UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS *SUBSEA* DE PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS VIA PREDITORES ESTOCÁSTICOS ARX-MIMO

Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadores: José Luiz de Medeiros Ofélia de Queiroz F. Araújo

RIO DE JANEIRO ABRIL DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Smiderle, Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira.

Detecção de vazamentos em sistemas subsea de produção de óleo e gas via preditores estocásticos ARX-MIMO/ Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle. - Rio de Janeiro: UFRJ/TPQB, 2016.

xiv, f122.: il.; 29,7cm.

Orientadores: José Luiz de Medeiros

Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo Dissertação (mestrado) – UFRJ/EQ/ Programa de Pósgraduação em Tecnologias de Processos Químicos e Bioquímicos, 2016.

Referências Bibliográficas: f.114 -117.

1. Detecção de Vazamento. 2. Subsea. 3. Óleo e gás. 4. ARX. I. Medeiros, José Luiz de at al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pósgraduação em Tecnologias de Processos Químicos e Bioquímicos. III. Título.

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS *SUBSEA* DE PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS VIA PREDITORES ESTOCÁSTICOS ARX-MIMO

Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado por:

Carlos Eduardo Fontes da Costa e Silva, D.Sc.

Argimiro Resende Secchi, D.Sc.

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

José Luiz de Medeiros, D.Sc. (orientador)

Ofélia de Q. F. Araújo , Ph.D. (orientadora)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL ABRIL DE 2016

Dedicatória

Dedico à minha esposa Jéssica.

Citação

"Deus ao mar o perigo e o abismo deu Mas nele é que espelhou o céu." Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus. À minha família que sempre me suportou e incentivou. Agradeço especialmente à minha esposa Jéssica: pela paciência em minha ausência, pelo incentivo nos momentos mais difíceis e também pela revisão do texto desta dissertação. Aos meus orientadores professores José Luiz e Ofélia. Aos amigos do laboratório H2CIN e CEGN. Um agradecimento especial à professora Ofélia a quem já chamo de amiga há algum tempo. Agradeço à Escola de Química pela minha formação. Ao meu chefe e amigo Paulo Machado que sempre acreditou neste trabalho. À FMC Technologies pelo apoio financeiro, pela concessão de suas facilidades para execução dos testes experimentais realizados neste trabalho, pela concessão das licenças dos *softwares* utilizados neste trabalho e também pela oportunidade concedia a mim de cursar o mestrado simultaneamente com o trabalho.

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS *SUBSEA* DE PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS VIA PREDITORES ESTOCÁSTICOS ARX-MIMO

Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle Abril, 2016

Orientadores: Prof. José Luiz de Medeiros, D.Sc. Prof. Ofélia de Queiroz F. Araújo, D.Sc.

A produção de óleo e gás no Brasil ocorre primordialmente através de poços submarinos. Os sistemas subsea de produção de óleo e gás, compostos por equipamentos e linhas, são projetados para controlar a produção dos poços submarinos e transportar com segurança e eficiência os fluidos produzidos até a unidade de processamento primário, seja uma plataforma offshore ou uma unidade de processamento em terra. Um vazamento de óleo no mar pode incorrer em multas elevadas além de macular a reputação da empresa responsável pelo desastre ambiental inevitável decorrente do vazamento. Tipicamente há escassa instrumentação disponível para monitorar a integridade dos equipamentos e linhas submarinas, entretanto uma falha do sistema submarino pode acarretar em danos graves ao meio ambiente e forte prejuízo financeiro à operadora do sistema. Este trabalho apresenta um método de detecção de vazamentos via preditores estocásticos ARX-MIMO, desenvolvido para operar a limitada instrumentação disponível nos sistemas subsea de produção de óleo e gás. A fim de validar o método de detecção de vazamentos proposto, foram executados experimentos em um aparato de bancada projetado para gerar vazamentos de diferentes calibres em uma linha pressurizada. O loop experimental é composto por uma linha de 1" com cerca de 4 metros de comprimento dotada de derivações para válvulas de diferentes bitolas (1/4", 1/8" e 1/16") que induzem os diferentes calibres de vazamento. O aparato contém apenas três transdutores de pressão e um medidor de vazão. A linha principal é alimentada com fluido hidráulico por uma bomba de alta capacidade e o vazamento se dá para um reservatório aberto para atmosfera. O preditor ARX-MIMO foi capaz de detectar precisamente os vazamentos induzidos no loop experimental operando a diferentes pressões (2320psi, 1450psi e 580psi). Por fim, simulações numéricas de escoamento multifásico geraram dados para verificar a aplicabilidade do método de detecção de vazamentos proposto neste trabalho no contexto de produção subsea de óleo e gás. O preditor ARX-MIMO foi capaz de detectar um vazamento de 10mm em um riser de 120mm com aproximadamente 4km de extensão a uma profundidade de cerca de 400m quando este opera com regime de escoamento estável. Adicionalmente foi verificado que o aumento da incerteza do sistema de medição, traduzido em ruídos de medição, afetam negativamente o desempenho de detecção. Em um segundo cenário, o detector ARX-MIMO não foi capaz de detectar o vazamento quando o riser opera em regime de golfadas severas.

Abstract of the Dissertation presented to the Graduate Program on Technology of Chemical and Biochemical Processes of Escola de Química, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) as part of the requirements for the degree of Master of Science.

LEAK DETECTION IN OIL AND GAS SUBSEA PRODUCTION SYSTEMS VIA ARX-MIMO STOCHASTIC PREDICTORS

Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle April, 2016

Supervisors: Prof. José Luiz de Medeiros, D.Sc. Prof. Ofélia de Queiroz F. Araújo, D.Sc.

The Brazilian oil production is based mainly on subsea wells. The subsea production systems contain subsea equipment and flowlines designed to transport safely and efficiently the production fluids to the upstream processing facilities. An oil spill into the sea environment due to leakages in the subsea production system implies fees and can damage the reputation of the operator responsible for that environmental disaster. Typically there are a few instruments available in subsea systems that could be used to monitor the integrity of the subsea equipment and flowlines. This work presents a leak detection method based on stochastic predictors ARX-MIMO, developed to work with limited data frequently found in oil and gas subsea production systems. Aiming to validate the proposed leak detection method, an experimental loop was designed to generate leaks with different sizes in a pressurized line. The loop 1" main header contains fittings to split the flow thought valves of different sizes (1/4", 1/8" e 1/16"). There are three pressure transmitters and one flow meter placed in the main header. It is fed by a high capacity pump and the leakage fluid is collected by a reservoir at atmospheric pressure. The ARX-MIMO predictor could precisely detect the leaks generated in the experimental loop operating at different pressures (2320psi, 1450psi e 580psi). Finally, numerical simulations of multiphase flow generated data to verify the applicability of ARX-MIMO to detect leaks in subsea oil and gas production systems. The proposed leak detection method could detect a 10mm leak on a riser of 120mm ID and 4km long laid at water depth of approximately 400m when operating under stable flow regime. Additionally it was verified that high uncertainty of measurements, i.e. high intensity measurement noise, can deteriorate the detector performance. The proposed ARX-MIMO detection method was not capable of detecting the leak when the riser is operating under severe slug flow regime.

