPL 0,00352619 %
Espessura	0,312	Pol	FPD 0,00112179 % FTL 0,04410151 %
E	2080000	kgf/cm²	FTD 0,00117 % QL 16,97 m³/h
v	0,3		Incerteza 0,04427194 % DV 5,19 m²
Alpha	1,17E-05	(m³/m³)/°C	Incertezas
Fluido			Pressão 0,5 kgf/cm² Kin 2 %
Densidade	0,84		Temperatura 0,5 ºC Kout 2 %
Vazão	600	m³/h	Resposta mínima
Temperatura	21	₽C	Tempo de resposta para rompimento total 0,52 min
Calcular		Gráfico	Vazamento mínimo detectável 16,97 m²/h

Figura 10: Interface gráfica para o cálculo de incertezas segundo a API 1149, versão 1980.

#### 2.2.4. Normas de correção de volume

Em um sistema em que as medições de vazão são do tipo volumétrico, o balanço de volume pode ser convertido para balanço de massa se os volumes envolvidos (volume de entrada, volume de saída e variação do empacotamento) forem corrigidos para a mesma condição padrão, que usualmente é de 101325 Pa e 293,15 K.

Assim, são apresentadas nesta seção algoritmos de correção de pressão e temperatura para os produtos utilizados pela indústria de petróleo no caso de movimentação de líquidos.

#### 2.2.4.1. Petróleo, produtos refinados e óleos lubrificantes

Para o óleo cru e óleos lubrificantes, além dos produtos refinados, tais como diesel, gasolina e querosene de aviação, a norma utilizada é a MPMS 11.1 (API 2012c).

O coeficiente de expansão térmica a 60 °F, assim como a massa específica a 60 °F em kg m<sup>-3</sup> podem ser calculados a partir desta mesma norma.

#### 2.2.4.2. Etanol

Para o etanol, somente a correção de temperatura deve ser realizada uma vez que não existe norma para correção de pressão até o momento da redação desta dissertação. Nesse caso, a norma que rege a correção de temperatura é a NBR 5992:2009, (ABNT 2009). Conforme definido nesta norma, a massa específica do álcool (ME), expressa em kg m<sup>-3</sup>, é calculada por

$$ME = A_1 + \sum_{k=2}^{12} A_k \times \left(\frac{GM}{100} - 0.5\right)^{k-1} + \sum_{1}^{6} B_k \times (t - 20)^k + \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m_j} C_{i,k} \times \left(\frac{GM}{100} - 0.5\right)^k \times (T - 20)^i,$$
(1)

onde *GM* é o grau alcoólico expresso em percentagem mássica (kg de etanol / 100 kg de álcool); T é a temperatura de leitura da amostra expressa em °C; n é igual a 5;  $m_1$  é igual a 11;  $m_2$  é igual a 10;  $m_3$  é igual a 9;  $m_4$  é igual a 4 e  $m_5$  é igual a 2; A<sub>k</sub>, B<sub>k</sub> e C<sub>i,k</sub> são os coeficientes de Bettin e Spieweck, conforme podem ser observados em (ABNT 2009).

O fator de correção de temperatura, segundo a norma, pode ser calculado por

$$FCV = \frac{ME_{lida}}{ME_{20}} \times (1 + 0,000036 \times (T - 20)),$$
(2)

onde  $ME_{lida}$  é a massa específica lida do campo por meio de um instrumento de medição de densidade,  $ME_{20}$  é a massa específica calculada a partir da Equação (1).

No entanto, existem algumas divergências no meio acadêmico e industrial a respeito da exclusão da parcela em parêntesis, que corresponde à dilatação térmica do recipiente em que se encontra o fluido. Assim, optou-se por utilizar a expressão

$$FCV = \frac{ME_{lida}}{ME_{20}},\tag{3}$$

onde  $ME_{lida}$  é a massa específica lida do campo por meio de um instrumento de medição de densidade,  $ME_{20}$  é a massa específica calculada a partir da Equação (1).

A implementação nesta dissertação do algoritmo de correção foi baseado em uma versão anterior da norma NBR-5992, de 1980, (ABNT 1980) que possui diferenças em relação à versão de 2009, (ABNT 2009), principalmente para temperaturas mais baixas, conforme pode ser observado por (Zucchini e Themudo 2006).

Para implementar a correção é preciso usar um método iterativo para resolver a Equação (1). Poderia ser utilizado o conhecido método de Newton-Raphson (Press *et al.* 1996). Em (Ciarlini 2001), sugere-se a utilização do algoritmo Van Wijngaarden–Dekker–Brent, (Press *et al.* 1996), por ser eficiente computacionalmente e não necessitar da derivada da função.

#### 2.2.4.3. GLP, Gás Liquefeito de Petróleo e LGN, Líquido de Gás Natural

Para GLP a norma de correção de pressão utilizada é a MPMS 11.2.2M (API 2012b) e para a correção de temperatura é utilizada a norma GPA TP-27, (API 2007a). Para realizar a correção de pressão é necessário determinar a pressão de vapor do fluido, ponto de bolha. Nesse caso pode-se utilizar a norma GPA TP-15 (API 2007b).

É necessário a execução de duas rotinas para determinar o fator de correção de temperatura. A primeira se faz necessária para calcular a densidade do fluido a 20 °C com base na densidade observada na temperatura observada. Em seguida, com a informação da densidade a 20 °C, calcula-se o fator de correção de temperatura, CTL.

#### 2.3. Métodos de detecção de vazamento

Entre os métodos considerados internos, (API 2012a), o método por balanço de massa é o mais tradicional e possivelmente o mais utilizado pelas empresas de petróleo.

A norma API 1149 (API 2015) cita, dentre os métodos de detecção de vazamento, a monitoração periódica ou regular de dados operacionais pelos técnicos de operação. Um teste de campo executado em um duto operado pela Transpetro foi realizado em 2009, (Da Silva *et al.* 2010). Neste teste foi possível comprovar que, para grandes vazamentos, maiores do que 30% da vazão média do duto, o técnico de operação pode detectar o vazamento apenas observando as
variáveis de processo exibidas no supervisório. Porém, para vazamentos considerados pequenos, abaixo de 5% da vazão média do duto e visto que, normalmente, os técnicos de operação realizam operações simultâneas de diversos dutos, estes podem passar despercebidos ou serem detectados tardiamente.

Além desta técnica são mencionados: balanço de volume, mudança da taxa de variação da pressão, mudança da taxa de variação da vazão, balanço de massa, balanço de massa realizada por meio de sistemas RTTM e análises de sistemas RTTM.

Neste trabalho serão mostrados desenvolvimentos realizados para balanço de volume e de massa, e técnicas que não foram citadas por (API 2015), tais como sistemas baseados em lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais.

#### 2.3.1. Balanço de massa

Esta é talvez a técnica mais tradicional para detecção de vazamento e possui pequenas variações de acordo com as simplificações realizadas na equação geral do balanço de massa, dada por

$$\dot{M}_I(t) - \dot{M}_O(t) = \frac{dM_L}{dt},\tag{4}$$

onde o índice *I* representa a entrada, o índice *O* representa a saída e *L* é o índice que representa o inventário do duto, também chamado de composição do duto. É o volume interno do duto, que pode ser constituído por produtos distintos.  $\dot{M}_I(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  ó a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  ó a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da entrada , enquanto  $\dot{M}_O(t)$  é a taxa de variação temporal da massa da saída. Existem alguns sistemas em software que utilizam a Equação (4) de forma invertida, isto é, ao invés de utilizar  $\dot{M}_I(t) - \dot{M}_O(t)$  no lado esquerdo da equação convenciona-se  $\dot{M}_O(t) - \dot{M}_I(t)$ . Esta última foi a convenção adotada neste trabalho, no desenvolvimento do sistema de detecção de vazamento por balanço de massa.

O fator que representa o inventário pode ser desenvolvido e mostrado em função da massa específica e variação de área, ou seja,

$$\frac{dM_L}{dt} = \frac{d}{dt} \int_0^L \rho(x) A(x) dx,$$
(5)

onde  $M_L$  é a massa do inventário do duto, L é o comprimento do duto,  $\rho$  é a massa específica, A é a área de seção transversal do duto que pode variar em função de mudanças de diâmetros e espessuras da parede do duto, sendo esta última mais frequente.

A massa específica e a área da seção transversal do duto variam com a temperatura e pressão.

Se a densidade e a área forem constantes ao longo do duto, então esta simplificação leva à equação,

$$\dot{M}_{I}(t) - \dot{M}_{O}(t) = 0.$$
 (6)

Partindo do mesmo pressuposto de que a densidade é constante e igual tanto na saída quanto na entrada, então a Equação (6) pode ser simplificada ainda mais, visto que  $\dot{M} = \rho \dot{V}$ , sendo  $\dot{V}$  a vazão volumétrica, ou seja,

$$\dot{V}_{I}(t) - \dot{V}_{O}(t) = 0.$$
 (7)

Esta diferença então pode ser comparada a um resíduo cujo valor pode significar um vazamento.

Este balanço de linha pode ser melhorado se, ao invés da massa específica ser considerada constante ao longo do duto, considerar-se um valor médio para pressão e um valor médio para temperatura a fim de obter uma massa específica média ao longo do duto. Aliada às premissas de que não existam expansões no duto e de que o fluido tenha um módulo de elasticidade representativo, a Equação (7) pode ser transformada em

$$\dot{V}_I(t) - \dot{V}_O(t) = \frac{dV_L}{dt}.$$
(8)

As simplificações mencionadas anteriormente resultam em um inventário

$$V_L = \frac{M_L}{\rho_L} \tag{9}$$

A Equação (4) é a equação mais exata com o inventário variando de acordo com a Equação (5).

O que se faz na prática é discretizar o duto em *N* segmentos, de forma que o inventário do duto possa ser expresso como

$$\frac{dM_L}{dt} = \frac{d}{dt} \int_0^L \rho(x) A(x) dx \approx \sum_{i=1}^N \rho_i A_i \Delta x_i, \tag{10}$$

onde  $M_L$  é a variação de massa do inventário, L é o comprimento do duto,  $\rho$  é a massa específica, A é a área de seção transversal do duto e  $\Delta x_i$  é o incremento de comprimento na direção axial.

Nesse caso, cada segmento possui valores constantes de densidade, temperatura e pressão. A massa específica então pode ser corrigida utilizando fatores de correção apropriados para cada fluido, tal como mencionado na seção 2.2.4, que descreve as normas utilizadas para correção de pressão e temperatura.

O método desenvolvido nesta dissertação foi baseado em (Stouffs e Giot 1993). A parcela do balanço de massa mostrada na Equação (4) foi realizada conforme (Stouffs e Giot 1993) por meio da equação

$$\frac{dM_L}{dt} = \int_0^L \frac{A}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} dx,\tag{11}$$

onde  $M_L$  é a variação de massa do inventário, L é o comprimento do duto, P é a pressão interna no volume de controle, A é a área de seção transversal do duto e c é a velocidade de propagação do som no meio. A área da seção transversal do duto foi calculada levando-se em consideração sua dependência à pressão e à temperatura.

Devido à elasticidade do duto, este pode sofrer expansões radiais e longitudinais. No entanto, para os dutos operados pela Transpetro, que estão em sua maior parte enterrados em torno de 1 m abaixo da superfície do solo, com restrição axial e sem juntas de expansão, considerou-se apenas a expansão radial.

Segundo (Larock *et al.* 1999), considerando o material da tubulação homogêneo e isotrópico, segundo teoria de mecânica dos sólidos, pode-se escrever

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2}{1 - \mu^2} E,\tag{12}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \mu \sigma_2}{E},\tag{13}$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1}{1 - \mu^2} E$$
 (14)

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 - \mu \sigma_1}{E}.$$
 (15)

Nestas equações,  $\sigma_1 \in \varepsilon_1$  referem-se à tensão longitudinal e deformação na direção longitudinal, respectivamente, enquanto que  $\sigma_2 \in \varepsilon_2$  são a tensão circunferencial e deformação na direção circunferencial, respectivamente.  $\mu$  é o coeficiente de Poisson do material e *E* o módulo de elasticidade do aço.

A mudança no volume pode ser definida na forma incremental, por

$$\delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L (\Delta \varepsilon_1 + 2\Delta \varepsilon_2), \tag{16}$$

onde  $\delta V$  é a variação de volume, D é o diâmetro interno,  $\delta L$  é a variação de comprimento na direção axial,  $\varepsilon_1$  é a deformação longitudinal e  $\varepsilon_2$  a deformação circunferencial.

Segundo (Larock *et al.* 1999), resultados experimentais tendem a aproximar a condição dinâmica da estática o que estabelece a relação

$$\frac{\Delta pD}{2e} = \frac{\varepsilon_2 - \mu \varepsilon_1}{1 - \mu^2} E.$$
(17)

Nesta equação,  $\Delta p$  representa a variação de pressão e *e* representa a espessura da parede do duto

Levando em consideração o exposto anteriormente sobre a restrição axial existente para os dutos que são objetos deste trabalho, pode-se considerar que não há deformação no sentido longitudinal, portanto,  $\varepsilon_1 = 0$ . Disto resulta que a Equação (12) em sua forma incremental pode ser escrita como

$$\Delta \sigma_1 = \frac{\mu \varepsilon_2}{1 - \mu^2} E. \tag{18}$$

A Equação (17), quando  $\varepsilon_1 = 0$ , reduz-se a

$$\frac{\Delta pD}{2e} = \frac{\varepsilon_2}{1-\mu^2} E.$$
<sup>(19)</sup>

Sendo assim, substituindo a Equação (17) na Equação (16) tem-se

$$\delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L \left( \frac{\Delta p D}{e} \cdot \frac{1 - \mu^2}{E} \right).$$
<sup>(20)</sup>

Segundo (Souto 2005), a contribuição da temperatura pode ser adicionada ao termo deformação  $\varepsilon$ , fazendo com que a Equação (15) leve em consideração os efeitos de temperatura, ou seja,

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 - \mu \sigma_1}{E} + \alpha \Delta T, \tag{21}$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica do material do duto e  $\Delta T$  é a variação de temperatura.

Se os efeitos da temperatura forem incluídos então, a equação (20) torna-se

$$\delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L \left( \frac{\Delta p D}{e} \cdot \frac{1 - \mu^2}{E} + 2\alpha \Delta T \right).$$
<sup>(22)</sup>

Alguns valores típicos dos parâmetros relevantes para o aço normalmente utilizado na construção de dutos podem ser observados na Tabela 1.

**Parâmetros** Valor Módulo de Elasticidade  $2 \times 10^{11}$  Pa Coeficiente de Expansão Térmica  $1,17 \times 10^{-5} C^{-1}$ Coeficiente de Poisson 0,3

Foi desenvolvido um sistema que realiza o cálculo do gradiente hidráulico de forma diferente daquela implementada pelo sistema de gradiente hidráulico utilizado na localização de vazamento. Neste último, as condições de contorno podem ser: vazão e pressão do expedidor, ou vazão e pressão do recebedor. Para o

Tabela 1: Parâmetros típicos para o aço empregado em dutos na indústria de petróleo

41

sistema utilizado no balanço de massa verificou-se que a utilização de pares do mesmo lado como condição de contorno não funcionam bem para o propósito de detecção de vazamento. Constatado isso, criou-se uma rotina de cálculo do gradiente hidráulico cujas condições de contorno foram as pressões do expedidor e do recebedor. No entanto, devido à natureza do cálculo, criou-se uma rotina para realizar a sintonia por meio de dois fatores: Ajuste Fino e Ajuste Grosso.

Algumas condições devem ser atendidas para que os ajustes sejam executados. Uma das condições é que o duto esteja operando em regime permanente e que o duto esteja em operação. Estas condições são verificadas por meio do monitoramento da variação de pressão e da variação de vazão, sendo a vazão maior do que zero. Outra verificação é que o sistema não esteja alarmando para que o vazamento não seja mascarado.

Se estas condições forem satisfeitas, o sistema verifica se a pressão calculada do recebedor é maior ou menor do que a pressão medida. Se o módulo desta diferença for maior do que 490332,5 Pa (5 kgf/cm<sup>2</sup>), valor configurável e definido arbitrariamente, então o ajuste grosso é utilizado, caso contrário o ajuste fino é utilizado. Esse ajuste, que pode ser o grosso ou o fino, é somado à viscosidade. Se houver mais de um produto no inventário do duto este ajuste é realizado em todos os produtos de forma gradual.

Essa rotina de ajuste é similar ao controle proporcional com ganho variável da teoria de controle PID, (Seborg *et al.* 2003).

Existe um mecanismo que foi implementado para aumentar a confiabilidade (API 2012a) do sistema na geração de alarmes. Além da condição do limite de alarme ser superado, a variação do empacotamento, ou seja, a variação de massa do inventário tem que ser negativa, isto é, o duto deve estar desempacotando e com desvio, variação de vazão deve ser negativo também. Observando a Figura 11, para estas condições serem atingidas o resultado do balanço de massa deve estar no terceiro quadrante. Outras condições operacionais levam ao resultado do balanço de massa estar presente em outros quadrantes. Dessa forma muitos alarmes falsos são evitados.



Figura 11: Variação de Vazão X Variação de Empacotamento

As variáveis discretizadas de pressão e temperatura poderão ser calculadas por meio de equações para regime permanente, no entanto, sua exatidão melhora bastante se forem utilizados métodos que levem em consideração o efeito transiente, tais como volumes finitos (Anderson e Wendt 1995), ou método das características (Streeter *et al.* 1998). Nesse último caso, o balanço de massa passa a ser compensado por um modelo RTTM, e a técnica está fora do escopo desta dissertação.

Tendo em vista o exposto acima, pode-se resumir a detecção do vazamento como baseada na diferença entre a massa que sai e a massa que entra, somada à variação de massa do inventário do duto. Se este valor for maior do que um determinado limiar determinado a partir de variáveis históricas e incertezas do sistema tal como mostrado em (Montalvão e Aramaki 2012), então o sistema indica a existência de um vazamento.

## 2.3.2. Lógica *Fuzzy*

Esta não é uma técnica usual para sistemas de detecção de vazamento. Não se encontra dentre as técnicas mencionadas na API 1130 (API 2012a), porém existem alguns trabalhos, tal como o mostrado em (Da Silva *et al.* 2005), que foi utilizado como base para o desenvolvimento desta dissertação.

Esta técnica se baseia no reconhecimento da assinatura de vazamento tal como mostrada na Figura 6, levando em consideração também os efeitos mostrados na Figura 7.

O sistema proposto em (Da Silva *et al.* 2005) utiliza as variáveis de processo pressão do expedidor, vazão do expedidor, pressão do recebedor e vazão do recebedor.

O sistema então utiliza dois subsistemas *fuzzy*, mostrados na Figura 12. Um dos subsistemas é responsável pela identificação do estado operacional em que o duto se encontra. Estes estados podem ser classificados como: duto bloqueado, duto partindo ou parando, duto em transiente operacional, duto em regime permanente, ou duto com algum problema operacional. Estes estados podem ser observados na Figura 12 a direita. Na Figura 12 a esquerda é possível observar as entradas do primeiro subsistema. Duas entradas podem ser observadas, a vazão média que pode ser zero, baixa, normal ou alta e variável Transdp cuja equação está mostrada na equação (24).

O outro subsistema é responsável pela detecção do vazamento propriamente dita. A saída do primeiro bloco *fuzzy*, responsável pela identificação de estado, é utilizada como uma das entradas para o segundo bloco, juntamente com as variáveis de processo já mencionadas.



Figura 12: Sistema proposto em (Da Silva et al. 2005)

As variáveis *fuzzy* relacionadas ao estado operacional do duto podem ser vistas na Figura 13.



Figura 13: Variáveis de entrada e saída associadas ao estado operacional

Qm é a média das vazões instantâneas, ou seja,

$$Q_M = \frac{Q_0 + Q_i}{2} \tag{23}$$

Os transientes são computados de duas formas, uma pela variação de vazão e outra pela variação de pressão. A variável *Transdp* computa o transiente pela variação de pressão,

$$Transdp = abs\left(\frac{P_O(t) - P_D(t) - (P_O(t-1) - P_D(t-1))}{\Delta t}\right)$$
(24)

A Figura 14 mostra as variáveis de entrada e saída para o bloco *fuzzy* responsável pela detecção de vazamento propriamente dita. Observa-se que uma das entradas, conforme mencionado anteriormente, é saída do primeiro bloco. Este bloco final utiliza a variação de vazão juntamente com o estado operacional do duto para classificar o desvio.



Figura 14: Variáveis de entrada e saída associadas ao desvio.

O desvio pode ser classificado como erro de medição, alarme de erro de medição, situação normal, alarme de vazamento e vazamento. O estado operacional do duto é uma característica que acrescenta confiabilidade ao método de detecção de vazamento uma vez que algumas situações operacionais podem gerar alarmes falsos em sistemas de detecção de vazamentos convencionais. Por exemplo, uma partida de duto leva a uma vazão do expedidor maior do que a do recebedor até o duto estabilizar, assim como uma parada de bombeio pode leva a uma vazão do recebedor menor do que a do expedidor. Situações que se assemelham em parte a uma assinatura de vazamento.

# 3 Metodologias de localização de vazamentos para líquidos

Uma vez que o vazamento tenha sido detectado é interessante prover, se possível, a informação da localização do vazamento, para que ações de mitigação sejam realizadas, diminuindo assim os possíveis danos ambientais.

Conforme mencionado anteriormente, muitos sistemas de detecção de vazamento comerciais não possuem esta funcionalidade.

Existem muitas variações de técnicas comumente encontradas para localização de vazamentos. (Geiger *et al.* 2003) enumeram as principais técnicas empregadas. Dentre os possíveis sistemas considerados internos (API 2012a) estão o método de interseção dos gradientes, análise da propagação das ondas (doravante conhecido como estimativa pela velocidade sônica dos fluidos), métodos de otimização e métodos estatísticos, tais como o teste de hipóteses.

Neste capítulo serão abordados alguns métodos convencionais, tais como a estimativa da localização pela velocidade sônica e pelo cruzamento do gradiente hidráulico e outro não convencional, utilizando um método baseado em redes neurais artificiais para localização de vazamentos.

### 3.1. Estimativa pela velocidade sônica

Este é um método clássico para estimar a localização por meio da velocidade sônica do fluido. Este método é um dos mencionados na (API 2015) na seção referente à localização de vazamentos. A localização do vazamento pode ser determinada a partir de

$$x_{leak} = \frac{1}{2} \big( (x_2 - x_1) + c(t_1 - t_2) \big), \tag{25}$$

onde  $x_1$  é a posição inicial do duto, onde está localizado o transmissor de pressão localizado no expedidor e  $x_2$  é a posição final do duto, onde está localizado o transmissor do recebedor. A velocidade sônica do fluido é representada pela variável c,  $t_1$  é o instante de tempo em que ocorre a variação da pressão do lado do expedidor, assim como  $t_2$  é o instante de tempo em que ocorre a variação da pressão do lado do recebedor.

A Equação (25) pode ser deduzida a partir da observação da Figura 15, que mostra um exemplo de sistema de localização de detecção de vazamento baseado no método acústico.



Figura 15: Diagrama de um sistema de detecção acústico, adaptado de (Liu et al. 2015)

Adotando a convenção mostrada na Figura 15, pode-se notar que o tempo necessário para que a onda de pressão propagada a montante do vazamento atinja o sensor 1 será definido pela Equação (26), assim como o tempo de propagação da onda de pressão a jusante do vazamento para atingir o sensor 2 será definido pela Equação (27). Fazendo a diferença de tempo entre  $t_1$  e  $t_2$ , obtêm-se a Equação (28). Isolando a variável x, posição do vazamento, na Equação (28) resulta na Equação (25).

$$t_1 = \frac{X}{c} \tag{26}$$

$$t_2 = \frac{(L-X)}{c} \tag{27}$$

$$t_1 - t_2 = \Delta t = \frac{x}{c} - \frac{(L - X)}{c}$$
(28)

A determinação da vazão de vazamento, segundo (API 2015), é

$$\Delta p = -\frac{1}{A} c \dot{M}_{leak},\tag{29}$$

onde  $\Delta p$  é a variação de pressão, *A* corresponde a área interna da seção transversal do duto e  $\dot{M}_{leak}$  é a vazão mássica do vazamento.

A Equação (29) pode ser transformada em vazão volumétrica conforme

$$Q_{leak} = \frac{-\Delta pA}{c\rho}.$$
(30)

Outra consideração importante para as duas estimativas, localização e vazão do vazamento, é a velocidade sônica. Esta variável foi admitida constante, porém ela pode variar, conforme

$$c = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}(C)}}$$
(31)

Na Equação (31), K é o módulo de elasticidade do fluido, também chamado de *Bulk Modulus*. A variável  $\rho$  representa a massa específica do fluido, D representa o diâmetro interno, E a elasticidade do duto, também conhecido como módulo de Young. A espessura da parede do duto é definida como e. Existe ainda o fator de restrição (Larock *et al.* 1999), C. Este fator pode variar segundo os seguintes casos: (a) duto ancorado a montante somente, (b) duto sem movimentação axial, e (c) com juntas de expansão longitudinal ao longo do duto.

São considerados dutos finos, segundo algumas referências, aqueles para os quais a relação entre diâmetro e espessura da parede do duto é menor do que 25, (Menon 2004). Outras referências falam em 45 (Larock *et al.* 1999). De acordo com o caso, selecionado o fator de restrição pode ter os seguintes valores, sendo  $\mu$  o

coeficiente de Poisson que, para o aço, possui valor usual igual a 0,3. Para dutos finos, têm-se

para o caso (a): 
$$C = \frac{5}{4} - \mu$$
, (32)

*para o caso* (*b*): 
$$C = 1 - \mu^2$$
 e (33)

$$para \ o \ caso \ (c): C = 1. \tag{34}$$

Para dutos considerados grossos, os fatores de restrição variam segundo cada caso de acordo com

para o caso (a): 
$$C = \frac{1}{1+\frac{e}{D}} \left[ \left( \frac{5}{4} - \mu \right) + 2\frac{e}{D} (1+\mu)(1+\frac{e}{D}) \right]$$
 (35)

para o caso (b): 
$$C = \frac{1}{1+\frac{e}{D}} \left[ (1-\mu^2) + 2\frac{e}{D}(1+\mu)(1+\frac{e}{D}) \right]$$
 (36)

para o caso (c): 
$$C = \frac{1}{1+\frac{e}{D}} \left[ (1) + 2\frac{e}{D}(1+\mu)(1+\frac{e}{D}) \right]$$
 (37)

Observa-se que, se e / D for muito pequeno, as Equações (35), (36) e (37) se transformam nas Equações para dutos considerados finos, (32), (33) e (34), respectivamente.

Considerando a observação do parágrafo anterior, optou-se por utilizar os fatores de restrição dados pelas equações para dutos considerados grossos e especificamente a equação para o caso (b), equação (36), uma vez que a maior parte dos dutos operados pela Transpetro está enterrada e, portanto, com restrição axial de movimentos.

Conforme pode ser observada pela equação (31), a velocidade sônica varia, entre outras variáveis, com o diâmetro interno do duto, o que faz com que a premissa utilizada para as estimativas apresentadas anteriormente possua um nível de incerteza, uma vez que o duto modelado possui variações de espessura da parede do duto ao longo de seu comprimento.

## 3.2. Gradiente hidráulico

O gradiente hidráulico é um recurso bastante utilizado para acompanhamento de operações em oleodutos, podendo ser observado na Figura 16.



Figura 16: Método da interseção de gradientes. Extraído de (API 2015)

Com o início do vazamento usualmente tem-se o início da formação de uma assinatura, basicamente composta pelo decaimento das pressões a montante e a jusante ao vazamento, que normalmente são visualizadas somente nas extremidades do duto, e aumento de vazão no lado do expedidor, com diminuição da vazão no lado do recebedor. A linha tracejada representa o gradiente hidráulico antes do vazamento. A linha contínua representa a interseção de dois gradientes: um utilizando as condições de contorno, pressão e vazão do expedidor e a outra utilizando as condições de contorno do recebedor, pressão e vazão. A interseção destes dois gradientes indica a posição do vazamento (x leak).

Segundo (API 2015), este método é normalmente acoplado a métodos de detecção de vazamento por balanço de massa, ou seja, no momento em que um vazamento é detectado pelo sistema este método é acionado para estimar a localização do vazamento.

Este método é utilizado para regime permanente. Seu princípio se baseia na equação de perda de carga de Darcy-Weisbach (Larock *et al.* 1999). O gradiente a montante do vazamento pode ser calculado por

$$\frac{dP_{up}}{dx} = f \frac{\dot{M}|\dot{M}|}{2D\rho A^2},\tag{38}$$

onde  $\frac{dP}{dx}$  é a variação de pressão ao longo do comprimento do duto, f é o fator de fricção do duto,  $\dot{M}$  é a vazão mássica, D é o diâmetro interno do duto,  $\rho$  é a massa específica do fluido e A representa a área interna da seção transversal do duto. O gradiente a jusante do vazamento pode ser calculado por

$$\frac{dP_{down}}{dx} = f \frac{(\dot{M} - M_{leak})|\dot{M} - M_{leak}|}{2D\rho A^2}.$$
(39)

Dessa forma, se os gradientes a montante e a jusante do vazamento são representados pelas variáveis  $g_1$  e  $g_2$ , respectivamente, então a localização, x, pode ser determinada por

$$\Delta P - Lg_2 = x(g_1 - g_2)$$
(40)

$$x = \frac{\Delta P - Lg_2}{(g_1 - g_2)}.$$
(41)

Em teoria, o que se pode observar pelas Equações (40) e (41) é que o cruzamento dos gradientes hidráulicos representados pelas variáveis,  $g_1$  e  $g_2$ , determina em seu ponto de interseção a localização do vazamento. Estas equações estão mostradas na norma API 1149 (API 2015). Na prática não é tão simples realizar este cálculo. O que foi realizado neste trabalho foi a determinação do gradiente hidráulico com as condições de contorno do lado do expedidor e do lado recebedor por meio das pressões e vazões respectivas. Então, a interseção dos gradientes foi determinada por meio da menor diferença entre os dois gradientes. A interseção pode ser observada graficamente na Figura 61. Realizando a diferença ponto a ponto entre os dois gradientes, determina-se a interseção como sendo a menor diferença entre os pontos.

### 3.3. Redes Neurais Artificiais

Uma possível técnica de localização de vazamentos que utiliza somente o uso de redes neurais artificiais é descrita nesta seção e foi baseada em (Barradas *et al.* 2009). Na realidade, este método foi originalmente proposto tanto para detecção como para localização do vazamento, no entanto, a opção de colocá-la neste capítulo está baseada no fato de que testes realizados no sistema desenvolvido comprovaram que este método tem melhor desempenho para localização do que para detecção.

Um estudo baseado em redes neurais (Verde *et al.* 2008) mostrou que, para a aplicação de detecção de vazamentos, dentre as seguintes arquiteturas, modelo linear generalizado (GLM), Perceptron multicamadas (MLP) e funções de base radial (RBF), a MLP foi a que apresentou o menor erro de validação. Assim, a arquitetura escolhida foi a MLP com atrasos na entrada, corroborando o proposto em (Barradas *et al.* 2009).

O sistema proposto em (Barradas *et al.* 2009), consiste em segmentar um duto em várias partes, de maneira que os segmentos sejam divididos em seções delimitadas por pontos de vazamento, tal como mostrado na Figura 17. O sistema de redes neurais deve ativar o neurônio corresponde à localização mais próxima.



Figura 17: Modelo de duto segmentado, extraído de (Barradas et al. 2009).

O método pode ser melhor compreendido observando a Figura 18. O duto fornece como dados de entrada somente as vazões nos extremos, expedidor e

recebedor, não utilizando as medições de pressão, que normalmente são utilizados por outros métodos para compor a assinatura de vazamento.



Figura 18: Esquema do sistema proposto por (Barradas et al. 2009)

Os blocos superiores na Figura 18, blocos: *artificial neural network*, *binary filter* e *state codifier* mostram a parte principal do sistema de detecção e localização de vazamentos. As vazões (expedidor e recebedor) medidas durante os vazamentos realizados para treinamento da rede são submetidas à rede neural cuja saída é filtrada por um filtro binário e codificada de forma a identificar o vazamento e sua localização aproximada.

Após o treinamento, espera-se que a rede, na presença de vazamentos, seja capaz de fornecer em sua camada de saída valores que indiquem a localização do vazamento, como mostrado na Tabela 2, onde  $F_1(k)$ ,  $F_2(k)$  e  $F_3(k)$  são as saídas esperadas dos neurônios da camada de saída.

Quando não existem vazamentos, o sistema encontra-se no estado 1 e as saídas de cada neurônio na camada de saída devem corresponder idealmente a 0. Como, neste exemplo, são utilizados três vazamentos, há 8 estados possíveis enumerados pela Tabela 2. Vazamentos que estejam ativos devem levar a saída do neurônico correspondente a 1, sendo possível a ocorrência de vazamentos simultâneos o que indicariam mais de uma saída ativa simultaneamente.

Tabela 2: Adaptado de (Barradas <i>et al.</i> 2009)					
Estado	Vazamentos Ativos	F1	F2	F3	
1	Sem vazamentos	0	0	0	
2	1	1	0	0	
3	2	0	1	0	
4	3	0	0	1	
5	1 e 2	1	1	0	
6	1 e 3	1	0	1	
7	2 e 3	0	1	1	
8	1, 2 e 3	1	1	1	

O treinamento, assim como os dados simulados produziram, as saídas mostradas na Figura 19. Na presença de ruído é necessário a etapa do filtro binário, pois saídas diferentes de 1 podem ser geradas o que resultariam em uma incorreta identificação do estado de vazamento.



Figura 19: Saídas da rede neural, com estado real do duto, saída bruta da rede neural e saída após filtro (Barradas et al. 2009)

Os bloco inferior na Figura 18 composto pelos blocos magnitude estimation algorithm e magnitude classifier, utilizados para estimar a magnitude do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1412678/CA

vazamento, não são descritos no artigo original (Barradas *et al.* 2009), no entanto, pode-se deduzir o seu funcionamento, conforme descrito abaixo.

A partir da diferença de vazões entre expedidor e recebedor é possível estimar a magnitude do vazamento. Estes sinais por si só não são suficientes, pois é possível que o duto esteja em uma condição operacional de empacotamento ou desempacotamento, normalmente devido a partidas e paradas, o que poderia indicar uma vazão de vazamento quando não existe vazamento. Esta possivelmente é a razão pela qual existem outros sinais do bloco superior após o filtro binário sendo realimentados no bloco do estimador da magnitude do vazamento. Além disso, comparar as vazões do processo com as vazões do processo,  $Q_1(k)$  e  $Q_4(k)$  podem ajudar na validação da estimativa de vazamento, assim como na identificação do estado de vazamento.