Sumário

1.	Introc	lução	15
2.	Revis	ão Bibliográfica	17
2	.1. S	Sistemas de Produção Submarinos	17
	2.1.1.	Sistema de linhas e Manifolds	18
	2.1.2.	Sistema de completação de poço	18
	2.1.3.	Sistema de controle e gerenciamento de dados	19
	2.1.4.	Arranjos Submarinos	22
2	.2. E	Escoamento Multifásico no contexto de SPS	25
	2.2.1.	Regimes de Escoamento Multifásico	25
	2.2.2.	Modelagem de Escoamento Multifásico em Dutos Submarinos	27
2	.3. N	Monitoramento de Condição em SPS	28
2	.4. S	Sistemas de Detecção de Vazamentos	31
	2.4.1.	Monitoramento de pressão/vazão	31
	2.4.2.	Métodos de balanço de massa	33
	2.4.3.	Métodos estatísticos	35
	2.4.4.	Modelagem transiente em tempo real	37
2	.5. 0	Características de instrumentação	41
	2.5.1.	Medidores de vazão monofásica	42
	2.5.2.	Medidores de vazão multifásica	43
2	.6. A	Análise de Séries Temporais	43
	2.6.1.	Sistemas lineares invariantes no tempo	45
	2.6.2.	Identificação do modelo	49
	2.6.3.	Predição da resposta do sistema	52
3.	Meto	dologia	53
3	.1. A	Algoritmo de Detecção	53
3	.2. A	Aplicação em Dados de Bancada	58
	3.2.1.	Materiais	61
	3.2.2.	Procedimento Experimental	61
3	.3. A	Aplicação em dados simulados	64
			V11

	3.3.1.	Caso 1: Riser com produção estável	64
	3.3.2.	Caso 2: <i>Riser</i> com regime de escoamento em golfadas	69
4.	Resul	tados e Discussão	70
4	.1. E	Detecção em Dados de Bancada	70
	4.1.1.	Testes com apenas um vazamento	70
	4.1.2.	Testes com dois vazamentos simultâneos	92
4	.2. D	Detecção em Dados Simulados	96
	4.2.1.	Resultados do caso 1	96
	4.2.2.	Resultados do caso 2 1	109
5.	Concl	lusões e Sugestões para Trabalhos Futuros 1	115
6.	Refer	ências1	117

Lista de Figuras

Figura 2.1. Desenho esquemático de um sistema de produção submarino 17
Figura 2.2. Fluxograma típico de uma árvore de natal molhada de produção 19
Figura 2.3. Desenho esquemático de um módulo de controle submarino 20
Figura 2.4. Desenho esquemático de um sistema de controle submarino 21
Figura 2.5. Esquemático de uma seção transversal típica de um umbilical de
controle
Figura 2.6. Arranjo submarino com árvores satélites
Figura 2.7. Arranjo submarino com 4 ANMs, 1 manifold e 1 linha de
exportação
Figura 2.8. Arranjo submarino mostrando 2 ANMs e 2 manifolds em
configuração <i>piggy back</i>
Figura 2.9. Regimes de escoamento bifásico gás-líquido em dutos horizontais
(adaptado de BRATLAND, 2010)
Figura 2.10. Regimes de escoamento bifásico gás-líquido em dutos verticais
(adaptado de BRATLAND, 2010)
Figura 2.11. Regimes de escoamento trifásico gás-líquido-líquido em dutos
horizontais (adaptado de BRATLAND, 2010)
Figura 2.12. Definição de um TCI hipotético
Figura 2.13. Representação esquemática de agregação de TCI 30
Figura 2.14. Respostas do perfil hidráulico de um duto com pressão positiva
com vazamento
Figura 2.15. Medidor tipo turbina
Figura 2.16. Diagrama esquemático de sistema dinâmico
Figura 2.17. Diagrama esquemático de sistema dinâmico perturbado
Figura 3.1. Exemplo de hierarquia de TCIs de vazamento
Figura 3.2. Representação gráfica da função de transferência do $TCI_{RES}^{Y(i)}$ 57
Figura 3.3. Representação gráfica da função de transferência do $TCI_{CI}^{Y(i)}$ 58
Figura 3.4. Esquema hidráulico simplificado do aparato experimental para
testes de detecção de vazamentos
Figura 3.5. Circuito principal do aparato experimental para testes de detecção
de vazamentos

Figura 3.6. Painel com montagem dos sensores no sistema de aquisição de
dados
Figura 3.7. Representação esquemática do caso 164
Figura 3.8. Geometria do <i>riser</i>
Figura 4.1. Resultados experimentais do Teste 171
Figura 4.2. Resultados experimentais do Teste 2
Figura 4.3. Resultados experimentais do Teste 3
Figura 4.4. Resultados da detecção ARX com P3 e F1 como sinal de entrada 74
Figura 4.5. Resultados da detecção ARX com P2 e F1 como sinal de entrada 74
Figura 4.6. Resultados da detecção ARX com P2 e P3 como sinal de entrada 75
Figura 4.7. Resultados da detecção ARX com P1 e F1 como sinal de entrada 75
Figura 4.8. Resultados da detecção ARX com P1 e P3 como sinal de entrada 76
Figura 4.9. Resultados da detecção ARX com P1 e P2 como sinal de entrada 76
Figura 4.10. Análise dos resíduos relativos de predição antes e depois do
vazamento da variável P3
Figura 4.11. Análise dos resíduos relativos de predição antes e depois do
vazamento da variável F178
Figura 4.12. Predição do ARX 3x1-300 no vazamento 1/4" a 2320psi 80
Figura 4.13. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4'' a
2320psi.
Figura 4.14. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a
2320psi.
Figura 4.15. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4"
a 2320psi
Figura 4.16. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4'' a 1450psi. 82
Figura 4.17. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4'' a
1450psi.
Figura 4.18. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a
1450psi.
Figura 4.19. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4"
a 1450psi.
Figura 4.20. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4'' a 580psi 84

Figura 4.21. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4'' a
580psi.
Figura 4.22. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4'' a
580psi.
Figura 4.23. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4"
a 580psi.
Figura 4.24. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 2320psi. 86
Figura 4.25. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8'' a
2320psi.
Figura 4.26. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8'' a
2320psi.
Figura 4.27. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8"
a 2320psi
Figura 4.28. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 1450psi. 88
Figura 4.29. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a
1450psi
Figura 4.30. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO $3x1-300$ no vazamento $1/8$ " a
1450psi.
Figura 4.31. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8"
a 1450psi.
Figura 4.32. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 580psi 90
Figura 4.33. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a
580psi.
Figura 4.34. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8'' a
580psi.
Figura 4.35. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8"
a 580psi
Figura 4.36. Resultados experimentais do Teste com dois vazamentos
simultâneos
Figura 4.37. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois vazamentos a
2320psi.
Figura 4.38. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois
vazamentos a 2320psi

Figura 4.39. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois
vazamentos a 2320psi
Figura 4.40. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois
vazamentos a 2320psi
Figura 4.41. Envelope de fases do fluido do caso 1
Figura 4.42. Perfis de pressão no <i>riser</i> antes e depois do vazamento do caso 1. 97
Figura 4.43. Perfis de temperatura no riser antes e depois do vazamento do caso
1
Figura 4.44. Perfis de <i>holdup</i> no <i>riser</i> antes e depois do vazamento do caso 1 99
Figura 4.45. Séries temporais de Ptop, Psub, Tsub e Ttop no caso 1
Figura 4.46. Séries temporais de Wsub e Qtop no caso 1
Figura 4.47. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 1. 101
Figura 4.48. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 102
Figura 4.49. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1
Figura 4.50. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 103
Figura 4.51. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 103
Figura 4.52. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 1 com
λ = 0.01.
Figura 4.53. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.01 105
Figura 4.54. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ
= 0.01.
Figura 4.55. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ
= 0.01.
Figura 4.56. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ
= 0.01. 106
Figura 4.57. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 1 com
<i>λ</i> = 0.05.
Figura 4.58. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.05 107
Figura 4.59. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ
= 0.05.
Figura 4.60. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ
=0.05.

Figura 4.61. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ
=0.05
Figura 4.62. Séries temporais de Ptop, Psub, Tsub e Ttop no caso 2110
Figura 4.63. Séries temporais de Wsub e Qtop no caso 2110
Figura 4.64. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 2. 11
Figura 4.65. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2
Figura 4.66. Resultado de TCI _{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2
Figura 4.67. Resultado de TCI _{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2
Figura 4.68. Resultado de TCI _{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2 114

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Exemplos de sistemas de detecção de vazamentos	31
Tabela 2.2. Definições de filtros polinomiais para estruturas conhecidas	50
Tabela 3.1. Itens do loop experimental para validação do SDV	61
Tabela 3.2. Condições operacionais dos testes com um vazamento	62
Tabela 3.3. Geometria e propriedades do riser.	65
Tabela 3.4. Propriedades das paredes do riser	66
Tabela 3.5. Propriedades térmicas dos materiais	66
Tabela 3.6. Condições de contorno do caso 1	67
Tabela 3.7. Composição do fluido para o caso 1	68
Tabela 3.8. Parâmetros do vazamento para o caso 1	68
Tabela 3.9. Condições de contorno do caso 2	69
Tabela 4.1. Análise da influência da pressão e bitola de vazament	to no
desempenho de detecção com ARX 3X1-300.	79

ABREVIAÇÕES

ANM	Árvore de Natal Molhada	
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis	
API	American Petroleum Institute	
ARX	Preditor Autorregressivo com entrada Extra	
CUSUM	Acrônimo em inglês para Soma Cumulativa	
DCV	Válvula de Controle Direcional	
DNV	Det Norsk Veritas	
FPSO	Acrônimo em inglês para Unidade Flutuante Estacionária de Produção e Estocagem	
MCV	Módulo de Conexão Vertical	
MIMO	Acrônimo em inglês para Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas	
MSGL	Manifold Submarino de Gas-Lift	
MSI	Manifold Submarino de Injeção	
MSIAG	Manifold Submarino de Injeção de Água e Gás	
MSP	Manifold Submarino de Produção	
MSPI	Manifold Submarino de Produção e Injeção	
MTETR	Modelagem Transiente Estocástica em Tempo Real	
MTFTR	R Modelagem Transiente Fenomenológica em Tempo Real	
MTTR	Modelagem Transiente em Tempo Real	
OPEX	Acrônimo em inglês para Custo Operacional	
PDF	Acrônimo em inglês para Função Densidade de Probabilidade	
PDG	Permanent Downhole Gauge	
PLET	Acrônimo em inglês para Terminação de Duto	
PT	Transdutor de Pressão	
ROV	Acrônimo em inglês para Veículo Operado Remotamente	
RP	Acrônimo em inglês para Práticas Recomendadas	
RTDT	Regulamento Técnico de Dutos Terrestres	
SCM	Acrônimo em inglês para Módulo de Controle Submarino	
SDV	Sistema de Detecção de Vazamentos	
SEM	Acrônimo em inglês para Módulo de Eletrônica Submarino	
SGSS	Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional de Sistemas	
	Submarinos	
SPS	Sistemas de Produção Submarinos	
TCI	Acronimo em inglês para Indice Técnico de Condição	
TPT	Transdutor de Pressão e Temperatura	

1. Introdução

A produção de petróleo e gás natural no Brasil ocorre em sua grande maioria através de poços submarinos. Segundo o anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2015, no final de 2014, as reservas provadas de petróleo do Brasil foram contabilizadas em 16,2 bilhões de barris, das quais 832 milhões em terra e 15,4 bilhões de barris em mar. Por sua vez, em 2014, a produção em mar correspondeu a 92,5% do total.

Um vazamento de petróleo no mar pode ocasionar sérias ameaças para a saúde humana e graves danos ao meio ambiente. Além das perdas óbvias de produção (através do vazamento em si), uma empresa envolvida em um evento de vazamento pode ter sua reputação negativamente afetada e pode ser multada pelos órgãos reguladores.

Existem várias normas e regulamentos que determinam que os dutos e linhas submarinos (e terrestres) tenham que ser monitorados contra vazamentos e rupturas. As normas API RP 1130 e API 1155, as recomendações DNV RP-F116 e DNV RP-F302, os regulamentos ANP SGSS e ANP RTDT são alguns exemplos das normas e melhores práticas que as operadoras de petróleo em alto mar devem seguir no que se trata de detecção de vazamento.

Este trabalho tem por objetivo aplicar um método de detecção de vazamentos utilizando preditores estocásticos ARX-MIMO em sistemas de produção e processamento submarino de petróleo e gás. O método se baseia na análise de séries temporais das medições de sensores disponíveis no sistema; não há requisito para adição de sensores dedicados ao método de detecção de vazamento proposto. Uma vantagem do método de detecção de vazamento proposto é que este opera mesmo com escassez de sensores na rede de escoamento, algo muito comum nos sistemas submarinos.