# 4 Modelagem do sistema de detecção e localização de vazamentos para líquidos

## 4.1. Aquisição de dados

Nesta seção a parte de aquisição de dados do sistema desenvolvido é descrito em detalhes. Foi utilizado apenas a comunicação dos sistemas desenvolvidos com o simulador hidráulico. Porém, para que o sistema proposto tenha aplicação real, uma comunicação com o sistema supervisório teve que ser desenvolvida. Com este fim, foi também desenvolvido um *driver* de comunicação com o sistema supervisório utilizado na Transpetro pelo Centro Nacional de Controle e Operação, CNCO.

### 4.1.1. Driver para o simulador hidráulico

O trabalho mostrado em (Montalvão *et al.* 2015) foi a base para o desenvolvimento do módulo de comunicação utilizado nesta dissertação. Esta referência mostra o desenvolvimento de um *driver* de comunicação entre o simulador hidráulico SPS e um sistema de detecção de vazamento do tipo RTTM, Real Time Transient Model, chamado SDVO, sistema de detecção de vazamento em oleodutos.

O simulador hidráulico mostrado em (Montalvão *et al.* 2015) é o mesmo utilizado nesta dissertação. A comunicação entre o sistema desenvolvido e o simulador utiliza o protocolo industrial OPC (Lieping *et al.* 2007).

Este protocolo foi utilizado em sua versão 2.0 (Foundation 1999), que não é a versão mais recente do mesmo, porém, devido à facilidade de encontrar bibliotecas abertas para esta versão, assim como informações a respeito da utilização destas bibliotecas, esta foi a versão escolhida. O sistema de redes neurais desenvolvido em VB.NET, denominado NEURA, usufrui do driver desenvolvido, conforme ilustrado na Figura 20. O sistema "massbalance" desenvolvido também usufrui deste mesmo *driver*. O aplicativo *fuzzy* desenvolvido no ambiente do MATLAB utiliza o conjunto de ferramentas do protocolo OPC para comunicação do MATLAB com o simulador hidráulico, conforme Figura 21.

A versão do simulador hidráulico utilizado foi a 9.7. Esta versão não é a mais atual, porém foi testada a versão 10.0, que no momento da redação deste trabalho, era a versão mais atualizada, e foi constatado que a mesma é incompatível com o driver desenvolvido, possivelmente por utilizar uma versão mais atual do protocolo OPC.





Figura 21: Comunicação do sistema Fuzzy com o simulador.

## 4.1.2. Driver para o sistema supervisório OASYS

Um dos sistemas utilizados na Transpetro, em particular no CNCO, é o Stoner. Este sistema possui três módulos diferentes. O primeiro módulo, que foi utilizado intensivamente neste trabalho, é o módulo conhecido como off-line, cujo objetivo é permitir a simulação hidráulica de dutos em tempo de simulação. O segundo sistema é o conhecido como "Trainer", que realiza todas as funções do módulo simulador, porém em tempo real. O terceiro módulo, conhecido como SPS Online, é o módulo de detecção de vazamento, que pode ser considerado um sistema do tipo RTTM, (API 2012a).

Este sistema está implantado em alguns dutos de considerável complexidade dentre os dutos operados pelo CNCO. No passado, foi realizado um teste de campo, conforme pode ser visto em (De Almeida *et al.* 2006).

O sistema de detecção de vazamento implantado no CNCO possui uma interface para aquisição de dados e exportação de alarmes para o sistema supervisório OASYS, utilizado no CNCO.

A interface de aquisição de dados consiste na instalação de um serviço em uma porta específica TCP/IP que utiliza um protocolo de comunicação baseado em XML.

O fluxo de informação deste sistema de detecção de vazamento pode ser visto na Figura 22. Destacado em azul está o bloco que representa o sistema de detecção de vazamento. Este se comunica através de um driver desenvolvido especificamente para esta aplicação, que captura dados do sistema SCADA e os transforma em um arquivo binário proprietário denominado RTU.dt, que por sua vez é lido pelo sistema SPS Online.



Figura 22: Fluxo de informações do SPS Online. Adaptado de (ADVANTICA 2008).

Este driver de comunicação acessa algumas variáveis de ambiente configuradas previamente, tais como endereços IPs do sistema SCADA, porta TCP/IP a ser utilizada pelo serviço, localização do arquivo binário, entre outras informações.

Foi realizado um estudo acerca do funcionamento deste programa, uma vez que seu código fonte em C++ estava disponível e desenvolvido uma aplicação que utiliza o mesmo protocolo em VB.NET.

Uma aplicação de filtro digital foi desenvolvida e utiliza os mesmos mecanismos de aquisição de dados que é utilizada pelo sistema de detecção de vazamento SPS.

#### 4.2. Filtros digitais

A aplicação de filtros digitais é usual em muitos sistemas de detecção de vazamento em um estágio de pré-processamento das variáveis de entrada. A referência (API 2015) menciona em seu capítulo 9 a parte referente à filtragem dos dados.

Segundo (API 2015), os filtros mais relevantes são: média móvel, filtro passa alta e remoção de pontos espúrios, os denominados *outliers*.

O filtro de média móvel é bastante utilizado em sistemas de balanço de massa ou de volume e sua expressão analítica é

$$X_{j}^{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=j-N+1}^{j} X_{i}$$
(42)

onde N é o tamanho da janela móvel, j é o índice que juntamente com o índice i determinam os limites da janela móvel e X a variável que se deseja filtrar.

De acordo com (API 2015) a inserção deste filtro introduz um deslocamento temporal dado por

$$atraso = \frac{N}{2} \cdot \Delta t,$$
 (43)

onde N é o tamanho da janela móvel e  $\Delta t$  é o tempo de aquisição de dados.

Para testar alguns filtros analisou-se um sinal de densidade de um duto utilizado pela Transpetro cujos produtos transportados são: diesel, gasolina e GLP. Este sinal de densidade apresentava um ruído muito intenso, cuja fonte do distúrbio era o mau funcionamento do transmissor de densidade. Este sinal pode ser visto na Figura 23.



Figura 23: Sinal de densidade com elevada taxa de ruído

O sinal de densidade é muito importante em alguns sistemas auxiliares de operação. Alguns sistemas de detecção de vazamento utilizam este sinal para definir qual produto está sendo movimentado no duto e realizar os cálculos de acordo com a especificidade de cada produto.

Em um determinado cenário o sinal de densidade estava como mostrado na Figura 24.



Figura 24: Sinal de densidade para uso do sistema de detecção de vazamento

Esta variação gerou uma série de interfaces entre fluidos no inventário do sistema de detecção de vazamento, conforme pode ser observado na Figura 25.



Figura 25: Sistema de detecção de vazamento para sinal de densidade mostrado na Figura 24.

Dessa forma, a composição do duto pode estar incorreta. Normalmente, a informação da densidade é utilizada para dois fins em sistemas RTTM. O primeiro é referente ao mecanismo de seleção do produto que está entrando no duto. No caso de um poliduto (duto que transporta mais de um tipo de produto na linha), o impacto é maior, visto que as propriedades dos fluidos são diferentes.

O segundo impacto é na correção de volume. A densidade é uma das variáveis de entrada, portanto as correções poderão sofrer variações com este ruído, gerando um desvio que poderá gerar alarmes falsos, dependendo da sintonia executada para o duto em questão.

Existe outra situação que pode ocorrer dependendo das funcionalidades de cada sistema supervisório. No caso do CNCO, o sistema supervisório permite que seja configurada uma matriz de *meter factors*<sup>3</sup> de tamanho máximo 9x9. Esta matriz representa, em suas linhas e colunas, uma variação de vazão por variação de densidade. Para cada faixa de vazão e para cada faixa de densidade pode existir um fator, oriundo de metodologias de calibração, que procura eliminar erros sistemáticos dos medidores de vazão.

Além destes dois itens, existe ainda a seleção de algoritmo de correção de volume, que depende do produto. Se um determinado duto transporta etanol, gasolina, diesel e GLP, serão necessários algoritmos específicos para correção de pressão e temperatura para cada um destes produtos. Dentro do exemplo mostrado, apenas a gasolina e o diesel possuem algoritmos em comum, sendo que o etanol e o GLP possuem algoritmos diferentes para a correção de volume na condição padrão. Uma seleção errada de produto devido a significativas oscilações da densidade, tal como mostrado na Figura 23, podem fazer com que fragmentos de produtos possam ser corrigidos de forma errada.

Para verificar este efeito foi desenvolvida uma interface que tenta simular este problema. Utilizaram-se então os limiares mostrados na Tabela 3 para cada produto movimentado em um determinado duto. Nesta tabela, GLP é o acrônimo para gás liquefeito de petróleo, GLNA é gasolina, QAV é querosene de aviação e DMPB representa diesel.

Produto	L1	L2
GLP	0,5	0,7
GLNA	0,7	0,75
QAV	0,75	0,81
DMPB	0,81	0,9

Tabela 3: Limiares para seleção de cada produto. L1: limiar inferior. L2: limiar superior.

Ao simular-se a composição do duto em um período aproximado ao mostrado na Figura 24, de 20/03/2015 a 25/03/2015, obteve-se a composição mostrada na

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> São fatores que são multiplicados aos totalizadores de volume a fim de que sejam feitas correções de erros sistemáticos. Normalmente, estes fatores resultam de algum processo de calibração.



Figura 26. Cada cor representa um produto, sendo azul claro para GLP, verde escuro para gasolina, vermelho para QAV e amarelo para diesel.

Figura 26: Composição do duto para a densidade mostrada na Figura 24.

Volume em m<sup>3</sup>

Somente na parte em azul, correspondente a GLP, há 15,14 m<sup>3</sup> de outros produtos, diferentes de GLP.

Dada essa motivação para o uso de filtros, foram testadas diversas configurações de filtros, sendo implementados em um programa de aquisição de dados para simular o efeito em dados históricos.

O sistema desenvolvido segue o fluxo mostrado na Figura 27. A aquisição de dados foi desenvolvida de acordo com o descrito na seção 4.1.2.



Figura 27: Fluxograma do sistema desenvolvido.

A aplicação do filtro é realizada por meio de um algoritmo testado previamente com dados históricos, sendo este valor filtrado enviado em seguida para o supervisório em um formato XML, através de outra porta utilizando protocolo TCP/IP.

O tempo de aquisição de dados é configurável. As rotinas foram executadas a cada dez segundos.

Os filtros testados foram extraídos de (Narasimhan e Jordache 2000). Para efeito de comparação entre os filtros, foi coletado um período de dados do sinal em questão, conforme Figura 28, e exportado para planilha EXCEL. Também foi criado um gráfico com o valor esperado da densidade (de acordo com o produto

correspondente), indicado pelo sinal REF em vermelho na Figura 28. Este sinal de referência foi criado da seguinte forma: verificou-se, para cada mudança de densidade, qual a média da densidade até o ponto de transição, e deste ponto para trás todos os pontos têm valor igual à média.



Figura 28: Sinal bruto com ruído e referência criada para efeito de comparação

De forma a obter uma métrica para comparar os filtros, foi criada uma rotina para calcular a integral absoluta do erro, IAE, cujo resultado aparece na legenda do sinal filtrado nas figuras 29 a 43, e dada por

$$IAE = \int_{t1}^{t2} |\epsilon| \ dt \tag{44}$$

onde  $\epsilon$  é o erro entre o sinal filtrado e a referência, e t1 e t2 determinam o intervalo de tempo em que o filtro foi realizado.

Para isso foi desenvolvida uma rotina cuja interface gráfica permite selecionar o sinal filtrado e o sinal de referência, assim como escolher a métrica de avaliação (somente o IAE até o momento da escrita desta dissertação).

Dos filtros encontrados em (Narasimhan e Jordache 2000), foram implementados e testados cinco filtros a saber: Filtro exponencial, Filtro exponencial não linear, Média móvel, Média móvel dinâmica e Filtro polinomial.

O primeiro filtro, filtro exponencial, tem equação discreta dada por

$$y_K = \theta x_K + (1 - \theta) y_{k-1},\tag{45}$$

onde o parâmetro  $\theta$  é dado de entrada e pode variar entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de zero, mais significativa é a filtragem.

Este filtro é do tipo IIR (*Infinite Impulse Response*), (Stranneby 2001). A Figura 29 apresenta o resultado do filtro exponencial para  $\theta = 0,08$ , obtendo-se um valor IAE = 450,5 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 29: Filtro exponencial com  $\theta$  igual a 0,08

O segundo filtro testado foi o filtro exponencial não linear. A expressão para este filtro é dada pela Equação (45), porém o parâmetro  $\theta$  do filtro pode ser determinado por

$$\theta = \min\left[1, \frac{x_k - y_{k-1}}{R\sigma}\right].$$
(46)

Nesta equação, *R* é um parâmetro de sintonia e  $\sigma$  o desvio padrão amostral do sinal de medição. O parâmetro  $\theta$  varia da mesma forma que o caso anterior, entre 0 e 1. O valor de *R* varia tipicamente entre 3 e 5.

A Figura 30 apresenta o resultado do filtro exponencial para  $\theta = 0,08$ , obtendo-se um valor IAE = 439,9 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 30: Filtro exponencial não linear aplicado ao sinal de entrada

O filtro exponencial é bom para regime permanente, porém não é eficaz contra *spikes*. Este filtro, portanto, não é adequado quando o sinal possui muitos *outliers*, embora seja eficaz em regime permanente.

O terceiro filtro é a média móvel que possui a expressão

$$y_k = \sum_{i=k-N+1}^k w_j x_i, \tag{47}$$

onde *N* é o tamanho da janela móvel,  $w_j$  é um peso que no caso da média móvel é 1/N e  $x_i$  corresponde ao sinal a ser filtrado.

Este filtro é do tipo FIR (*Finite Impulse Response*), (Stranneby 2001). Dependendo do tamanho da janela móvel, N, o peso de cada variável, w é determinado pelo peso  $w_j$  igual a 1/N. Para o exemplo mostrado na Figura 31, foi utilizada uma janela com 6 pontos. O IAE obtido com este filtro foi de 591,1 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 31: Filtro média móvel com janela igual a 6

O quarto filtro é o de média móvel dinâmica, que é uma variação do filtro de média móvel (cujos pesos são iguais). Nesta variação, os pesos não são iguais, com o vetor de pesos podendo ser definido por

$$w_{i} = \frac{1}{\left[\frac{e^{r}-1}{r}-1\right]} \int_{(i-1)/N}^{i/N} (e^{rx}-1) dx.$$
(48)

Nesse caso, se tem dois parâmetros de entrada: a variável *r* que normalmente, segundo ((Narasimhan e Jordache 2000), está entre 0 e 10 e a variável *N* que indica o total de pontos da janela. Ainda sobre o parâmetro *r*, quanto maior o mesmo, mais peso é dado ao valor mais recente, portanto, menor a intensidade da filtragem.

Para r = 5 e N = 6, o valor do IAE é igual a 615,5 g cm<sup>-3</sup>, conforme pode ser observado na Figura 32.



Figura 32: Filtro de média móvel dinâmica com r = 5 e janela = 6

O quinto filtro é o de média móvel exponencial, EWMA (*exponentially weighted moving average* – média móvel exponencialmente ponderada), definido por

$$y_k = \lambda \bar{y}_k + (1 - \lambda) y_{k-1}, \tag{49}$$

onde  $\bar{y}_k$  é a média móvel com pesos iguais no tempo  $t_k$ ,  $y_k$  é o valor filtrado no tempo  $t_k$  e  $\lambda$  é uma parâmetro de ajuste, que pode variar entre 0 e 1.

A Figura 33 mostra o filtro aplicado com  $\lambda = 0,08$  e N = 6. Neste caso o IAE resultante foi de 447,1 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 33: Filtro de média móvel exponencial com lambda igual a 0,08 e janela igual a 6

Para tentar melhorar o desempenho destes filtros, foi aplicada uma decimação (Proakis e Manolakis 1996) do sinal de forma que fossem adquiridos dados de 20 em 20 segundos, aplicando então novamente os filtros mostrados. Para simular o efeito da decimação foi aplicada a interpolação de Lagrange (Sanchez e Canton 2007) no intervalo mencionado acima, a cada 20 segundos. Os sinais bruto e interpolado podem ser observados na Figura 34.



Figura 34: Sinal bruto e interpolado a cada 20 segundos

O sinal interpolado apresenta IAE igual a 139,8 g cm<sup>-3</sup> em comparação com o sinal de referência. O critério IAE, por ser uma integral e não uma média, depende do número de pontos e, portanto, essa redução não quer dizer que a qualidade é

maior. Este sinal de referência foi criado da mesma forma que o anterior. Ou seja, obteve-se a média da densidade até o ponto de transição, de forma que os pontos anteriores à transição tivessem o mesmo valor, com isso a transição seria igual, até o próximo regime permanente em que os pontos seriam substituídos pelo valor médio. Os dois sinais podem ser visualizados na Figura 35.

Uma vez criado o sinal de referência para os pontos interpolados, foi realizado o teste dos filtros descritos anteriormente.



Figura 35: Sinal interpolado em confronto com o sinal de referência. IAE = 139,8 g cm<sup>-3</sup>

O filtro exponencial, com parâmetro igual ao primeiro caso, no valor de 0,08 resultou no sinal filtrado mostrado na Figura 36. Observa-se que o valor de IAE nesse caso foi de 91,2 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 36: Filtro exponencial com parâmetro igual a 0,08

O filtro exponencial não linear, cujo sinal filtrado pode ser observado na Figura 37, obteve um IAE de 104,0 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 37: Filtro exponencial não linear com R = 5

O sinal filtrado com média móvel com janela igual a 6 pode ser observado na Figura 38. O IAE obtido para este filtro foi de 108,9 g cm<sup>-3</sup>.