O método adotado foi criado por Vaz Júnior et al. (2010) e comprovado através de simulação numérica de uma rede de nafta em terra. Este trabalho propõe-se a validar experimentalmente o método. Para isso foi desenvolvido um aparado experimental para simular o vazamento em linhas pressurizadas com líquidos. Adicionalmente o método de detecção de vazamento proposto foi testado em situações típicas de sistemas de produção e processamento submarino de óleo e gás. Foram testados cenários de produção estacionários e transientes frequentes na produção.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos relevantes para o entendimento do método de detecção de vazamento estudado no contexto de sistemas de produção e processamento *subsea*. O Capítulo 3 detalha o procedimento experimental e numérico adotado para validação e teste do método. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados. As conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros estão relatadas no Capítulo 5.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Sistemas de Produção Submarinos

Um sistema de produção submarino (SPS) é composto por equipamentos, estruturas e linhas que permitem controlar a produção de poços submarinos até as facilidades de processamento em superfície. De maneira geral, um SPS consiste de um ou mais poços submarinos, cabeça de poço, árvore de natal molhada, conectores e linhas submarinas, equipamentos submarinos e facilidades de controle para operar os poços (BAI; BAI, 2010). A Figura 2.1 apresenta esquematicamente um sistema de produção submarino.



Figura 2.1. Desenho esquemático de um sistema de produção submarino.

Podemos classificar os equipamentos e estruturas em:

- Sistema de linhas e *Manifolds*;
- Sistema de perfuração submarina;
- Sistema de completação de poço;
- Sistema de acesso e intervenção de poço;
- Sistema de controle e gerenciamento de dados.

As seções a seguir explicam brevemente os sistemas mencionados anteriormente que possuem maior relevância para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de anomalias.

2.1.1. Sistema de linhas e Manifolds

Um *Manifold* submarino é uma estrutura que contém válvulas e tubulações projetada para coletar e direcionar os fluidos produzidos de múltiplos poços em uma ou mais linhas de exportação para a facilidade de processamento de superfície. Os *Manifolds* podem ser classificados quanto à sua aplicação:

- Manifold submarino de produção (MSP): Manifold que tem como principal objetivo coletar a produção de vários poços. Normalmente apresentam as funções conjugadas de distribuição de gás (gas lift) e produtos químicos.
- Manifold submarino de injeção de água (MSI): Manifold que tem o objetivo de distribuir água para os poços de injeção.
- Manifold submarino de injeção de água e gás (MSIAG): Manifold que tem o objetivo de distribuir água e gás para os poços de injeção.
- Manifold submarino de gas lift (MSGL): Manifold que tem como principal objetivo de distribuir gás para injeção no anular dos poços de produção ou diretamente no reservatório.
- Manifold submarino misto (MSPI): Manifold que tem simultaneamente as características do Manifold de Produção e de Injeção de Água.

Os *Manifolds* em geral possuem *headers* principais que coletam a produção de vários poços (MSP) ou direcionam os fluidos de injeção para diferentes linhas pontos de injeção (MSI). O módulo de *crossover* permite a comunicação entre os *headers* principais. Além de tubulações, os *Manifolds* podem acomodar instrumentação, válvulas gaveta e *chokes* (válvulas para regulagem de fluxo). Tipicamente os *Manifolds* são equipados com transdutores de pressão e temperatura e podem ou não ter módulos para medição de vazão monofásica ou multifásica.

2.1.2. Sistema de completação de poço

Os sistemas de completação de poço são basicamente compostos por cabeças de poço e árvore de natal molhada (ANM). Uma ANM é um equipamento instalado no fundo do mar que contém um conjunto de válvulas destinadas a controlar a produção de um poço (THOMAS, 2001). Durante intervenções a ANM permite acesso ao poço através da coluna de produção e do espaço anular (LIMA, 2007). Quando utilizadas em poços de injeção (de água ou gás) normalmente não há necessidade de interligação de um duto de serviço.

Uma ANM também possui um conjunto de linhas de fluxo e um sistema de controle interligado à unidade de superfície. A instrumentação típica de uma ANM contém transdutores de pressão e temperatura e em alguns casos medidores de vazão multifásica. Nos casos em que a ANM possui módulo de *choke*, esta é também dotada de indicadores de posição de abertura da *choke* bem como medições de pressão e temperatura à montante e à jusante da *choke*. A Figura 2.4 mostra um fluxograma típico de uma ANM de produção.



Figura 2.2. Fluxograma típico de uma árvore de natal molhada de produção.

2.1.3. Sistema de controle e gerenciamento de dados

O Sistema de controle e gerenciamento de dados tem por finalidade permitir o controle e monitoramento do SPS na unidade de processamento em superfície. Ele é constituído de módulos de eletrônica submarina, umbilicais e estação de controle em superfície.

O módulo de controle submarino (SCM, sigla em inglês para *Subsea Control Module*) responde a comandos multiplexados eletricamente, enviados a partir da superfície com o objetivo de acionar hidraulicamente funções dos equipamentos submarinos (atuadores, conectores e *chokes*), além do envio para superfície de informações diversas. Possui ainda sensores internos e interfaces para sensores externos (TPT na ANM, PDG na coluna de produção, medidores de vazão, etc.). Os sinais recebidos dos sensores são enviados à superfície em intervalos de tempos regulares, sendo assim possível a monitoração do SCM e certas informações sobre os equipamentos submarinos.

A arquitetura interna do SCM permite o acionamento de dezenas de funções hidráulicas submarinas através da pressurização de duas linhas hidráulicas, diferentemente do sistema hidráulico direto, que utiliza uma linha de suprimento hidráulico para cada função submarina. Devido a esta característica, o SCM é muitas vezes chamado módulo de controle multiplexado.

As suas alimentações hidráulicas e elétricas são redundantes e fornecidas a partir da superfície. O SCM possui dois sistemas eletrônicos, totalmente redundantes, denominadas SEM (*Subsea Electronic Module*). Um diagrama esquemático dos principais componentes de um SCM é mostrado na Figura 2.3.



Figura 2.3. Desenho esquemático de um módulo de controle submarino.

Resumidamente, a comunicação com o SCM é realizada por dois *modems* de comunicação independentes. O sinal de dados é sobreposto na alimentação elétrica e transmitido. No seu destino, ele é filtrado e o sinal desmodulado

em um sinal digital na estação de controle na superfície. A Figura 2.4 mostra o esquema típico de comunicação e transferência de dados em sistemas de produção e processamento submarino.



Figura 2.4. Desenho esquemático de um sistema de controle submarino.

Umbilical é um conjunto de tubulações, mangueiras e cabos, organizadamente distribuídos ao longo da seção transversal de uma carcaça cilíndrica protetora (Figura 2.5), cuja função é conduzir fluidos hidráulicos, produtos químicos, além de energia elétrica e sinais de controle e ópticos, da plataforma até os equipamentos posicionados no leito marinho. Os umbilicais permitem controlar e monitorar a operação dos poços de produção e injeção, a intervenção nos poços, a injeção de produtos químicos nos reservatórios e a alimentação elétrica do sistema submarino.



Figura 2.5. Esquemático de uma seção transversal típica de um umbilical de controle.

2.1.4. Arranjos Submarinos

Os diversos componentes e equipamentos podem ser interligados de diferentes maneiras. Nota-se que nem sempre todos os tipos de equipamentos descritos anteriormente são utilizados. Pelo contrário, vários fatores contribuem para a arquitetura dos arranjos submarinos. A definição do arranjo submarino é específica para cada campo, pois estes têm características próprias como vazão de produção e injeção, temperatura, pressão, composição dos fluidos produzidos, localização e etc. (LABANCA, 2005).