Figura 38: Filtro média móvel com janela igual a 6

O sinal filtrado com média móvel dinâmica com janela igual a 6 e r = 5 pode ser observado na Figura 39, resultando em um IAE igual a 123 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 39: Filtro média móvel dinâmica com janela igual a 6 e r = 5

O sinal filtrado com média móvel exponencial com parâmetro igual a 0,08 e r = 5 pode ser observado na Figura 40, resultando em um IAE igual a 91,1 g cm<sup>-3</sup>.



Figura 40: Filtro média móvel exponencial com parâmetro igual a 0,08 e r igual a 5

Para efeito de comparação entre os filtros nos dois cenários, com e sem decimação, pode ser observada a Tabela 4, onde o ganho percentual foi estabelecido em relação ao sinal de referência para ambos os sinais, interpolado e sem interpolação. Nesta tabela, F1 representa a função exponencial, F2 a exponencial não linear, F3 a média móvel, F4 a média móvel dinâmica e F5 a média móvel exponencial.

		·			
Sinais	F1	F2	F3	F4	F5
Sem interpolação	0,72	0,70	0,94	0,98	0,71
Com interpolação	0,65	0,74	0,78	0,88	0,65

Tabela 4: Comparação entre os filtros nos dois cenários

Pode-se observar que a decimação (representada aqui pelo cenário com interpolação) permitiu, em quase todos os casos, com exceção do filtro exponencial não linear, F2, um ganho na redução do ruído.

Sendo assim, optou-se pela utilização do filtro exponencial, F1, cuja implementação é feita por meio da configuração do instrumento no supervisório utilizado no CNCO, com o filtro de média móvel com janela igual a 6. Esta configuração pode ser observada através de simulação pelo programa desenvolvido na Figura 41.



Figura 41: Aplicação dos filtros combinados, exponencial com média móvel

Nesse caso, o filtro exponencial, aplicado no segundo caso antes da interpolação, leva a um ganho menor do que realizar a filtragem após a decimação. O aumento do IAE se deve ao atraso do sinal durante os transientes, conforme pode ser observado na Figura 42.



Figura 42: Atraso do filtro combinado quando o filtro exponencial é aplicado antes da interpolação

Para efeito de comparação, a Figura 43 mostra o mesmo período de tempo analisado na Figura 42, com os filtros aplicados após a interpolação. O atraso mostrado visualmente na Figura 42 é maior do que o atraso mostrado na Figura 43, fato que corrobora para o aumento da métrica IAE da Figura 42 quando comparado com a Figura 41.



Figura 43: Atraso do filtro combinado quando os filtros são aplicados após a interpolação

Foi desenvolvido um programa para aquisição de dados brutos já filtrados por um filtro exponencial inerente ao sistema supervisório, com parâmetro igual a 0,08. Este filtro então foi submetido a um processo de decimação devido ao tempo de aquisição de dados do sistema desenvolvido ter sido configurado para coleta a cada 20 segundos. Em seguida, é aplicado um filtro média móvel com janela igual a 6. Os resultados do sistema em execução em tempo real podem ser conferidos na Figura 44.



Figura 44: Sinal original (azul), com filtro exponencial (laranja) e com filtro combinado (vermelho)

Na Figura 44 pode-se observar o sinal original em azul, representado pelo marcador TEM\_DT\_001\_TEST, o sinal com filtro exponencial aplicado em laranja

representado pelo marcador TEM\_DT\_001 e o sinal com filtro de média móvel aplicado em cima do exponencial, mostrado em vermelho representado pelo marcador CB4\_FT\_ARAMAKI.

Conclui-se que a decimação foi melhor para a maioria dos filtros testados e que o filtro combinado foi a melhor opção, conforme pode ser visualizado na Figura 41 com IAE mais baixo. Além disso, a ordem da decimação é importante, conforme observado na Figura 42 e Figura 43.

# 4.3. Método de detecção de vazamentos

Nesta seção são abordados os desenvolvimentos realizados para os sistemas de detecção de vazamento por balanço de massa e por lógica *fuzzy*.

# 4.3.1. Balanço de massa

Esta seção mostra um dos sistemas de detecção de vazamento desenvolvidos, baseado na técnica balanço de massa. Este projeto foi desenvolvido na plataforma .NET com o uso da linguagem Visual Basic.NET. Este programa aproveita algumas das estruturas já realizadas anteriormente, tais como a comunicação do sistema com o simulador hidráulico e algumas funcionalidades observadas no programa que calcula o gradiente hidráulico.



Figura 45: Interface gráfica do sistema de detecção de vazamento por balanço de massa.

A Figura 45 mostra a interface gráfica do programa. Como pode ser visto existem um menu de funções, uma parte central que mostra os gráficos gerados, sendo que na parte superior do gráfico a curva do gradiente hidráulico com o perfil de elevação é mostrado e na parte inferior deste gráfico é mostrada uma janela com o resultado do balanço de massa. A parte inferior esquerda possui informações relacionadas às variáveis de processo do expedidor e recebedor da seguinte forma: P1 é a pressão do expedidor, P2 é a pressão do recebedor, Q1 é a vazão do expedidor, Q2 é a vazão do recebedor, D1 é a densidade no expedidor, D2 é a densidade no recebedor, T1 é a temperatura no expedidor e T2 a temperatura no recebedor.

Na parte inferior direita da Figura 45 existe um menu de configurações em que é possível definir vários parâmetros relacionados à parte de hidráulica e do sistema que serão descritos nas seções subsequentes.

"Dif" mostra o desvio que é a diferença entre as vazões do expedidor e recebedor e LP é a variável empacotamento. Existe um rótulo ao lado direito da caixa de texto do empacotamento, que é a saída resultante do balanço de massa, demonstrada na Equação (7). Logo abaixo existe uma caixa de texto cuja

informação é a localização do vazamento pelo método do gradiente hidráulico quando o vazamento é detectado.

Primeiramente, deve-se carregar o perfil de entrada que que pode ser visualizado na Figura 46. Uma vez que a pressão interna em cada ponto discretizado do duto deve entrar na parcela do cálculo do empacotamento é necessário calcular estas pressões. (Stouffs e Giot 1993) sugerem a utilização do método das características (Streeter *et al.* 1998) para realizar este cálculo, porém, conforme mencionado antes, esta resolução está fora do escopo deste trabalho, e, portanto foram desenvolvidas rotinas que realizam o cálculo como se fosse uma sequência de regimes permanentes.

Km						
Desenvol	Cota	Vol. Esq	Vol. Dir	Dext	Esp	Tag
. 💌	<b></b>		<b></b>		<b></b>	
(km)	(m)	(m³)	(m³)	(pol)	(pol)	Valvula
0	32	0	225,688	16	0,344	XV-02
16,704	37	16,34	193,752	16	0,344	VES-27/VRE-27
33,275	43,85	41,839	205,54	16	0,344	XV-28
47,803	71,69	27,74	154,203	16	0,344	VES-29/VRE-29
63,192	23,69	193,794	193,854	16	0,344	VES-30
78,479	47,49	148,401	163,978	16	0,344	VES-31
94,955	50,89	119,397	131,705	16	0,344	VES-32/VRE-32
107,781	104,22	96,59	114,218	16	0,344	VES-33
123,884	22,69	205,132	58,215	16	0,344	XV-34
141,02	5,5	199,799	58,182	16	0,344	VES-35
157,487	4,67	227,02	32,647	16	0,438	XV-36/VRE-36
169,19	4,93	231,799	86,183	16	0,438	VES-37/VRE-37
184,02	2	276,827	0	16	0,438	XV-05

Figura 46: Exemplo de arquivo excel de entrada.

Aproveitou-se a existência de uma planilha utilizada para outra aplicação na Transpetro para este trabalho, uma vez que a mesma contém os dados necessários para serem utilizados pelo programa desenvolvido. Além disso, como pretende-se que o sistema possa ser utilizado na Transpetro, é interessante que os arquivos de entrada já existam e sejam compatíveis.

A primeira coluna refere-se ao comprimento desenvolvido do duto em km, a segunda coluna refere-se ao perfil de elevação em metros. As duas colunas seguintes destacadas em verde não são utilizadas pelo programa em sua versão atual. Estas colunas representam o volume vazio quando o oleoduto está escoado a montante e a jusante de cada ponto que depende da geometria do perfil de elevação

por onde o oleoduto está situado. Estas colunas são utilizadas por outro programa conforme mencionado no parágrafo anterior. A quinta coluna é o diâmetro externo do oleoduto em polegadas. A sexta coluna é a espessura da parede do oleoduto em polegadas. A sétima coluna refere-se a pontos notáveis, que normalmente são válvulas que podem existir ao longo do duto, estações, pontos de interesse e outros. Esta última coluna também não está sendo utilizada na versão atual.

A Figura 47 mostra a configuração de produtos utilizada para a aplicação mostrada na Figura 45. Nesta tabela pode-se inserir propriedades do fluido, tais como densidade relativa, viscosidade em cP, calor específico em kJ (kg °C)<sup>-1</sup>, fator de correção da viscosidade com a temperatura, VTMI, coeficiente de dilatação térmica em °C<sup>-1</sup>, módulo de elasticidade do fluido em Pa e pressão de vapor manométrica em kgf cm<sup>2</sup>. Também é possível configurar o volume inicial e a sigla representativa do produto. Os limites L1 e L2 são os limites de densidade para que o programa identifique produtos diferentes na linha em tempo real.

an Tabela											
	Produto	Volume	Densidade	Viscosidade	CalorEspecifi	VTMI	Gamma	BM	Pv	L1	L2
•	OCA1	33093,17	1,0217	502,37	1,926	-0,054	0	1861498	0,5	0	2
	DMPB	0	0,82	0,6	1,4	-0,07	0	1555923	0,5	0,75	1
*											

Figura 47: Configurações dos produtos existentes no duto.

### 4.3.2. Lógica *Fuzzy*

A proposta da construção de um sistema baseado em lógica *fuzzy* iniciou-se por meio de um protótipo implementado em Matlab e testado por meio do simulador hidráulico SPS, conforme pode ser observado na Figura 48. Foi projetado um sistema bem mais simples do que o apresentado em (Da Silva *et al.* 2005) que pode ser conferido em (Aramaki, Tanscheit, *et al.* 2015).



Figura 48: Esquema montado para o sistema de detecção fuzzy.

O sistema desenvolvido em Matlab por meio do conjunto de ferramentas *fuzzy* comunica-se via protocolo OPC com o simulador hidráulico SPS, cujo modelo está preparado para simular vazamentos em três posições distintas, com vazamentos de magnitudes variadas.

O sistema *fuzzy* possui quatro entradas e uma saída, tal como mostrado na Figura 49. As entradas são: (1) diferença entre as vazões no expedidor e recebedor; (2) verificação da condição de *shut-in* ou operação; (3) gradiente de pressão no expedidor e (4) gradiente de pressão no recebedor.



Figura 49: Sistema Fuzzy de Detecção de Vazamentos.

O operador mínimo foi utilizado para combinar os antecedentes das regras e para implicação; o operador máximo foi utilizado para agregação das regras e a defuzzificação foi realizada pelo método de média dos máximos.

As funções de pertinência para as variáveis de entrada estão mostradas na Figura 50. Observa-se que a variável *difflow* é a única variável *fuzzy*, sendo as demais ditas *crisp*.



Figura 50: Funções de pertinências das funções de entrada.

A variável de entrada *shut-in* serve somente para indicar quando o duto está operando, uma vez que este sistema não foi idealizado para a condição de duto parado pressurizado, devendo, portanto, delegar para outro sistema que possa realizar a detecção nesta condição. Esse pressuposto está de acordo com o mostrado na Figura 5.

O importante para as variáveis *DeltaPout* e *DeltaPin* é a indicação do gradiente da pressão de saída e da pressão de entrada respectivamente, ou seja, indica se o duto está pressurizando ou despressurizando, pela observação das variações de pressões em cada ponta, expedidor e recebedor.

A saída pode ser observada na Figura 51. Os estados possíveis são: *shut-in* (duto parado pressurizado), Parada, Transiente, duto em qualquer transiente não classificado como partida ou parada, partida, duto em regime permanente e problema, que é o estado de vazamento.



Figura 51: Saída do sistema de detecção fuzzy.

O sistema possui 22 regras baseadas em conhecimentos empíricos de detecção de vazamento, as quais podem ser observadas na Tabela 5. As siglas P referem-se a positivo, e N, negativo. Estas podem ser combinadas com S para pequeno, M para médio, e B para grande. Ze significa zero, sem efeito. Como exemplo, NM, seria um ajuste negativo médio.

Regra	difFlow	Shutin	DeltaPin	DeltaPout	State
1	NM	Flow	-	-	Transiente
2	PS	Flow	Pressurização	-	Transiente
3	NB	Flow	-	Pressurização	Parada
4	PB	Flow	Pressurização	-	Partida
5	PM	Flow	Pressurização	-	Transiente
6	DC	Not	Dueseurine eão	Pressurização	Transiente
	P3	Flow	Pressurização		
7	ZE	Not		-	Shut-in
	ZE	Flow	-		
8	NB	Flow	Despressurização	Pressurização	Parada
9	76	No	Duesaurine eão	Pressurização	Shut-in
	ZE	Flow	Pressurização		
10	PB	Flow	Despressurização	Despressurização	Problema
11	PS	Flow	Despressurização	Despressurização	Problema
12	PM	Flow	Despressurização	Despressurização	Problema
13	PB	Flow	Despressurização	-	Problema
14	PS	Flow	Despressurização	-	Problema
15	PM	Flow	Despressurização	-	Problema
16	PM	Flow	-	Despressurização	Problema
17	PB	Flow	-	Despressurização	Problema
18	PS	Flow	-	Despressurização	Problema
19	ZE	Flow	-	-	SteadyState
20	PM	Flow	-	Pressurização	Transiente
21	PB	Flow	-	Pressurização	Transiente

Tabela 5: Regras mapeadas por especialista.

22	PS	Flow	-	Pressurização	Transiente

As superfícies de controle da diferença de vazão com variação da pressão do lado expedidor e do lado recebedor podem ser observadas na Figura 52.



Figura 52: Superfícies de controle relacionadas ao par, diferença de vazão e variação de pressão em cada ponta.

A arquitetura do sistema desenvolvido pode ser observada na Figura 53. Nesta figura os blocos do lado esquerdo representam a comunicação OPC com o simulador hidráulico. As primeiras duas variáveis dentro do bloco OPC de leitura são leituras de vazão (expedidor e recebedor). As duas variáveis abaixo representam leituras de pressão (expedidor e recebedor).

As variáveis de pressão são subtraídas dos seus valores passados, representados por um atraso de primeira ordem, de forma a estabelecer o gradiente de pressão de cada lado. Uma vez que os gradientes de pressão tenham sido calculados, estes são multiplicados por um fator de escala que depende do tempo de aquisição configurado para o protocolo OPC. Se o tempo de aquisição for muito pequeno a magnitude do gradiente pode ser pequena.

A variável se saída pode apresentar valores decimais tais como mostrado na Figura 53 o que pode acontecer com muitos estados pela semelhança entre si. No caso do estado 3 que indica estado Transiente, este pode ser confundido com a partida ou com a parada uma vez que estes últimos são transientes também. A identificação do estado foi realizado através do arredondamento da saída, uma vez que para o objetivo de detecção de vazamento somente a diferenciação entre o estado 6, problema, e os demais é importante.



Figura 53: Arquitetura do sistema de detecção fuzzy.

# 4.4. Método de localização de vazamentos

Nas seções a seguir são descritos os desenvolvimentos realizados para a parte de localização dos vazamentos. As técnicas apresentadas são: localização do vazamento pela velocidade sônica, localização do vazamento pela interseção dos gradientes hidráulicos e localização por meio de redes neurais.

# 4.4.1. Estimativa pela velocidade sônica

Para verificar a validade da equação (23) foi desenvolvido um programa na plataforma .NET utilizando as equações de (25) a (30), cuja interface gráfica pode ser observada na Figura 54. Em seguida foi simulado um vazamento em um simulador hidráulico comercial, SPS. Os dados de entrada do sistema de localização de vazamentos foram obtidos diretamente do simulador.



Figura 54: Interface gráfica para estimar a localização do vazamento.

Este método conforme descrito em seções anteriores é utilizado a partir da operação do duto em regime permanente, ou seja, as variáveis de pressão e vazão no expedidor e recebedor apresentam pouca variabilidade. Na ocorrência de um vazamento as pressões e vazões variam conforme Figura 6. No entanto, dependendo da localização do vazamento, ou seja, da proximidade do mesmo aos instrumentos de medição. A variação de sinal seja de pressão ou vazão acontecerá primeiramente na extremidade mais próxima do vazamento. Os tempos em que ocorrem estas variações são dados de entrada para localizar o vazamento segundo este método.

O primeiro campo refere-se à velocidade sônica do fluido em metros por segundo, o segundo campo refere-se ao comprimento do duto em metros. O terceiro e o quarto campo são os horários em que começa a variação de pressão.