Os sistemas de produção submarinos possuem alguns aspectos particulares relacionados à inacessibilidade das instalações e dificuldade de operação e intervenção. Por isso, logística e facilidade de operação são fatores importantes da determinação a configuração final dos arranjos submarinos. Uma heurística bastante difundida é que o SPS deve ser tão simples quanto possível.

Tendo em vista a simplicidade é possível imaginar que uma configuração típica de arranjo submarino seja aquela que possui uma ANM para cada poço e cada uma delas ligadas diretamente à plataforma. Esse arranjo, chamado de árvores satélites, é apresentado na Figura 2.6.



Figura 2.6. Arranjo submarino com árvores satélites.

Apesar de simples, esse arranjo possui elevado número de linhas. Uma alternativa para redução do número de linhas é a inserção de um *manifold* submarino no qual vários poços são alinhados para uma ou duas linhas de exportação para plataforma. A Figura 2.7 mostra um esquema de arranjo com 4 ANMs ligadas a um *manifold* e com uma única linha de exportação.



Figura 2.7. Arranjo submarino com 4 ANMs, 1 *manifold* e 1 linha de exportação.

Alternativamente duas ou mais árvores também podem estar ligadas em série antes da conexão com a plataforma numa configuração chamada *piggy back* (LIMA, 2007). O mesmo tipo de configuração *piggy back* pode ser aplicado a *manifolds* submarinos como mostra a Figura 2.8.



Figura 2.8. Arranjo submarino mostrando 2 ANMs e 2 *manifolds* em configuração *piggy back*.

Enfim o arranjo submarino define os tipos e quantidades de equipamentos bem como instrumentação disponível em um SPS. Tais informações são essenciais para avaliar a adequação e configurar um método de detecção de vazamentos. Portanto, assim como a definição do próprio arranjo submarino, o projeto de sistemas de detecção de vazamentos em um SPS é específico para cada campo.

2.2. Escoamento Multifásico no contexto de SPS

A indústria do petróleo e gás faz uso de poços para extrair os fluidos produzidos (óleo, gás, água e areia) dos reservatórios subterrâneos até a superfície. A pressão reinante no reservatório poroso expulsa esses fluidos para a região do poço, num processo conhecido como recuperação. No entanto, para que a produção se concretize, é necessário trazer os fluidos produzidos à superfície, à cabeça do poço e, daí, encaminhálos até a estação de produção, em terra, ou até a Unidade Estacionária de Produção (UEP, termo que designa um navio de produção ou plataforma), no mar. Neste processo água, óleo, gás e areia escoam juntos até serem processados e estocados.

Em um reservatório de petróleo é possível que o gás esteja dissolvido na fase líquida. Entretanto, durante o escoamento até a superfície, o gás pode se desprender devido à redução de pressão no trajeto. Muitas vezes, em poços produtores de óleo (com gás dissolvido) injeta-se gás para permitir o escoamento ou elevar sua produtividade. Esta técnica de elevação artificial conhecida como *gas-lift* também provoca o escoamento multifásico em linhas de produção. Portanto nos SPS tipicamente se encontram escoamentos multifásicos.

2.2.1. Regimes de Escoamento Multifásico

O escoamento multifásico pode assumir diferentes configurações geométricas em função das vazões de fases, propriedades do duto e dos fluidos (BEGGS e BRILL, 1973; TAITEL e DUKLER, 1976). No caso de escoamento bifásico gás-líquido em dutos horizontais, o gás pode se apresentar em forma de pequenas bolhas dentro do líquido ou, por outro lado, fluir totalmente segregado no topo do duto (BRATLAND, 2010). Encontram-se na literatura diferentes mapas e classificações de regimes de escoamento. A Figura 2.9 apresenta um possível conjunto de regimes de escoamento bifásico em dutos horizontais.



Figura 2.9. Regimes de escoamento bifásico gás-líquido em dutos horizontais (adaptado de BRATLAND, 2010).

Os regimes de escoamento bifásico gás-líquido em dutos verticais são similares àqueles em dutos horizontais, entretanto nestes a gravidade está alinhada ao escoamento e portanto não há "parte baixa" do duto que o fluido mais denso prefira escoar. A Figura 2.10 apresenta os regimes de escoamento gás-líquido em dutos verticais.



Figura 2.10. Regimes de escoamento bifásico gás-líquido em dutos verticais (adaptado de BRATLAND, 2010).

É difícil ilustrar os regimes de escoamento trifásico gás-líquido-líquido de maneira análoga aos regimes de escoamento bifásicos apresentados na Figura 2.9 e Figura 2.10. Bratland (2010) apresenta um diagrama gráfico tridimensional semelhante aos diagramas ternários de composição. Cada vértice do tetraedro apresentado na Figura 2.11 representa um caso de escoamento monofásico, os planos que delimitam o tetraedro representam os regimes de escoamento bifásico e o interior do tetraedro contém os regimes de escoamento trifásico.



Figura 2.11. Regimes de escoamento trifásico gás-líquido-líquido em dutos horizontais (adaptado de BRATLAND, 2010).

2.2.2. Modelagem de Escoamento Multifásico em Dutos Submarinos

De acordo com Brennen (2005) existem três maneiras de modelar o escoamento multifásico:

- Experimentalmente, através de prototipagem em escala de laboratório devidamente instrumentado;
- Teoricamente, através de equações matemáticas e modelos para o escoamento multifásico;

• Computacionalmente, usando o poder computacional para desenvolver a complexidade do escoamento.

Certamente existem algumas aplicações nas quais modelos experimentais em escala laboratorial são perfeitamente factíveis. Entretanto cabe ressaltar que em todos os casos práticos é preciso algum conhecimento teórico e fenomenológico para extrapolar o modelo experimental (em escala de laboratório) para a escala real. Adicionalmente, em certas circunstancias é difícil ou mesmo impossível desenvolver um protótipo confiável que represente a característica complexa do escoamento em escala real. Consequentemente a capacidade preditiva e o conhecimento físico da maioria dos cenários de escoamento multifásico dependem fortemente dos modelos teóricos e computacionais disponíveis (BRENNEN, 2005).

Os modelos teóricos são derivados dos princípios de conservação de massa, momentum e energia desenvolvidos para cada fase (NUNES et al., 2010; BRENNEN, 2005; BRATLAND, 2010). Entretanto os termos que representam a troca (de massa, momentum e energia) entre fases são dificilmente modelados teoricamente. Na prática, equações de fechamento empíricas são necessárias.

É importante ressaltar que estas correlações empíricas normalmente são dependentes do regime de escoamento e vários outros parâmetros dos dutos. Consequentemente a correta definição do regime de escoamento é essencial para a modelagem. Portanto conclui-se que a modelagem do escoamento multifásico é uma tarefa extremamente complexa cuja descrição matemática foge ao escopo deste trabalho.