O quinto campo é a diferença de tempo em segundos entre as variações de pressão. Originalmente era a única opção disponível, porém, como este valor pode ser negativo, dependendo do referencial, para evitar erros, o terceiro e quarto campos foram criados. Usando estes últimos não importa saber qual a convenção utilizada. Torna-se necessário observar que este campo é uma alternativa ao preenchimento dos campos tempo do expedidor e tempo do recebedor. Nesse caso é importante salientar a convenção como sendo tempo do expedidor menos o tempo do recebedor. A diferença pode ser positiva ou negativa dependendo da localização do vazamento, se o vazamento for perto do recebedor, o sinal de pressão do recebedor irá variar primeiro, fazendo com que a diferença seja positiva; caso seja próximo do expedidor, a pressão no expedidor irá variar primeiramente, acarretando uma diferença negativa.

No exemplo mostrado na Figura 54, a diferença de tempo foi de 11 segundos, fazendo com que a estimativa da localização do vazamento fosse 45512 m a partir do expedidor. Se a diferença fosse de -11 segundos, a estimativa seria de 31907 m a partir do expedidor.

Nas Equações (29) e (30)  $\Delta p$  é a variação de pressão entre a pressão antes e após o vazamento, A é a área interna do duto, c é a velocidade sônica do fluido,  $\dot{M}_{leak}$  é a vazão mássica do vazamento e  $Q_{leak}$  é a vazão volumétrica do vazamento. Para efeito de estudo, uma nova interface foi desenvolvida para efetuar estes cálculos.

# 4.4.2. Gradiente hidráulico

Para verificar a validade deste método foi desenvolvida um programa que calcula o gradiente hidráulico, utilizando as condições de contorno do expedidor e do recebedor. A interface gráfica do programa pode ser observada na Figura 55.



Figura 55: Interface gráfica do programa de gradiente hidráulico.

O programa abre arquivos no formato Excel com dados de entrada referentes ao perfil de elevação e do duto. Um exemplo de planilha pode ser observado na Figura 56. Esta figura é a mesma mostrada na Figura 46, reproduzida aqui para facilitar a leitura. A descrição das colunas pode ser vista na seção 4.3.1.

Km						
Desenvol	Cota	Vol. Esq	Vol. Dir	Dext	Esp	Tag
. 💌	<b></b>	<b></b>	<b></b>	<b></b>	<b></b>	
(km)	(m)	(m³)	(m³)	(pol)	(pol)	Valvula
0	32	0	225,688	16	0,344	XV-02
16,704	37	16,34	193,752	16	0,344	VES-27/VRE-27
33,275	43,85	41,839	205,54	16	0,344	XV-28
47,803	71,69	27,74	154,203	16	0,344	VES-29/VRE-29
63,192	23,69	193,794	193,854	16	0,344	VES-30
78,479	47,49	148,401	163,978	16	0,344	VES-31
94,955	50,89	119,397	131,705	16	0,344	VES-32/VRE-32
107,781	104,22	96,59	114,218	16	0,344	VES-33
123,884	22,69	205,132	58,215	16	0,344	XV-34
141,02	5,5	199,799	58,182	16	0,344	VES-35
157,487	4,67	227,02	32,647	16	0,438	XV-36/VRE-36
169,19	4,93	231,799	86,183	16	0,438	VES-37/VRE-37
184,02	2	276,827	0	16	0,438	XV-05

Figura 56: Exemplo de arquivo excel de entrada.

### 4.4.2.1. Ajuste do coeficiente de expansão térmica ( $\gamma$ ) dos produtos

O coeficiente de expansão térmica de cada fluido é dado de entrada nas propriedades do fluido, porém pode ser calculado por meio da (API 2014) que utiliza a seguinte equação

$$\alpha_{\nu} = \frac{\rho_1^2 - \rho_2^2}{2(T_2 - T_1)\rho_1\rho_2},\tag{50}$$

onde  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são as massas específicas do produto em duas temperaturas diferentes,  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente.

Esta equação requer o conhecimento da massa específica em duas temperaturas distintas. Uma alternativa é utilizar a Tabela 6 (API 2014).

Grau API	Faixa de densidade	Coeficiente $\gamma$
	a 15,5 ℃	[1/°C]
3 à 35	1,02 a 0,85	0,00072
>35 a 51	< 0,85 a 0,78	0,00090
>51 a 64	< 0,78 a 0,72	0,00108
> 64 a 79	< 0,72 a 0,67	0,00126
> 79 a 89	< 0,67 a 0,64	0,00144
> 89 a 94	< 0,64 a 0,63	0,00153
> 94 a 100	< 0,63 a 0,61	0,00162

Tabela 6: Coeficiente de expansão cúbica típicos para hidrocarbonetos líquidos e água.

Realizando um ajuste exponencial nos dados da Tabela 6 é possível obter a Equação (51) para calcular o coeficiente de expansão térmica a partir da massa específica.

$$\gamma = 0.00792e^{-2.613 \cdot \rho} \tag{51}$$

#### 4.4.2.2. Cálculo da vazão

Uma vez que o sistema por balanço de massa deve calcular as pressões internas inicialmente optou-se por calcular a perda de carga por meio da vazão de de entrada e pressão de entrada. Posteriormente, aventou-se a possibilidade da utilização das pressões de entrada e saída. Para isso utilizou-se o cálculo da vazão conforme (Swamee e Jain 1976) mostrado na seguinte equação,

$$Q = -0.965D^2 \sqrt{\frac{gDh_f}{L}} \ln\left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{1.784\nu}{D\sqrt{gDh_f/L}}\right).$$
 (52)

Nesta equação, *g* corresponde à aceleração da gravidade, *D* ao diâmetro interno,  $h_f$  à perda de carga, *L* ao comprimento do duto,  $\in$  à rugosidade absoluta e  $\nu$  à viscosidade cinemática.

Visto que o diâmetro interno pode variar ao longo do duto devido a espessura da parede do oleoduto, assim como o duto pode estar transportando fluidos diferentes simultâneamente, foram feitas algumas ponderações. O parâmetro diâmetro interno do oleoduto (diâmetro externo do oleoduto – duas vezes a espessura da parede do oleoduto) é ponderado pelo comprimento do duto, enquanto que a densidade e viscosidade são ponderadas pelo volume. Isso é uma tentativa de aproximação quando mais de um produto com densidades e viscosidades diferentes estão na linha, assim como as variações de espessura da parede do duto que possam ocorrer ao longo do duto.

Para uma vazão de 300 m<sup>3</sup>/h e com as configurações do inventário mostradas na Figura 59, obtém-se a vazão estimada de 292 m<sup>3</sup>/h. Este duto possui variações de espessura da parede do duto ao longo de seu comprimento e, no exemplo mostrado, dois produtos diferentes na linha, gasolina e diesel.

Caso houvesse apenas um produto na linha, gasolina, Figura 57, o resultado da vazão estimada pelo gradiente calculado seria mais próxima. A vazão estimada pela Equação (52) seria nesse caso 298,49 m<sup>3</sup>/h.

on Tab	ela								- • ×
	Produto	Volume	Densidade	Viscosidade	CalorEspecifico	VTMI	Gamma	BulkModulus	Pv
•	GLNA	21749,04	0,72	0,2	1	-0.07	0,00121	833565250	0,5
*									

Figura 57: Configuração com apenas um produto na linha.

É importante frisar que se trata de métodos diferentes de cálculo. O gradiente hidráulico é calculado a partir da vazão e pressão do expedidor enquanto que a vazão estimada é calculada a partir das pressões do expedidor e recebedor. O fator de atrito é calculado no primeiro método de forma iterativa, enquanto que a solução do segundo método é por meio da equação explícita (52).

### 4.4.2.3. Fator de atrito

Durante o desenvolvimento do sistema foi estudada a influência do fator de atrito quando produtos diferentes estão sendo transportados pelo duto. Para melhor compreensão deste problema foi desenvolvida uma função cuja interface gráfica pode ser vista na Figura 58, que utiliza densidade e viscosidade ponderadas pelo volume de cada produto na linha, assim como o diâmetro ponderado no caso em que exista variação de espessura da parede do duto ao longo do mesmo.

GUI_FatorAtrito		<b>x</b>	GUI_FatorAtrito		• ×
Entrada			Entrada		
Densidade	0,72		Densidade	0,72	
Viscosidade	0,20	cP	Viscosidade	0,20	сP
Vazão	300,00	m³/h	Vazão	300,00	m²/h
Diâmetro	15,27	pol	Diâmetro	15,27	pol
			L		
Saida 0,013	84		saida 0,01383	3	
Teórico	Real		Teórico	Real	

Figura 58: Fator de atrito teórico (esquerda) e real (direita) com somente um produto.

Neste exemplo, foi utilizada a configuração com um produto somente, gasolina, cujas propriedades densidade e viscosidade são ponderadas com somente um produto. Estas propriedades podem ser observadas na Figura 57. Apenas o diâmetro nesse caso foi ponderado. O fator de atrito teórico mostrado na janela da esquerda é calculado baseado na equação de Colebrook, (Colebrook 1939), de forma iterativa,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 ln \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.523}{R\sqrt{f}}\right).$$
(53)

Nesta equação, f é o fator de atrito desejado, R é o número de Reynolds e  $\in$  /*D* é a rugosidade relativa.

O fator de atrito real é calculado pela equação de Darcy-Weisbach, (Streeter *et al.* 1998).

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g},\tag{54}$$

onde o fator de atrito é f, L é o comprimento do duto, D é o diâmetro interno, v é a velocidade do fluido e g é a aceleração da gravidade.

O fator de atrito real e o teórico são próximos, variando somente no quarto algarismo significativo.

Quando executado com mais de um produto na linha os resultados são diferentes, tal como mostrado na Figura 60, para gasolina e diesel. Para testar este conceito a linha foi configurada conforme a Figura 59.

ER Tal	un Tabela								
	Produto	Volume	Densidade	Viscosidade	CalorEspecifico	VTMI	Gamma	BulkModulus	Pv
•	GLNA	10000	0,72	0,2	1	-0,07	0,00121	833565250	0,5
	DMPB	11749,04	0,82	4	1,4	-0,07	0,00093	1555923089	0,5
*									

Figura 59: Inventário do duto com as propriedades do fluido.

Nesse caso a comparação entre o fator de atrito real e o calculado apresenta uma diferença maior, conforme pode se observar pela Figura 60. A variação começa no segundo algarismo significativo.

GUI_FatorAtrito		• ×	GUI_FatorAtrito	2	- ×
Entrada			Entrada		
Densidade	0,77		Densidade	0,77	
Viscosidade	2,25	сP	Viscosidade	2,25	cP
Vazão	300,00	m³/h	Vazão	300,00	m³/h
Diâmetro	15,27	pol	Diâmetro	15,27	pol
Saida 0,0192	25		Saida 0,0182	25	
Teórico	Real		Teórico	Real	

Figura 60: Fator de atrito teórico (esquerda) e o real (direita) com mais de um produto.

### 4.4.2.4. Correção da Viscosidade com a Temperatura (VTMI)

Segundo (ADVANTICA 2008), a equação utilizada para correção da viscosidade com a temperatura e pressão pode ser

$$\mu = \mu_0 e^{(VPMI \cdot \Delta P + VTMI \cdot \Delta T)},\tag{55}$$

onde *VPMI* é um fator de correção por pressão e *VTMI* é um fator de correção por temperatura. No presente trabalho a correção por pressão foi desconsiderada, uma

vez que não é muito significativa para a viscosidade, sendo a temperatura mais importante.  $\mu_0$  é a viscosidade na condição padrão (temperatura de 293,15 K e pressão de 101325 Pa.)

#### 4.4.2.5. Perfil de temperatura

O cálculo do perfil de temperatura somente é válido para o caso não isotérmico, conforme previamente configurado no sistema.

No caso não isotérmico, a temperatura passa a ser utilizada para correção da viscosidade e da densidade. Portanto, para fazer estas correções em cada volume de controle é necessário traçar o perfil de temperatura ao longo do duto.

Os dados de entrada são as temperaturas do expedidor e recebedor e o parâmetro U, denominado coeficiente global de troca de calor. O problema térmico pode ser bem complexo, principalmente em relação à incerteza de algumas propriedades do fluido, duto e do solo (Ristow *et al.* 2015). A parte térmica contida neste trabalho está consoante com (Montalvão e Aramaki 2015).

O perfil de temperatura quando em operação, regime permanente, é traçado segundo (Montalvão e Aramaki 2015) com uso da equação

$$T = T_{solo} + (T_{in} - T_{solo})e^{-\frac{U\pi D}{mC}x}.$$
(56)

*T* é a temperatura do volume de controle,  $T_{solo}$  a temperatura do solo,  $T_{in}$  a temperatura do expedidor, *U* é o coeficiente global de transferência de calor, *D* é o diâmetro interno,  $\dot{m}$  é a vazão mássica do fluido, *C* é o calor específico do fluido e *x* é a posição ao longo do duto, com referência ao expedidor, que corresponde à temperatura desejada, *T*.

### 4.4.2.6. Cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U)

O coeficiente global de transferência de calor U pode ser estimado com o uso da equação

$$U = -ln(\frac{T_{out} - T_{solo}}{T_{in} - T_{solo}})\frac{\dot{m}C}{L\pi D},$$
(57)

onde  $T_{out}$  é a temperatura do recebedor e *L* o comprimento do duto, sendo as demais variáveis as mesmas utilizadas na Equação (56).

De forma a simplificar o ajuste desta variável, o sistema realiza o cálculo mostrado na Equação (57) e pondera as variáveis de entrada, diâmetro interno, vazão mássica e calor específico, sendo o diâmetro ponderado pelo comprimento do duto e as demais variáveis ponderadas pelo inventário.

Considerando a configuração mostrada na Figura 59, obteve-se um valor para U de 0,2433 W/m<sup>2</sup> °C. Com este valor de U, a temperatura calculada pela equação (56) resulta em um valor de temperatura no recebedor de 28,13 °C. Considerando apenas um produto, tal como mostrado na configuração da Figura 57, tem-se um valor de U igual a 0,1855 W/m<sup>2</sup> °C. Com este valor de U, a temperatura calculada para o recebedor é igual a 30,07 °C.

### 4.4.2.7. Interseção de Gradiente Hidráulico

Esta função é a mais importante para localização de vazamento utilizando o método do gradiente hidráulico, uma vez que, conforme mencionado anteriormente, a interseção dos gradientes hidráulicos, a montante e a jusante do vazamento, fornece a localização do vazamento, Equação (41).

Os gráficos dos gradientes são representados na Figura 61.



Figura 61: Gradientes plotados nos dois sentidos com diferentes condições de contorno.

# 4.4.3. Redes Neurais

O sistema de detecção de vazamento mostrado em (Barradas et al. 2009) pareceu promissor, porém não foi mencionado qual seria o comportamento esperado pelo sistema frente a manobras operacionais de rotina, tais como: partida de bombas, mudanças de ajustes de controladoras de pressão e vazão, parada de duto com pressurização lenta, entre outras. Buscou-se então explorar e validar o sistema proposto em (Barradas *et al.* 2009) para um sistema de oleoduto modelado em um simulador hidráulico, cujo modelo representasse um duto real operado pela Transpetro. Este trabalho pode ser observado em (Aramaki, Vellasco, *et al.* 2015).

Três topologias foram apresentadas em (Barradas *et al.* 2009), porém para este trabalho foi escolhida apenas uma topologia, similar a uma das três mencionadas, a 2-4-4-4-2, mostrada na Figura 62. Nesse caso o primeiro dígito corresponde ao número de entradas e o último dígito representa o número de saídas.

A função de ativação escolhida para todas as camadas foi a "log-sigmoid", e as entradas consideradas foram a vazão do expedidor e a vazão do recebedor. Para um melhor entendimento a topologia configurada está apresentada na Figura 62.



Figura 62: Topologia das redes neurais artificiais implementada.

O comportamento esperado por este sistema pode ser observado na Tabela 7. Nesta tabela, vazamentos ativos correspondem a posições de vazamentos distintas, enumeradas de 0 a 3, onde 0 corresponde a nenhum vazamento e os demais casos a posições distintas no oleoduto, conforme pode ser observado na Figura 63.

Vazamentos	F1 (Saída do	F2 (Saída do
Ativos	primeiro neurônio)	segundo neurônio)
0	0	0
1	1	0
2	0	1
1 e 2	1	1
3	0	1

Tabela 7: Comportamento esperado do sistema de rede neural.



Figura 63: Vazamentos em posições distintas com o duto discretizado, extraído de (Barradas et al. 2009).

Ao invés de utilizar um modelo matemático, tal como foi feito em (Barradas *et al.* 2009), foi utilizado um simulador hidráulico comercial denominado SPS (ADVANTICA 2008) para gerar os dados de entrada.

# 4.4.3.1. Treinamento

O esquema proposto para o treinamento pode ser observado na Figura 64. Neste esquema é possível observar duas sequências. A primeira sequência consiste em utilizar o simulador hidráulico, SPS, para gerar os dados de treinamento com os vazamentos simulados. Os vazamentos são simulados através de válvulas conectadas a tanques com derivação da linha principal, tal como pode ser observado na Figura 65.



Figura 64: Esquema proposto para o treinamento da rede.



Figura 65: Modelo gráfico de vazamento realizado no simulador.

Os dados gerados pelo simulador são exportados para o formato CSV e importados pelo Matlab. O treinamento é então realizado no Matlab por meio de rotinas desenvolvidas que utilizam o conjunto de ferramentas de redes neurais artificiais, (Demuth e Beale 1993).

Estes dados exportados pelo Excel possuem o formato mostrado na Tabela 8. A primeira coluna representa o valor esperado (*target*) do primeiro neurônio de saída, F1. A segunda coluna representa o valor esperado pelo neurônio F2. Os valores da terceira e quarta coluna são valores de vazão do expedidor e recebedor, sendo originadas do simulador, enquanto os valores das duas primeiras colunas são inseridos manualmente com base na simulação realizada (1 quando houver vazamento e 0 quando não houver vazamento, sendo cada coluna uma posição de vazamento).

Saida1	Saida2	EXP:Q+	REC:Q+
0	0	170,240	170,240
0	0	170,240	170,240
0	0	170,240	170,240
1	0	232,906	170,228
1	0	233,606	170,225
1	0	234,867	170,221
1	0	236,438	170,213
1	0	238,094	170,200
1	0	239,908	170,175
1	0	241,910	170,118
1	0	244,161	169,959

Tabela 8: Exemplo de dados de treinamento considerando somente a parte transiente.

1	0	246,713	169,467
1	0	249,336	168,336
1	0	251,886	166,588
1	0	254,370	164,551
1	0	256,783	162,417
1	0	259,095	160,192
1	0	261,301	157,946
1	0	263,374	155,744
1	0	265,271	153,654
1	0	266,956	151,756
1	0	268,412	150,086
1	0	269,645	148,658
1	0	270,665	147,467
1	0	271,481	146,510
1	0	272,108	145,773
1	0	272,564	145,240
1	0	272,869	144,887
1	0	273,048	144,684
1	0	273,134	144,591
1	0	273,162	144,563
1	0	273,167	144,561
0	0	273,167	144,560
0	0	273,167	144,561

Os dados exportados para o treinamento totalizaram 677 padrões. Cada linha da planilha Excel, mostrada em parte na Tabela 8, constitui um padrão. Dentre estes, 70% foram selecionados aleatoriamente para treinamento, 15% foram selecionados para validação e os 15% restantes foram utilizados para teste.

O algoritmo utilizado para treinamento foi o clássico "backpropagation" com Levenberg-Marquardt, (Moré 1978).

Um detalhe importante que foi verificado é justamente quais dados seriam considerados para o treinamento do vazamento, tendo sido analisado se somente os dados referentes ao transiente do vazamento, Tabela 8 deveriam ser utilizados, ou se todo o período do vazamento, incluindo o regime permanente, também deveria ser considerado, Tabela 9.

Os testes mostraram que somente a dinâmica do vazamento era importante, trazendo inclusive melhores resultados.

Saida1	Saida2	EXP:Q+	REC:Q+
0	0	170,240	170,240
1	0	233,491	170,236
1	0	231,833	170,234
1	0	232,166	170,233
1	0	232,252	170,233
1	0	232,381	170,232
1	0	232,581	170,23
1	0	232,906	170,228
1	0	233,606	170,225
1	0	234,867	170,221
1	0		
1	0	174,089	167,104
1	0	172,886	168,090
1	0	171,943	168,860
1	0	171,239	169,431
1	0	170,753	169,825
1	0	170,453	170,068
1	0	170,300	170,191
1	0	170,246	170,235
1	0	170,239	170,241
1	0	170,241	170,240
0	0	170,240	170,240
0	0	170,240	170,240
0	0	170,240	170,240

Tabela 9: Dados de treinamento considerando todo o período do vazamento

Os dados de entrada devem ser normalizados, tendo sido criadas duas funções no Matlab, uma para normalizar a entrada para o intervalo entre 0 e 1 e outra para normalizar os valores de entrada no intervalo entre -1 e 1. Uma vez que a função de ativação escolhida foi a "log-sigmóide" a normalização da entrada configurada foi a mostrada na Figura 66 à direita.

\_



Figura 66: Normalização [-1,1] à esquerda e Normalização [0,1] à direita.

Uma vez que a rede tenha sido treinada o vetor de pesos é incorporado em um software desenvolvido, denominado Neura. Este sistema acessa o simulador em tempo real através do protocolo de automação, OPC. O simulador em tempo real transmite dados de entrada para o sistema Neura, cujas saídas são as respostas dos dois neurônios da camada de saída.

# 4.4.3.2. Sistema

Foi desenvolvido em VB.NET um sistema baseado em redes neurais supervisionadas. No entanto, o treinamento ainda necessita do Matlab, pois o algoritmo de treinamento, *backpropagation*, ainda não foi implementado na presente versão.

O primeiro teste realizado foi para verificar se a comunicação do sistema com o simulador hidráulico estava funcionando. Foi utilizado o protocolo OPC para estabelecer a comunicação entre os dois sistemas. Nesse primeiro teste foi exibido em tempo real o valor da variável de processo pressão do expedidor, destacada em verde na Figura 67. Nesta mesma figura nota-se que as variáveis do simulador estão preenchidas com as variáveis que serão adquiridas do simulador hidráulico, SPS.

🖳 Neur	ra - Sistema de detecção de vazamen	nto	
Arqui	vo Configuração Sobre		
TAGS	de Entrada	TAGS d	e Saída
Pin	TEMIPI1D10:P-	Pout	TEMIPI10D10:P+
Qin	TEMIPI1D10:Q+	Qout	TEMIPI10D10:Q+
Tin	RE_EXPEDE:T+	Tout	RE_RECEBE:T+
Din	EXPEDE_DENS:OUT	Dout	RECEBE_DENS:OUT
80,8708603522882			

Figura 67: Teste do OPC com o sistema Neura.

As variáveis podem ser preenchidas manualmente por meio de digitação nas respectivas caixas de texto, ou inseridas por um arquivo XML padronizado, como mostrado na Figura 68.

1	<pre><?xml version="1.0" encoding="mtf-8" ?></pre>
2	-CDuto>
3	<nome>ORSUB10</nome>
4	<pin>TEMIPI1D10:P-</pin>
5	<pout>TEMIPI10D10:P+</pout>
6	<qin>TEMIPI1D10:F-</qin>
7	<qout>TEMIPI10D10:F+</qout>
8	<tin>TEMIPI1D10:T-</tin>
9	<tout>TEMIPI10D10:T+</tout>
10	<din>TEMLANDT: IN</din>
11	<dout>IPIRECDT: IN</dout>
12	L

Figura 68: XML padrão para entrada de tags no sistema NEURA.

O sistema Neura executa uma rede neural cuja topologia foi mostrada na Figura 62. A parte do treinamento deve ser previamente realizada no Matlab. Após o treinamento os pesos e bias gerados devem ser copiados para o código fonte, tal como mostrado no trecho de código mostrado na Figura 69.

```
*** <summary>
*** Constroi a rede neural
··· </summary>
*** <remarks></remarks>
Public Sub Construtor()
    Try
        Dim w() As Double = {6.1065, -16.1727, -16.3327, -14.9664, 51.1294, 29.4149, -4.3067, 27.5802,
                               -0.3935, 1.3956, 41.1934, 21.9058, 4.4909, -9.1104, -10.6296, 3.393,
                               -0.30851, 21.8797, -11.4216, 4.5619, -49.8146, 58.9342, 13.8825, 0.25994, -20.1165, -20.4862, 16.8114, 18.2803, -19.3065, 19.1206, 19.7718, -9.8469,
                              23.7844, 22.8448, -3.2768, 15.1333, -22.941, -17.7238, 18.6946, -1.115,
                               3.9413, -1.5794, 6.1848, 1.5288, 52.7698, -51.8014, -49.3697, -44.8392,
                               -27.5155, -58.6867, -26.8932, 68.1533, -14.0269, -51.5332, -8.7047, -73.1583}
        Dim bias() As Double = {5.6148, -13.9728, -8.6542, 2.2599, -3.3948, -0.67225, -2.3571, 4.03,
                                   12.2484, -19.1938, 1.9736, -4.4425, -21.0151, -11.0214}
         'primeira camada
        Dim p1 As PMC = New PMC(\{\theta, \theta\}, \{w(\theta), w(1), w(2), w(3)\}, bias(\theta), "tansig")
         Perceptron.Add(p1)
         Dim p2 As PMC = New PMC({0, 0}, {w(4), w(5), w(6), w(7)}, bias(1), "tansig")
         Perceptron.Add(p2)
        Dim p3 As PMC = New PMC({0, 0}, {w(8), w(9), w(10), w(11)}, bias(2), "tansig")
         Perceptron.Add(p3)
        Dim p4 As PMC = New PMC({0, 0}, {w(12), w(13), w(14), w(15)}, bias(3), "tansig")
```

Figura 69: Pesos e bias obtidos no treinamento realizado no Matlab.

Após a inserção dos pesos e bias, foi realizado um segundo teste para validação da execução do programa. A rede foi testada com os mesmos dados de entrada utilizados para o Matlab e os resultados comparados entre si, conforme mostrado na Figura 70. Nota-se que os resultados são bem próximos aos do Matlab.

🛃 Data: net_outputs	NEURA
- Value	0,99999 0,99995
OK Cancel	ОК

Figura 70: Saídas do Matlab e do sistema Neura para um mesmo conjunto de dados.

# 5 Resultados

Os resultados dos diversos módulos do sistema desenvolvido são apresentados nesta seção, tanto da parte de localização de vazamentos como detecção de vazamentos.

Também é mostrado um comparativo entre alguns sistemas de detecção de vazamento à luz da (API 2015).

# 5.1. Localização de vazamento pela velocidade sônica

Para testar este conceito foi simulado um vazamento em um modelo real de duto operado pela Transpetro preenchido totalmente com gasolina. Os dados de entrada foram retirados diretamente do modelo. Para o modelo simulado foi gerado um vazamento de 118 m<sup>3</sup>/h em um duto com diâmetro externo de 16 polegadas com espessura da parede do duto variável e aproximadamente 184 km de extensão, na posição 78479 m. A Figura 71 mostra o gradiente hidráulico em vermelho em metros, o perfil de elevação em verde em metros, a vazão em azul em m<sup>3</sup>/h, cuja descontinuidade refere-se ao vazamento, e a PMOA, pressão máxima operacional admissível do duto, em laranja em kgf/cm<sup>2</sup>.



Figura 71: Simulação hidráulica com vazamento na posição longitudinal 78,479 km.

A localização foi estimada como sendo no km 76,323, com um erro de 2,7 % em relação à posição do modelo. Uma vez que o vazamento tenha sido detectado, os tempos em que ocorrem as variações no sinal de pressão no recebedor e no expedidor devem ser anotados. A diferença da localização estimada para a localização real deve-se aos tempos anotados pelo observador, assim como à premissa de velocidade sônica constante.

Em relação a vazão do vazamento observa-se que o erro foi muito grande em relação à vazão simulada. Verificou-se então que a controladora do recebedor estava controlando a pressão a montante em 35 kgf/cm<sup>2</sup>, o que resultava em uma fração de abertura de apenas 25,7 %. A pressão no expedidor estava em 51,1 kgf/cm<sup>2</sup> e não sofreu alteração significativa.

Suspeitou-se então que a controladora estaria mascarando os resultados para a estimativa da vazão do vazamento. Optou-se por realizar uma nova simulação, desta vez com ambas as controladoras abertas, 100 % de fração de abertura.

A nova condição operacional em regime permanente foi de 51,1 kgf/cm<sup>3</sup> para a pressão do expedidor com 22,8 kgf/cm<sup>3</sup> para a pressão do recebedor.

Optou-se então por realizar novamente o vazamento na mesma posição e estimou-se a localização novamente. O resultado foi exatamente o mesmo que o realizado anteriormente com a controladora do recebedor atuando na pressão a montante.

Estimou-se novamente a vazão do vazamento. Sem esperar o vazamento entrar em regime permanente, no instante em que a pressão do expedidor estava com 49,8 kgf/cm<sup>2</sup> e a do recebedor estava com 22,7 kgf/cm<sup>2</sup> as estimativas da vazão do vazamento no transiente e em regime permanente podem ser observadas na Figura 72. A vazão do vazamento pelo simulador era de 104 m<sup>3</sup>/h para o caso transiente e 102 m<sup>3</sup>/h para o caso permanente.

Observa-se que este método de quantificação da vazão do vazamento não funciona muito bem em regime transiente, tendo melhor desempenho quando o vazamento entra em regime permanente. O fato da válvula de controle estar funcionando em modo automático influencia a assinatura do vazamento, conforme mencionado na seção 2.2.2. Além disso, as premissas da velocidade sônica constante e da ponderação do diâmetro interno aumentam a incerteza dos resultados.



Figura 72: Vazamento em regime transiente (esquerda) e regime permanente (direita).

O diâmetro externo deste duto é de 16 polegadas e sua espessura da parede do duto varia ao longo do duto. Foi realizada uma ponderação pela extensão para obter o diâmetro interno equivalente a 15,24 polegadas.

### 5.2. Localização de vazamento pelo gradiente hidráulico

Para validar o método foram simulados três vazamentos em posições distintas em um modelo de duto operado pela Transpetro. Os gradientes hidráulicos em ambos os sentidos foram registrados graficamente e a localização estimada.

Para este primeiro teste o modelo no programa de gradiente hidráulico teve que ser ajustado. Como o modelo utilizado no simulador não estava configurado com ruído, as propriedades do fluido foram retiradas diretamente do modelo, e as viscosidades ajustadas para que as pressões calculadas estivessem as mais próximas possíveis dos valores encontrados no simulador.

Neste caso optou-se por ajustar somente as viscosidades, deixando a rugosidade em seu valor padrão de 0,0018 polegada. Somente após este ajuste é que o programa foi executado para estimativa da localização do vazamento.

Além disso, esperou-se o vazamento estabilizar, ou seja, entrar em regime permanente. A exatidão melhora quando isso acontece. Todos os vazamentos testados foram com o duto preenchido totalmente com gasolina. O primeiro vazamento simulado foi na posição 16,7 km. A simulação pode ser vista na Figura 73. A curva em azul é o perfil de vazão, a curva em verde o perfil de elevação, a curva em laranja é a Pressão Máxima de Operação Admissível (PMOA) do duto, e curva em vermelho é o gradiente hidráulico. Apenas observando este gráfico do simulador não é possível identificar diretamente o ponto de interseção.



Figura 73: Primeiro vazamento simulado na posição 16,7 km.

O programa de gradiente foi executado e os gradientes traçados, conforme Figura 74. Neste gráfico é possível verificar que o ponto de interseção parece próximo do expedidor. Ao executar a função de interseção de GH a localização informada foi na posição 16900 m.



Figura 74: Gradientes plotados para as condições de contorno do primeiro vazamento.

Da mesma forma o programa foi executado e os gradientes traçados, conforme Figura 76. É possível verificar a localização aproximada pela observação direta do gráfico. Ao executar a função de interseção, a localização pode ser observada na posição 79800 m.



Figura 75: Segundo vazamento situado na posição 78,5 km.



Figura 76: Gradientes plotados para as condições de contorno do segundo vazamento.

O terceiro vazamento simulado foi na posição 169,2 km. A simulação pode ser vista na Figura 77. Da mesma forma o programa foi executado e os gradientes registrados graficamente, conforme Figura 78. Da mesma forma é possível verificar a localização aproximada pela observação direta do gráfico. Ao executar a função de interseção a localização estimada foi na posição 170800 m.



Figura 77: Terceiro vazamento situado na posição 169,2 km.


Figura 78: Gradientes plotados para as condições de contorno do terceiro vazamento.

### 5.3. Localização de vazamento por redes neurais

Para testar o sistema de localização baseado em redes neurais descrito no Capítulo 4, foi inicialmente construído um modelo de duto real sem ruído no simulador hidráulico comercial SPS (ADVANTICA 2008).

Foram modelados diversos vazamentos em localizações distintas tais como: posição 1, 23,76 km; posição 2, 108 km; e posição 3, 197,53 km. O modelo de duto testado possui comprimento de aproximadamente 224 km e diâmetro externo de 10,75 polegadas.

A condição inicial foi com o duto operando em regime permanente e totalmente preenchido com diesel, conforme pode ser observado na Figura 79, através de tela do simulador hidráulico. Novamente, a cor azul é a vazão na condição padrão, em vermelho o gradiente hidráulico, e em verde o perfil de elevação.



Figura 79: Condição inicial, duto operando em regime permanente.

A Figura 80 mostra a saída do sistema Neura desenvolvido, apresentando em caixa alta e destacado em verde as saídas dos neurônios nas camadas de saída, N1 e N2. Observa-se que, na inexistência de qualquer vazamento, estes valores devem ser idealmente nulos.

🖳 Neu	ra - Sistema de detecção de vazame	nto			
Arqui	vo Configuração Sobre				
TAGS	de Entrada	TAGS d	e Saída		
Pin	TEMIPI1D10:P-	Pout	TEMIPI10D10:P+		
Qin	TEMIPI1D10:Q+	Qout	TEMIPI10D10:Q+		
Tin	RE_EXPEDE:T+	Tout	RE_RECEBE:T+		
Din	EXPEDE_DENS:OUT	Dout	RECEBE_DENS:OUT		
	N1 = 0,000 N2 = 0,000				

Figura 80: Saída do sistema Neura para o duto em regime permanente.

O primeiro teste foi realizado com vazamento na primeira posição, 23,76 km, de acordo com a Figura 81. A legenda de cores é a mesma descrita anteriormente para a Figura 79.



Figura 81: Primeiro teste com vazamento na posição 23,76 km.

Observa-se que o vazamento pode ser constatado pela descontinuidade da curva de vazão em azul na Figura 81, assim como a sua posição. O vazamento foi identificado ainda em regime transiente. A saída do sistema para esta condição hidráulica está mostrada na Figura 82. Nesta condição Q1 é a vazão do expedidor e Q2 é a vazão do recebedor.