2.3. Monitoramento de Condição em SPS

Tradicionalmente as companhias produtoras de petróleo priorizavam o monitoramento da produção e não da condição dos equipamentos e linhas do SPS. O monitoramento da condição de equipamentos de superfície é comum (NYSTAD, 2008; BERGE, 2014). Entretanto a aplicação deste conceito em sistemas submarinos não é tão difundida.

Devido ao elevado custo de intervenção e manutenção em águas profundas, o monitoramento da condição em SPS recentemente tem ganhado relevância visando reduzir os custos operacionais (OPEX) da produção. Os principais objetivos do monitoramento da condição em SPS é maximizar a disponibilidade dos equipamentos e linhas e propor uma filosofia de manutenção e tomada de decisão baseada na condição real do campo. Em última análise, visa-se maximização da rentabilidade de todo SPS.

Conforme visto nas seções anteriores, o SPS é um arranjo complexo de muitos componentes no qual a falha de um componente pode deteriorar o desempenho de todo o sistema. Além do mais, em virtude da complexidade do sistema, rastrear o componente em falha pode ser uma tarefa complicada. Cabe ressaltar a dificuldade de acesso dos equipamentos submarinos: uma simples inspeção visual, operação ordinária em equipamentos de superfície, é altamente custosa ou até mesmo impossível ou impraticável.

Para ser capaz de comparar a condição de um SPS com diferentes tipos de equipamentos, com leituras de diferentes magnitudes e dimensões, usa-se um índice técnico de condição (TCI) adimensional. Um TCI é um valor entre 0 e 100% crescente em magnitude de condição, ou seja, um TCI 0% indica um componente em péssima condição. Por outro lado, um TCI 100% indica um componente em ótima condição.

Um TCI de um componente é calculado através de uma função de transferência que correlaciona diversas medições relevantes e características do componente (NYSTAD, 2008; ROALD, 2013). Por exemplo, o TCI de uma válvula *choke* pode ser expresso pela diferença entre o diferencial de pressão lido no campo e aquele esperado conforme folha de dados do equipamento (ROALD, 2013). Neste caso, as leituras de pressão à montante e à jusante da *choke*, a vazão de fluido e as características do equipamento (coeficiente de escoamento, por exemplo) são usadas para determinar o TCI do equipamento.

A Figura 2.12 mostra como genericamente a definição de um TCI hipotético a partir do desvio de pressão medida e de seu valor de referência. Como era de se esperar, o TCI 100% ocorre quando o desvio é nulo, ou seja, o valor medido é igual ao valor de referência. Na medida em que o desvio aumenta, o TCI diminui. Neste caso hipotético, definiu-se um TCI simétrico, porém isso não é necessariamente verdade.



Figura 2.12. Definição de um TCI hipotético.

Outro conceito importante utilizado para o monitoramento de SPS é o de agregação. Um sistema é composto de vários componentes, portanto é lógico imaginar que o TCI do sistema é uma função dos TCIs dos componentes. Uma regra de agregação define como o TCI de cada componente contribui para o TCI agregado do sistema. (NYSTAD, 2008; ROALD, 2013). Existem várias regras de agregação: média aritmética, média ponderada, valor máximo, valor mínimo, etc. A Figura 2.13 mostra que a agregação dos TCIs dos componentes origina um TCI do equipamento cuja agregação com TCI de outros equipamentos gera o TCI do sistema.



Figura 2.13. Representação esquemática de agregação de TCI.

2.4. Sistemas de Detecção de Vazamentos

Os sistemas de detecção de vazamentos podem ser classificados de diversas maneiras. Uma delas tem origem na norma API 1130 que classifica os sistemas de detecção de vazamento em internos e externos. Sistemas externos utilizam sensores e equipamentos exclusivos para detecção de vazamento, como por exemplo, sensores acústicos. Por outro lado, os sistemas internos se utilizam da instrumentação tipicamente disponível em redes de escoamento como, por exemplo, sensores de vazão, pressão e temperatura. Além destas duas classes, Cramer et al. (2015) propõem uma terceira classe chamada de testes periódicos. A

Tabela 2.1 apresenta alguns exemplos de sistemas de detecção de vazamentos.

Sistemas Internos	Sistemas Externos	Testes periódico
Monitoramento de pressão/vazão	Detectores de gás	Pigs instrumentados
Desvio de vazão	Câmera ótica	Pigs inteligentes
Modelagem transiente em tempo real	Sensores de fibra ótica	Pigs acústicos
Desvio estatístico	Biosensores	Inspeção por ROV
Desvio de vazão compensado	Sensores acústicos	Inspeção por mergulhadores

Tabela 2.1. Exemplos de sistemas de detecção de vazamentos.

2.4.1. Monitoramento de pressão/vazão

Um vazamento altera o perfil hidráulico do duto de modo que determinadas alterações das leituras de pressão ou vazão podem indicar ocorrência de vazamento. Portanto um método simples de detecção de vazamento é o monitoramento de perfis de pressão/vazão no duto.

Se a pressão interna de operação do duto é maior que a externa, quando ocorre um vazamento há perda de fluido para o ambiente. Neste caso é possível que a vazão de entrada cresça, enquanto a vazão de saída se reduz e a pressão no duto caia significativamente conforme esquematizado na Figura 2.14.



Figura 2.14. Respostas do perfil hidráulico de um duto com pressão positiva com vazamento.

Geralmente a ocorrência de vazamento altera significativamente a razão entre a vazão e a perda de carga no duto. Suportados pela equação de Bernoulli, Cramer et al. (2014) propuseram o monitoramento da razão entre o quadrado da vazão e a perda de carga como indicador para ocorrência de vazamentos. Assim eles definiram a regra de detecção apresentada na Eq. (2.1).

$$\hat{C}_{OV} = \left(\frac{\dot{Q}_i}{\Delta P}\right) - \overline{\left(\frac{\dot{Q}_i}{\Delta P}\right)} \begin{cases} > \gamma \Rightarrow Detecção \\ \le \gamma \Rightarrow Sem - Detecção \end{cases}$$
(2.1)

Wang et. at. (1993) também utilizaram um modelo auto-regressivo para detectar vazamentos em um loop experimental. Em seus experimentos, vazamentos de até 0.5% do diâmetro da linha puderam ser detectados através do monitoramento dos gradientes de pressão no início e no final do duto. A metodologia proposta por eles consiste na comparação da série temporal destes gradientes. Se os gradientes apresentares desvios significativos é uma indicação de vazamento. Apesar de não necessitar de medição de vazão, tal metodologia não se aplica em situações onde o gradiente de pressão não é constante, como por exemplo, em dutos com acidentes ou válvulas, dutos com diferentes inclinações ou ainda em escoamento multifásico não homogêneo.

2.4.2. Métodos de balanço de massa

Os métodos de balanço de massa são baseados no princípio de conservação de massa. Em estado estacionário, ao longo de um intervalo de tempo suficientemente grande, a massa que entra em um duto sem vazamentos é igual à quantidade de massa que sai do duto no mesmo intervalo de tempo. De modo geral, é possível aplicar o princípio de conservação de massa tomando-se por volume de controle o próprio duto de tal modo que a diferença de massa que entra e sai do duto é a variação do inventário dentro dele. Matematicamente podemos enunciar o balanço de massa através da Eq. (2.2).

$$\dot{M}_{i} - \dot{M}_{o} = \frac{dM_{pipe}}{dt}$$
(2.2)

Onde \dot{M}_i e \dot{M}_o são a vazão mássica que entra e sai do duto respectivamente e M_{pipe} é o inventário de fluido dentro do duto.

O inventário de massa dentro do duto pode ser calculado através da densidade média do fluido nas condições operacionais do duto (temperatura e pressão) de acordo com a Eq. (2.3).

$$M_{pipe} = \overline{\rho} V_{pipe}$$

$$\overline{\rho} = \frac{1}{L} \int_{0}^{L} \rho(x) dx$$
(2.3)

No qual L é o comprimento do duto e $\rho(x)$ é o perfil de densidade do fluido nas condições operacionais do duto. Todo resíduo da Eq. (2.3) é um indicativo de vazamento. A vazão perdida (\dot{M}_{leak}) durante um vazamento é dada pela Eq. (2.4).

$$\dot{M}_{leak} = \dot{M}_i - \dot{M}_o - \frac{dM_{pipe}}{dt}$$
(2.4)

Existem duas variações de sistemas de detecção de vazamento baseado em balanço de massa: o método de balanço de massa não compensado e compensado.

O método de balanço de massa não compensado pressupõe que não há variação de densidade ao longo do tempo. Tendo em vista que o volume do duto é constante, consequentemente não há acúmulo de fluido no interior do duto. Neste caso, como mostra a Eq. (2.5), a diferença entre a vazão que entra e que sai do duto é uma estimativa da vazão de vazamento (\hat{M}_{leak}).

$$\hat{\dot{M}}_{leak} = \dot{M}_i - \dot{M}_o$$
(2.5)

A regra de detecção, conforme apresentado na Eq. (2.6), se baseia em definir um valor limite (γ) para a estimativa de vazão de vazamento a partir do qual se acredita que há de fato algum vazamento.

$$\hat{\vec{M}}_{leak} = \dot{\vec{M}}_{i} - \dot{\vec{M}}_{o} \begin{cases} > \gamma \Rightarrow Detecção \\ \le \gamma \Rightarrow Sem - Detecção \end{cases}$$
(2.6)

Em alguns casos pode-se assumir que a densidade do fluido dentro do duto é constante e o balanço de massa simplifica para balanço de vazões volumétricas. A vantagem desta simplificação é que muitos medidores de vazão, de fato, são em base volumétrica. A regra de detecção é formulada como na Eq. (2.7).

$$\hat{\dot{Q}}_{leak} = \dot{Q}_i - \dot{Q}_o \begin{cases} > \gamma' \Longrightarrow Detecção \\ \le \gamma' \Longrightarrow Sem - Detecção \end{cases}$$
(2.7)

Cramer et al. (2014) propuseram uma variação do método de balanço de vazões volumétricas com o objetivo de reduzir a quantidade de falsos alarmes. Eles definiram um indicador (\hat{C}_{ov}) baseado na taxa de variação da vazão estimada de vazamento conforme Eq. (2.8). Assim como anteriormente, um vazamento é detectado quando esse indicador ultrapassa certo valor predefinido.
$$\hat{C}_{OV} = \left(\dot{Q}_{i} - \dot{Q}_{o}\right) - \overline{\left(\dot{Q}_{i} - \dot{Q}_{o}\right)} \begin{cases} > \gamma \Rightarrow Detecção \\ \le \gamma \Rightarrow Sem - Detecção \end{cases}$$
(2.8)

Onde $(\dot{Q}_i - \dot{Q}_o)$ representa a média temporal da diferença entre as vazões volumétricas de entrada e saída do duto.

Ao contrário do método de balanço de massa não compensado, o método de balanço de massa compensado leva em consideração o acúmulo de massa dentro do duto. Consequentemente a estimativa de vazão de vazamento e a regra de detecção são dadas pela Eq. (2.9).

$$\hat{\dot{M}}_{leak} = \dot{M}_{i} - \dot{M}_{o} - \frac{dM_{pipe}}{dt} \begin{cases} > \gamma \Longrightarrow Detecção \\ \le \gamma \Longrightarrow Sem - Detecção \end{cases}$$
(2.9)

O grande problema é o cômputo do acúmulo de massa dentro do duto. Uma possível solução consiste em usar informações do perfil de densidade do fluido no duto para estimar a variação do inventário de massa ao longo do tempo. Por sua vez, o perfil de densidade pode ser estimado através de leituras de pressão e temperatura ao longo do duto em conjunto com alguma equação de estado ou através de modelos de escoamento estacionários ou transientes.

2.4.3. Métodos estatísticos

Alguns sistemas de detecção de vazamentos usam métodos estatísticos para aprimorar a decisão sobre a detecção ou não de um vazamento. Esses métodos pressupõem que a função densidade de probabilidade das variáveis de escoamento e estacionária do ponto de vista estatístico (GEIGER, 2006). Por exemplo, a média e a variância da pressão não mudam com o tempo.

Um método estatístico de detecção de vazamento usa teste de hipóteses em conjunto com método de balanço de massa não compensado. Basicamente o método usa a série temporal das vazões para decidir entre duas hipóteses: H₀, não há vazamento ou H₁, há vazamento.

Normalmente assume-se distribuição normal para as medições de vazão e, portanto, as funções de densidade de probabilidade condicionais $p(\hat{M}_{leak}|H_0)$ para a hipótese de

não-vazamento e $p(\hat{M}_{leak}|H_1)$ para a hipótese de vazamento são conhecidas. Assim, considerando um teste de razão de verossimilhança, é possível estabelecer a regra de detecção apresentada na Eq. (2.10).

$$\Lambda\left(\hat{\dot{M}}_{leak}\right) = \frac{p\left(\hat{\dot{M}}_{leak} \middle| H_{1}\right)}{p\left(\hat{\dot{M}}_{leak} \middle| H_{0}\right)} \begin{cases} > \gamma \Longrightarrow H_{1} : Detecção \\ \le \gamma \Longrightarrow H_{0} : Sem - Detecção \end{cases}$$
(2.10)

O valor limite de detecção (γ) deve ser escolhido para satisfazer a algum critério estatístico como a probabilidade de falso alarme ou a probabilidade de falha de detecção.

Uma alternativa para reduzir o efeito de ruído e variações lentas de erros sistemáticos nas medições de vazão no método de balanço de massa não compensado é a utilização de um filtro passa-baixa no sinal de vazões. Entretanto essa estratégia não elimina efeitos transientes inerentes do escoamento. Isermann (2011) propõe utilizar a correlação estatística entre as medições de vazão na entrada e na saída do duto como indicador de vazamento. A ocorrência de um vazamento altera significativamente (positivamente ou negativamente) a função correlação e por isso a regra de detecção se baseia em definir um limite aceitável para variação da função correlação.