🖳 Neu	a - Sistema de detecção de vazamento	-	- • ×
Arqui	vo Configuração Sobre		
TAGS	de Entrada	TAGS d	e Saída
Pin	TEMIPI1D10:P-	Pout	TEMIPI10D10:P+
Qin	TEMIPI1D10:Q+	Qout	TEMIPI10D10:Q+
Tin	RE_EXPEDE:T+	Tout	RE_RECEBE:T+
Din	EXPEDE_DENS:OUT	Dout	RECEBE_DENS:OUT
- Entrada	1	Saida	
			Saída Manual
N1 = 1,00 Q1 = 219,0 N2 = 0,00 Q2 = 170,2			

Figura 82: Saída do sistema para o vazamento na primeira posição.

O segundo teste foi realizar dois vazamentos simultâneos, uma na primeira posição, 23,76 km e o segundo vazamento em 108 km. O cenário foi reproduzido

no simulador e pode ser observado na Figura 83, assim como a saída do sistema na Figura 84. Neste caso, os dois neurônios foram ativados.



Figura 83: Segundo teste com dois vazamentos simultâneos.

Neura - Sistema de detecção de vaza	mento 🗆 🗆 🕱			
Arquivo Configuração Sobre				
TAGS de Entrada	TAGS de Saída			
Pin TEMIPI1D10:P-	Pout TEMIPI10D10:P+			
Qin TEMIPI1D10:Q+	Qout TEMIPI10D10:Q+			
Tin RE_EXPEDE:T+	Tout RE_RECEBE:T+			
Din EXPEDE_DENS:OUT	Dout RECEBE_DENS:OUT			
	Saida			
Saída Manual				
N1 = 1,00 Q1 = 265,0 N2 = 1,00 Q2 = 157,4				

Figura 84: Saída do simulador para o segundo teste com dois vazamentos.

O terceiro teste mostra um vazamento na terceira posição, 197,53 km. Este vazamento não participou do treinamento da rede e, portanto, testa a capacidade de generalização da rede. Esperava-se que a rede ativasse o neurônio cujo vazamento treinado fosse o mais próximo, neste caso N2.



Figura 85: Vazamento não treinado, na posição 197,53 km.

🖳 Neu	ira - Sistema de detecção de vazame	nto		
Arqui	ivo Configuração Sobre			
TAGS	de Entrada	TAGS	de Saída	
Pin	TEMIPI1D10:P-	Pout	TEMIPI10D10:P+	
Qin	TEMIPI1D10:Q+	Qout	TEMIPI10D10:Q+	
Tin	RE_EXPEDE:T+	Tout	RE_RECEBE:T+	
Din	EXPEDE_DENS:OUT	Dout	RECEBE_DENS:OUT	
Entrad	a	Saida		
Saída Manual				
N1 = 0,00 Q1 = 170,2 N2 = 1,00 Q2 = 169,9				

Figura 86: Saída do sistema para o vazamento não treinado na posição 197,53 km.

Pode-se observar que o sistema respondeu como esperado, ativando o neurônio correspondente à posição do vazamento treinado mais próximo. É importante notar, ainda, que a diferença de vazão foi pequena, devendo-se à dinâmica do vazamento a responsabilidade pela sua detecção.

Até então foram mostrados somente os testes em que os resultados foram positivos de acordo com o esperado. A seguir serão mostrados dois resultados que geraram falsos positivos. O quarto teste foi simular uma condição operacional comum que gera um transiente que pode fazer com que um sistema de detecção de vazamento gere um falso positivo. Este teste consiste em desligar uma bomba do expedidor, o que acarreta em um desempacotamento no duto. Pode-se observar o cenário hidráulico simulado na Figura 87, com a consequente saída do sistema na Figura 88.

ORSUB - Trans	
<u>File Edit Simulation Window H</u> elp	
	1 🛛 🗖 🔁 🕄 🎒 📍
OK 🗸	
LINEFITA LINEJEQ LINEFJEQ TEM	
TEMIPI	TIME = 08:48:08 STEF = 00:00:00
1200.	۲ <b>400</b> -0
1078 HEAD	- 360.0
956.0	- 320.0
# 712 OT	240 0 L
E 590.0	200.0 -
A 468.0	p 160.0
D 346.00	I 120.0
	A 80.00 <sup>3</sup>
102.0 ELEVANNE	40.00 h
-20.0 25.00 50.00 75.00 100.0 125.0 15 0.000 25.00 50.00 75.00 100.0 125.0 15 DISTANCE (here)	0.000 0.0 175.0 200.0 225.0 250.0
DIESEL	
Ready SET TEMCU	V0C Paused step 2059

Figura 87: Desligamento de uma bomba no expedidor.

🖳 Neura - Sistema de detecção de	e vazamento			
Arquivo Configuração Sobr	re			
TAGS de Entrada	TAGS d	e Saída		
Pin TEMIPI1D10:P-	Pout	TEMIPI10D10:P+		
Qin TEMIPI1D10:Q+	Qout	TEMIPI10D10:Q+		
Tin RE_EXPEDE:T+	Tout	RE_RECEBE:T+		
Din EXPEDE_DENS:OUT	Dout	RECEBE_DENS:OUT		
Entrada	Saida			
Saída Manual				
N1 = 1,00 Q1 = 167,1 N2 = 0,00 Q2 = 170,2				

Figura 88: Saída gerada com o desligamento de uma bomba.

O quinto e último teste foi uma situação comum e crítica para sistemas de detecção de vazamento, uma vez que quando ocorre uma despressurização lenta no

lado do recebedor, o que normalmente se faz para realizar uma parada pressurizada do duto de maneira suave, uma assinatura de vazamento se forma. Ocorre despressurização no recebedor, com decaimento de vazão, o que faz com que a vazão no expedidor, neste momento, seja maior do que a vazão do recebedor. Muitos sistemas de detecção de vazamento geram alarmes falsos nesse cenário.



Figura 89: Teste com despressurização lenta do lado recebedor.

🖳 Neu	ra - Sistema de detecção de vazamento		
Arqui	ivo Configuração Sobre		
TAGS	de Entrada	TAGS	le Saída
Pin	TEMIPI1D10:P-	Pout	TEMIPI10D10:P+
Qin	TEMIPI1D10:Q+	Qout	TEMIPI10D10:Q+
Tin	RE_EXPEDE:T+	Tout	RE_RECEBE:T+
Din	EXPEDE_DENS:OUT	Dout	RECEBE_DENS:OUT
Entrad	3	Saida	
Saída Manual			
N1 = 0,00 Q1 = 170,2 N2 = 1,00 Q2 = 114,8			

Figura 90: Saída do sistema com despressurização lenta no recebedor.

## 5.4. Detecção de vazamento pelo balanço de massa

Para testar o sistema desenvolvido foi selecionado um modelo de um duto operado pela Transpetro que tranporta fluidos aquecidos. O objetivo do teste, além da detecção de vazamento com o duto em operação, foi também verificar o desempenho deste tipo de sistemas para situações em que o duto se encontre parado pressurizado, condição de *shut-in*.

O duto simulado em regime permanente pode ser observado na Figura 91. Este duto possui comprimento de aproximadamente 120 km e diâmetro externo de 24 polegadas. Pode-se observar nesta figura a curva do gradiente hidráulico ligeiramente curva, característica de produtos transportados em temperaturas elevadas cuja densidade e viscosidade são corrigidas.



Figura 91: Duto com produto aquecido.

Com o duto estabilizado e com a rotina de ajuste da viscosidade ativada para que a diferença entre a pressão calculada e a medida fosse inferior a 0,1 kgf/cm<sup>2</sup>, o sistema estava sintonizado para o teste de vazamento. Em seguida foi gerado um vazamento localizado a 26,944 km a partir da origem cuja vazão foi de 90 m<sup>3</sup>/h, com vazão do duto de 900 m<sup>3</sup>/h, o que representa um vazamento de 10 %, conforme indicado na Figura 104. Este vazamento foi detectado pelo sistema, tal como é mostrado na Figura 93.

O limite de alarme configurado foi de 1 m<sup>3</sup>, em uma janela de 1 minuto, uma vez que a janela estava configurada para 6 minutos com tempo de amostragem igual a 10 segundos. O filtro de média móvel estava desabilitado.



Figura 92: Vazamento gerado na posição 26,944 km.



Figura 93: Vazamento detectado no transiente.

A localização durante transiente foi indicada conforme pode ser observado na Figura 93, na posição 43,00 km. Após esperar o duto estabilizar, Figura 94, a localização do vazamento indicou a posição 32,46 km.







Figura 95: Localização após estabilização do vazamento.

O próximo teste foi realizado com as vazões normalizadas, em regime permanente, para as condições de pressão e temperatura mencionados na seção 2.2.4, conforme pode ser visto na Figura 96, através das vazões Q1 e Q2. O sistema detectou o vazamento no instante mostrado na Figura 97 com localização inicial mostrada na Figura 98 na posição 40, 05 km. Após estabilização a posição indicada na Figura 99 foi 27,8 km.



Figura 96: Vazões normalizadas.



Figura 97: Detecção de vazamento com vazões normalizadas.



Figura 98: Localização inicial com vazões normalizadas.



Figura 99: Localização após estabilização com vazões normalizadas.

Foi também verificado o comportamento do sistema de detecção de vazamento na situação em que o duto se encontra em regime permanente parado pressurizado, condição de *shut-in*, tal como é mostrado na Figura 100.

Nessa condição apesar do sistema não possuir variação de vazão, Q1 e Q2 iguais a zero e Dif igual a zero, o empacotamento continua ativo, LP a uma taxa constante, como mostrado na Figura 102. Isso quer dizer que, na ausência de vazões, o empacotamento definido pela equação (10), como era esperado, varia em função da pressão.



Figura 100: Regime permanente em shut-in.

Quando o vazamento foi iniciado, o sistema detectou no instante mostrado na Figura 101 com a resposta apresentada na Figura 103.



Figura 101: Vazamento no instante em que é detectado com o duto inicialmente em shut-in.



Figura 102: Comportamento do sistema para duto em shut-in sem vazamento.



Figura 103: Vazamento detectado com duto em shut-in.

## 5.5. Detecção de vazamento por lógica *fuzzy*

Nos testes realizados não houve nenhum falso positivo e todos os vazamentos foram detectados. Para os resultados mostrados a seguir foram utilizados dados do simulador acoplado em tempo real sem ruído.

Primeiramente, verificou-se se a condição de duto parado ou *shut-in* (Figura 104) seria detectada corretamente. Nesta figura, do lado esquerdo mostra-se o cenário simulado no simulador, enquanto que no lado direito apresenta-se o mapa de regras com a saída resultante, que para este caso foi 0,98. Este resultado está próximo de 1 que é estado de duto em *shut-in*, conforme pode ser observado na Figura 51.



Figura 104: Condição de shut-in.

O próximo cenário testado foi com o duto operando em regime permanente, Figura 105. Da mesma forma do lado esquerdo o cenário operacional simulado e do lado direito o mapa de regras indicando saída igual a 4,97, valor próximo do estado *steady-state*, Figura 51.



Figura 105: Duto operando em regime permanente.

O cenário simulado na Figura 106 mostra o duto operando com um vazamento próximo ao expedidor. Neste caso, o mapa de regras indica saída 6,02, que corresponde ao estado de problema (ver Figura 51).



Figura 106: Vazamento simulado próximo ao expedidor.

O cenário mostrado na Figura 107 mostra o duto operando com um pequeno transiente devido à atuação em set-points das controladoras. Este transiente foi reconhecido corretamente através do mapa de regras cuja saída foi 2,98, próximo ao valor correspondente ao estado transiente, que é 3.



Figura 107: Simulação de pequenos transientes devido à atuação em válvula de controle.

A Figura 108 mostra um teste de pressurização na saída por meio de uma atuação na válvula de controle do recebedor. Esta condição hidráulica ocasiona em alguns sistemas de detecção de vazamento a geração de alarmes falsos, uma vez que momentaneamente uma assinatura de vazamento é formada, com a vazão no expedidor maior do que a do recebedor, embora tenha ocorrido pressurização no lado recebedor. O sistema indica o estado 3, que corresponde ao estado transiente, evitando assim o alarme falso, o que condiz com a condição hidráulica do duto.



Figura 108: Pressurização na saída, teste para possível alarme falso.

Outro teste que gera alarmes falsos em alguns sistemas de detecção de vazamento é a despressurização ocasionada por atuação em válvula de controle ou desligamento de bombas. Este cenário foi simulado na Figura 109 e o resultado

obtido pelo mapa de regras foi 2,96 que continua próximo de 3, que é o estado de indicação de transiente.



Figura 109: Despressurização na entrada, possível alarme falso.

### 5.6. Comparação entre os métodos de detecção de vazamento

Avaliar sistemas de detecção de vazamento pode ser bastante oneroso, uma vez que o que normalmente se faz é realizar um teste de campo. Foi desenvolvida uma metodologia para avaliar os sistemas de detecção de vazamento desenvolvidos e fazer uma comparação entre os mesmos do ponto de vista de confiabilidade, sensibilidade e robustez segundo (API 2012a). Para este fim somente o sistema baseado em lógica *fuzzy* e o balanço de massa serão avaliados e comparados.

A metodologia consiste em sintonizar o sistema de detecção de vazamento em teste de maneira que nenhum alarme falso seja gerado. Alguns sistemas de detecção de vazamento somente funcionam adequadamente em regime permanente tal como mostrado na Figura 3. Para os sistemas desenvolvido espera-se que os mesmos não gerem alarmes falsos durante os transientes por isso ajustes são realizados de forma que nenhum dos dois sistemas gerem alarmes falsos em nenhuma condição normal.

A metodologia consiste em conectar o sistema de detecção de vazamento a ser testado ao simulador hidráulico (ADVANTICA 2008) através do protocolo OPC (Foundation 1999) conforme mencionado sem seções anteriores.

Para o teste ser o mais fidedigno possível é necessário que o modelo hidráulico do simulador esteja o mais coerente possível com a realidade. Sugere-se que para cada ponto o erro relativo seja de no máximo 5%.

Para testar a confiabilidade e a robustez do sistema a simulação mostrada na Tabela 10 foi programada.

Passo	Descrição
1	Carregar o cenário de regime permanente e esperar que o sistema de detecção de vazamento estabilizar.
2	Partir segunda bomba e esperar que o sistema entre em regime permanente.
3	Para a segunda bomba e esperar o sistema estabilizar.
4	Reduzir a vazão através do decremento da fração de abertura da válvula de controle no recebedor.
5	Repetir o passo 4 após o sistema estabilizar.
6	Repetir o passo 4 após o sistema estabilizar.
7	Aumentar a vazão no expedidor através de incremento na fração de abertura da válvula de controle do lado expedidor
8	Repetir o passo 6 após o sistema estabilizar
9	Repetir o passo 6 após o sistema estabilizar

Tabela 10: Simulação para avaliar confiabilidade e robustez do sistema

O sistema de detecção em teste deve ser ajustado através da simulação programada até que nenhum alarme falso seja gerado. Em seguida, uma nova simulação deve ser executada, desta vez objetivando os requisitos de sensibilidade. Esta simulação pode ser visualizada por meio da Tabela 11.

Passo	Descrição
1	Carregar o cenário de regime permanente e esperar que o sistema de
1	detecção de vazamento estabilizar.
r	Gerar vazamento grande, da ordem de 30% ou mais da vazão nominal do
Z	duto em um ponto próximo do expedidor.
3	Esperar o vazamento estabilizar.
4	Parar o vazamento e esperar o sistema estabilizar.
5	Repetir os passos 2, 3 e 4 trocando a localização do vazamento para um
5	ponto intermediário do duto.

Tabela 11: Simulação para avaliar sensibilidade do sistema

6	Repetir os passos 2, 3 e 4 trocando a localização do vazamento para
	próximo do recebedor.
7	Gerar um vazamento pequeno, da ordem de 5% ou menos da vazão
	nominal do duto em um ponto próximo do expedidor.
8	Esperar o vazamento estabilizar.
9	Parar o vazamento e esperar o sistema estabilizar.
10	Repetir os passos 7, 8 e 9 trocando a localização do vazamento para
	próximo do expedidor.

Para validar metodologia foi realizado um teste em um modelo de duto real operado pela Transpetro. O duto escolhido possui 0,4064 m de diâmetro (16 polegadas) e 184.000 metros de comprimento. O duto transporta gasolina e opera com uma vazão de 0,097 m<sup>3</sup>/s (350 m<sup>3</sup>/h). Foi inserido ruído branco nas variáveis de processo, aproximadamente 0,0017 m<sup>3</sup>/s (6,125 m<sup>3</sup>/h) para vazão, aproximadamente 49033 Pa (0,5 kgf/cm<sup>2</sup>) para a pressão de entrada e aproximadamente 68646 Pa (0,7 kgf/cm<sup>2</sup>) para a pressão de saída.

Utilizando a API 1149, (API 1980) foi calculado o volume mínimo detectável que foi de 1,51 m<sup>3</sup> e volume de 1,67 m<sup>3</sup> para alarme em janela de 5 minutos.

O sistema baseado em balanço de massa possui recurso que guarda o maior valor de desvio necessário para alarmar o sistema quando submetido ao teste mostrado na Tabela 10. Para o caso do duto real, o volume mínimo detectável doi de 0,87 m<sup>3</sup>. Os valores obtidos no teste para o sistema baseado em balanço de massa podem ser visualizados na Tabela 12.

Vazamento (m <sup>3</sup> /h)	Vazamento (%)	Tempo (min)	Pos
105	30	0,92	1
105	30	2,02	2
105	30	0,83	3
18	5	2,50	1
18	5	3,52	2
18	5	1,89	3

Tabela 12: Sensibilidade do sistema por balanço de massa

Os valores para o sistema baseado em *fuzzy* podem ser observados na Tabela

Vazamento (m <sup>3</sup> /h)	Vazamento (%)	Tempo (min)	Pos
105	30	0,65	1
105	30	1,42	2
105	30	0,55	3
18	5	1,75	1
18	5	4,80	2
18	5	2,00	3

Tabela 13: Sensibilidade do sistema baseado em lógica fuzzy

Para a Tabela 11 e Tabela 12 vazamento é a vazão do vazamento em unidades de engenharia, vazamento (%) é o percentual da vazão do vazamento em relação a vazão do duto, tempo é o tempo em minutos para que o sistema detecte o vazamento e pos, a posição do vazamento que pode ser próximo ao expedidor (1), meio do duto (2) ou próximo ao recebedor (3).

# 6 Conclusões e trabalhos futuros

Um dos principais objetivos propostos neste trabalho foi o desenvolvimento de sistemas de sistemas internos (API 2012a) de detecção e localização de vazamentos foi alcançado e materializado através dos sistemas de balanço de massa, lógica *fuzzy*, localização de vazamento pela velocidade sônica e interseção dos gradientes hidráulicos e localização de vazamento por redes neurais. Os sistemas baseados em lógica *fuzzy* e redes neurais não são convencionais e não são citados por (API 2012a), as demais técnicas são mencionadas tanto em (API 2012a) como em (API 2015).

A técnica por balanço de massa também apresenta inovação uma vez que os alarmes são suprimidos dependendo das condições citadas na seção 2.3.1 e ilustradas na Figura 11, realizando assim um dos objetivos que foi o desenvolvimento de um mecanismo que reconheça os transientes hidráulicos inibindo alarmes indevidos. O método de detecção de vazamento por balanço de massa teve sua confiabilidade aumentada quando a informação do empacotamento foi utilizada para compor a assinatura do vazamento.

Esperava-se que o sistema de detecção de vazamento também pudesse atuar na condição de *shut-in* o que foi demonstrado ao final da seção 5.4.

Para o caso do sistema de balanço de massa foram avaliadas algumas rotinas de correção de volume na seção 2.2.4 e implementada 2.2.4.1 no sistema. Outra forma simplificada para a correção de pressão e temperatura é utilizar equações de estado, tal como mostrado em (Abdulkarim e Alrasheedy 2015) e implementadas também no mesmo sistema.

A avaliação de filtros digitais para melhoria da qualidade dos dados de processo foi um objetivo perseguido uma vez que muitos sistemas de detecção de vazamento comerciais utilizam algum tipo de filtro. Sendo assim alguns filtros digitais foram testados conforme descrito na seção 4.2.

Além dos filtros testados, poderia ser interessante verificar em tempo real se existe alguma variável de processo congelada. Uma forma de avaliar esta situação pode ser encontrada em (Montalvão *et al.* 2014)

Um dos objetivos desta dissertação foi criar uma metodologia para testar os sistemas desenvolvidos que também servisse para testar sistemas comerciais a um custo baixo. Esta metodologia está descrita na seção 5.6 com mais detalhes. Um resultado interessante é a possibilidade de se fazer testes virtuais para avaliar um sistema de detecção de vazamento, tal como foi mostrado em (Montalvão *et al.* 2015), (Aramaki, Tanscheit, *et al.* 2015) e (Aramaki, Vellasco, *et al.* 2015).

Como os testes virtuais se baseiam na comunicação com um simulador hidráulico, é uma premissa de que o modelo hidráulico seja o mais exato possível. As curvas das bombas e outros equipamentos se disponíveis constituem fontes de incerteza para a simulação hidráulica. Um trabalho foi desenvolvido, (Aramaki e Barbosa 2015), para estimar as curvas de bombas quando estas não possuem folha de dados, ou estão desatualizadas.

No módulo de ajuste do gradiente hidráulico, muitas variáveis foram testadas. É possível ajustar o fator de atrito, a viscosidade, na rugosidade ou em outros parâmetros do fluido e da instrumentação. Optou-se por realizar o ajuste na viscosidade, porém como sugestão futura, um sistema de reconciliação de dados pode ser realizado para estimar com uma exatidão maior as variáveis de processo e propriedades do duto e do fluido.

Seguindo o que foi comentado no parágrafo anterior, um dos desdobramentos possíveis deste trabalho seria a criação de um *soft-sensor* para estimar a viscosidade, uma vez que pelo menos na Transpetro, não existem viscosímetros em linha e esta propriedade do fluido é importante para análises e simulações de cenários operacionais.

Muitas vezes é necessário fazer avaliações em tempo real do fator de atrito do duto quando se está testando um polímero redutor de atrito. Nesse caso os ajustes mencionados acima, poderiam de alguma forma inferir este fator para auxiliar na análise da eficiência destes polímeros.

A versão da norma API 1149 atualizada em setembro de 2015, (API 2015), propõe a utilização de um software fornecido pela mesma para fazer a análise de sistemas considerando transientes. Como este software não foi liberado até o momento desta dissertação optou-se por não seguir essa linha de desenvolvimento. Mas um estudo desta norma e do software poderia levar a um sistema que fornecesse a curva de sensibilidade de um sistema de detecção de vazamento em tempo real.

O método de detecção de vazamento baseado em redes neurais utilizando apenas as informações de vazão não se mostrou eficaz, devendo, portanto, ser modificado para incluir as variáveis de pressão de forma a melhorar a sua robustez. Este método também localiza vazamentos, porém para uma boa exatidão, este método torna-se pouco exequível na prática.

O método de detecção de vazamento por meio de lógica *fuzzy* mostrou-se muito trabalhoso na fase de sintonia, uma vez que necessita de ajuste em muitos parâmetros e funções de pertinência o que torna o método por tentativa e erro custoso. Um método de sintonia poderia ser estuado no futuro possivelmente por meio do uso de redes neurais.

O método de localização de vazamento por meio do gradiente hidráulico tem sua exatidão melhorada quando as vazões são corrigidas para as mesmas condições de pressão e temperatura. Sendo a localização prejudicada quando existe uma incerteza significativa da localização das interfaces entre os produtos.

O método de localização pela velocidade sônica necessita de tempos de aquisição menores o que pode ser inviável para um sistema de detecção de vazamento interno. Uma sugestão para incorporação deste método não realizada nesta dissertação seria a inclusão de um sistema de buffer capaz de armazenar as variáveis de processo em um tempo de aquisição menor do que a do módulo de detecção de vazamento.

Muitas outras técnicas não foram abordadas neste trabalho, tais como a técnica conhecida como PPA, *Pressure Point Analysis*, (Whaley *et al.* 1992), e muitas outras que utilizam problemas de inversão tais como mostradas em (Colombo *et al.* 2009) e que poderiam ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

Algumas situações operacionais não foram contempladas nesse estudo, tais como: o caso em que a vazão do duto é pulsada devido a características de bombeamento de plataforma; dutos que operam com derivações intermediárias e dutos que operam com estação intermediária de bombas sem medição de vazão na estação intermediária. Além de dutos bidirecionais. Estes são casos encontrados na Transpetro e que poderiam ser estuados em outros trabalhos futuros.

# 7 Referências bibliográficas

ABDULKARIM, M. Z.; ALRASHEEDY, A. A. G. Compensated Mass Balance Method For Oil Pipeline Leakage Detection using SCADA. **International Journal** of Computer Science and Security (IJCSS), v. 9, n. 6, 2015.

ABNT. Álcool etílico e suas misturas com água - Determinação da massa específica e do teor alcóolico - Método do densímetro de vidro.: ABNT 1980.

\_\_\_\_\_\_. Álcool etílico e suas misturas com água - Determinação da massa específica e do teor alcóolico - Método do densímetro de vidro. Rio de Janeiro - Brazil: ABNT 2009.

ADVANTICA. Stoner Pipeline Simulator (SPS) 9.7 Help and Reference. Mechanicsburg 2008.

ANDERSON, J. D.; WENDT, J. Computational fluid dynamics. Springer, 1995.

API. Pipeline Variable Uncertainties and Their Effects on Leak Detectability 1980.

\_\_\_\_\_. Evaluation Methodology for Software Based Leak Detection Systems. <u>API Publication 1155</u> 1995.

\_\_\_\_\_. Manual of Petroleum Measurement Standards - Chapter 11 Physical Properties Data. <u>Temperature Correction for NGL and LPG</u> 2007a.

\_\_\_\_\_\_. Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 11 - Physical Properties Data. <u>Section 2, Part 5 - Simplified Vapor Pressure Correlation for Commercial NGLs</u> 2007b.

\_\_\_\_\_. Computational Pipeline Monitoring for Liquids. <u>API Recommended</u> <u>Practice 1130</u> 2012a.

\_\_\_\_\_. Manual of Petroleum Measurement Standards. <u>Chapter 11.2.2M -</u> <u>Compressibility Factors for Hydrocarbons: 350-637 Kilograms per Cubic Metre</u> <u>Density (15 °C) and -46 °C to 60 °C Metering Temperature</u> 2012b.

\_\_\_\_\_\_. Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 11 - Physical Properties Data. Section 1 - Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products and Lubricating Oils 2012c.

\_\_\_\_\_. Pressure-relieving and depressuring system. <u>API Standard 521</u> 2014.

\_\_\_\_\_. API 1149: Pipeline Variable Uncertainties and Their Effects on Leak Detectability. <u>Technical Report 1149</u>. Washington: API Publishing Services 2015.

ARAMAKI, T. L.; BARBOSA, C. R. H. Determination of pump curves based on historical data. XXI IMEKO World Congress 'Measurement in Research and Industry', 2015, Praga. Czech Technical University. p.1069-1073.

ARAMAKI, T. L. et al. A fuzzy approach to leak detection in liquid pipelines. <u>8th Brazilian Congress on Metrology</u>. Bento Gonçalves: Congresso Brasileiro de Metrologia 2015.

ARAMAKI, T. L.; VELLASCO, M. M.; BARBOSA, C. R. H. A neural network approach for leak detection and localization in liquid pipelines. <u>8th Brazilian</u> <u>Congress on Metrology</u>. Bento Gonçalves: Congresso Brasileiro de Metrologia 2015.

BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea pipeline integrity and risk management**. Gulf Professional Publishing, 2014. ISBN 0123946484.

BARRADAS, I. et al. Leaks detection in a pipeline using artificial neural networks. In: (Ed.). **Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications**: Springer, 2009. p.637-644. ISBN 3642102670.

CHRISTIE, B. Predicting Shut-in and In-Station Leak Detection Sensitivities. PSIG Annual Meeting, 2012, Pipeline Simulation Interest Group.

CIARLINI, P. Advanced Mathematical & Computational Tools in Metrology V. World Scientific, 2001. ISBN 9789810244941. Disponível em: < <u>https://books.google.com.br/books?id=DHPEcCC5hLcC</u> >.

COLEBROOK, C. F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. Journal of the Institution of Civil Engineers, v. 11, n. 4, p. 133-156, 1939.

COLOMBO, A. F.; LEE, P.; KARNEY, B. W. A selective literature review of transient-based leak detection methods. Journal of Hydro-environment **Research**, v. 2, n. 4, p. 212-227, 2009. ISSN 1570-6443.

DA SILVA, D. S. et al. Field Test of a Leak Detection System: Planning, Execution and Results. 2010 8th International Pipeline Conference, 2010, American Society of Mechanical Engineers. p.539-550.

DA SILVA, H. V. et al. Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system. **Journal of Petroleum Science and Engineering,** v. 49, n. 3, p. 223-238, 2005. ISSN 0920-4105.

DE ALMEIDA, M. R. M. E. G. et al. Field Testing of OSBRA 964 km Pipeline Leak Detection System. 2006 International Pipeline Conference, 2006, American Society of Mechanical Engineers. p.699-707.

DEMUTH, H.; BEALE, M. Neural network toolbox for use with MATLAB. 1993.

#### EGIG. Gas Pipeline Incidents. 2015

FOUNDATION, O. Specification, OPC Data Access Automation Version 2.02 1999.

GEIGER, G. State-of-the-art in leak detection and localization. **Oil Gas European Magazine**, v. 32, n. 4, p. 193, 2006. ISSN 0342-5622.

GEIGER, G.; WERNER, T.; MATKO, D. Leak detection and locating-a survey. PSIG Annual Meeting, 2003, Pipeline Simulation Interest Group.

INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia–Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias: INMETRO 2012.

LAROCK, B. E.; JEPPSON, R. W.; WATTERS, G. Z. Hydraulics of Pipeline Systems. CRC Press, 1999. ISBN 9781420050318.

LIEPING, Z.; AIQUN, Z.; YUNSHENG, Z. On remote real-time communication between MATLAB and PLC based on OPC technology. Control Conference, 2007. CCC 2007. Chinese, 2007, IEEE. p.545-548.

LIU, C.-W. et al. A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, OXFORD, v. 35, p. 236-246, 2015. ISSN 0950-4230.

LIU, H. Pipeline engineering. CRC Press, 2003. ISBN 0203506685.

MENON, E. S. Liquid Pipeline Hydraulics. CRC Press, 2004. ISBN 9780203021385.

MONTALVÃO, A. F. F. D.; ARAMAKI, T. L. Sintonia de sistemas de detecção de vazamento em oleodutos. <u>3º Congresso de Instrumentação, Controle e Automação da Petrobras</u>. Rio de Janeiro 2012.

\_\_\_\_\_. Global Heat Transfer Coefficient in pipelines. <u>Rio Pipeline 2015</u> <u>Conference & Exposition</u>. Rio de Janeiro, Brazil: Braziliam Petroleum, Gas and Biofuel Institute 2015.

MONTALVÃO, A. F. F. D. et al. Sistema de Gerenciamento de Medição: Detecção de Instrumentos Congelados. <u>Rio Oil & Gas 2014 Expo And</u> <u>Conference</u>. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis 2014. MONTALVÃO, A. F. F. D.; COELHO, P. S. M.; ARAMAKI, T. L. **Tuning and** virtual evaluation of RTTM leak detector. <u>Rio Pipeline Conference & Exposition</u> 2015. Rio de Janeiro, Brazil: Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute 2015.

MORÉ, J. J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. In: (Ed.). **Numerical analysis**: Springer, 1978. p.105-116. ISBN 3540085386.

NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C. **Data Reconciliation & Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data**. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2000. 355 ISBN 0-88415-255-3.

NICHOLAS, R. Simulation of slack line flow-a tutorial. PSIG Annual Meeting, 1995, Pipeline Simulation Interest Group.

PETRÓLEO, A. N. D. Regulamento técnico de dutos terrestres para movimentação de petróleo, derivados e gás natural. Rio de Janeiro 2011.

PRESS, W. H. et al. Numerical recipes in C. Cambridge university press Cambridge, 1996.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications**. Prentice Hall, 1996. ISBN 9780133737622. Disponível em: < <u>https://books.google.com.br/books?id=sAcfAQAAIAAJ</u> >.

RISTOW, T. C. et al. Validation of thermo-hydraulic simulation model for oil pipeline transporting heated fluids. <u>Rio Pipeline 2015 Conference & Exposition</u>. Rio de Janeiro, Brazil: Braziliam Petroleum, Gas and Biofuels Institute 2015.

SANCHEZ, J.; CANTON, M. P. Software Solutions for Engineers and Scientists. CRC Press, 2007. ISBN 9781420043037. Disponível em: < <u>https://books.google.com.br/books?id=jtKc0k5BWA8C</u> >.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. Process Dynamics and Control. 2003.

SOUTO, M. Análise Numérica de Tensões e de Expansão Térmica de Dutos Submarinos Enterrados. 2005. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

STOUFFS, P.; GIOT, M. Pipeline leak detection based on mass balance: Importance of the packing term. **Journal of loss prevention in the process industries,** v. 6, n. 5, p. 307-312, 1993. ISSN 0950-4230.

STRANNEBY, D. **Digital Signal Processing: DSP and Applications: DSP and Applications**. Elsevier Science, 2001. ISBN 9780080491011. Disponível em: < <u>https://books.google.com.br/books?id=1dHGdn2TYngC</u> >.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B.; BEDFORD, K. W. Fluid Mechanics. WCB/McGraw Hill, 1998. ISBN 9780070625372.

SWAMEE, P. K.; JAIN, A. K. Explicit equations for pipe-flow problems. Journal of the hydraulics division, v. 102, n. 5, p. 657-664, 1976. ISSN 0044-796X.

VERDE, C. et al. Multi-leak diagnosis in pipelines a comparison of approaches. Artificial Intelligence, 2008. MICAI'08. Seventh Mexican International Conference on, 2008, IEEE. p.352-357.

WHALEY, R.; NICHOLAS, R.; VAN REET, J. Tutorial on software based leak detection techniques. **PSIG Pipeline Simulation Interest Group**, 1992.

ZHANG, J. Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system. **Pipes and Pipelines International,** v. 42, n. 1, p. 20-26, 1997. ISSN 0370-1204.

ZUCCHINI, R. R.; THEMUDO, J. D. S. CONTRIBUTION TO DETERMINATION OF DENSITY AND ALCOHOLIC CONTENT IN MIXTURES ETHANOL-WATER IN BRAZIL. <u>IMEKO WORLD</u> CONGRESS. Rio de Janeiro 2006.