Silva et al. (2005) apresentaram um sistema interno de detecção de vazamentos em redes de transporte de petróleo aplicando um balanço de massa compensado no qual os valores limites de desvios para a detecção são ajustados por lógica difusa. O método usa técnicas de inteligência artificial para identificar transientes operacionais na rede e evitar falsos alarmes.

Técnicas estatísticas de processamento de sinais podem ser aplicadas diretamente à série temporal das variáveis medidas em uma rede de escoamento. Gamboa-Medina et al. (2014) apresentaram uma metodologia baseada no cálculo de propriedades dos sinais como energia e entropia e na posterior classificação dos sinais em classes com ou sem vazamento.

Muitos métodos de detecção de mudanças abruptas podem ser utilizados para detecção de vazamentos. Entende-se por mudança abrupta aquelas que ocorrem instantaneamente ou são rápidas em comparação com o tempo de amostragem do processo. É importante ressaltar que abrupta não implica em grande magnitude. De fato, é de interesse a detecção de pequenas mudanças (BASSEVILLE e NIKIFOROV, 1993). Algumas mudanças lentas podem ser comparáveis a sucessivos eventos de mudanças abruptas de pequena magnitude. Neste caso é de interesse detectar o início do evento lento ou gradual.

Algumas ferramentas de controle estatístico de qualidade como as cartas de controle de Shewhart e CUSUM também são aplicados em sistemas de detecção de vazamentos. Estas ferramentas são descritas em detalhes por NIST/SEMATECH ou Basseville e Nikiforov (1993). Coronado et al. (2013) apresentaram o método de detecção de vazamento instalado no campo de Ormen Lange, no Mar do Norte (Noruega), que utiliza tais ferramentas e que foi capaz de detectar um vazamento numa linha de gás mesmo com um medidas de pressão e vazão bastante ruidosas.

É interessante notar que Coronado et al. (2013) propuseram utilizar uma carta de controle de Shewhart e o CUMSUM simultaneamente e de maneira complementar. O primeiro é mais adequado para grandes vazamentos e tem menor incidência de falsos alarmes. Por outro lado utilizaram o CUMSUM para detecção rápida de pequenos vazamentos. A utilização de mais de um método é intuitiva, uma vez que nenhum método individualmente é ideal para todos os casos.

2.4.4. Modelagem transiente em tempo real

A Modelagem Transiente em Tempo Real (MTTR) do escoamento permite calcular, a cada instante de tempo, todas as propriedades relevantes para detecção de vazamento como perfis de vazão, pressão, temperatura e densidade. Métodos MTTR podem ser de dois tipos principais: (i) Modelagem Transiente Fenomenológica em Tempo Real (MTFTR); e (ii) Modelagem Transiente Estocástica em Tempo Real (MTETR).

O primeiro, MTFTR, utiliza um conjunto completo de equações de base fenomenológica – balanços transientes, espacialmente distribuídos, de massa, energia e momentum – que são dependentes de propriedades termodinâmicas e de transporte relevantes (viscosidades, densidades, capacidades caloríficas, velocidade do som, entalpias, fatores de atrito, coeficientes de transferência de calor, etc) para prever todas as variáveis de estado do sistema (distribuições espaciais de vazões, pressões e temperaturas) ao longo do tempo. Sem sombra de dúvida, métodos MTFTR são particularmente consumidores de alto esforço computacional e sua implementação tem de ser especialmente eficiente em termos computacionais para que a MTFTR possa realmente operar em tempo real.

Já MTETR utiliza modelos estocásticos – também chamados do tipo caixa-preta – configurados em *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) para prever valores instantâneos de variáveis de estado localizadas em determinados pontos do sistema. Não há nenhum princípio de base física atuando e também não há distribuições espaciais de variáveis e sim valores preditos discretos (pressões e vazões em determinados pontos da rede).

A diferença crucial de MTFTR e MTETR é que, por carecer de base física analítica, métodos MTETR necessitam de sessões de treinamento (calibração) periodicamente. O espaço de tempo entre duas sessões de treinamento consecutivas de MTETR corresponde a uma sessão de vigilância na qual o modelo MTETR (detector) está operando em modo de monitoração do sistema (modo de detecção). Normalmente as sessões de vigilância são muito mais longas que as de treinamento (Vaz Júnior et al., 2010).

Devido às dificuldades de implementação de forma eficiente e rápida da MTFTR, alguns métodos de detecção de vazamento são desenvolvidos utilizando-se modelos estocásticos ou caixa-preta (MTETR). Incluem-se no grupo MTETR os métodos que utilizam modelos auto-regressivos com séries temporais e modelos baseados em redes neurais. Como já dito, na categoria MTETR geralmente uma estrutura de modelo preditor MIMO é calibrada periodicamente com séries temporais de dados reais de campo e posta para prever os comportamentos de variáveis do escoamento em questão. Valores preditos (um instante adiante) são comparados com valores amostrados de respostas do sistema de modo a identificar falhas, anormalidades ou vazamentos quando discrepâncias estatisticamente significativas são identificadas em uma ou mais respostas acompanhadas.

Seja qual for a estratégia MTTR usada, a regra de detecção é baseada na diferença entre valores (de pressão ou vazão) preditos pelos modelos e aqueles medidos fisicamente no duto monitorado. Como descrito anteriormente, é possível usar métodos estatísticos para aprimorar a tomada de decisão quanto à presença ou não de um vazamento.

Vários métodos de detecção de vazamento são baseados em modelos fenomenológicos MTFTR do escoamento do duto monitorado (MIRATS-TUR et al.,

2014; SUM E CHANG, 2014). Nesta linha, Kam (2009) desenvolveu um modelo para dutos multifásicos submarinos horizontais em situação de vazamento com vazão de entrada fixa. Com este modelo, Kam (2009) mostrou que o monitoramento da vazão de saída é mais confiável que o monitoramento da pressão de entrada do duto em termos de desempenho de detecção de vazamentos. Também concluiu que a detecção é mais fácil em vazamentos maiores e mais próximos à entrada do duto.

Diferente da maioria de sistemas baseados em MTTR, nos quais a rede de dutos é modelada sem vazamentos e o desvio entre as medições e as predições MTTR são um indicativo de vazamento, a metodologia descrita por Sala e Kolakowski (2014), estima a vazão de vazamento em uma rede de distribuição de água através de ajuste de parâmetros de um modelo MTFTR do sistema com vazamento para representar mais fielmente possível os dados medidos em tempo real. De fato, a vazão de vazamento é reconciliada de modo que as respostas do modelo semi-empírico se ajustem aos dados medidos.

Molina-Espinoza et al. (2013) validaram experimentalmente um modelo mecanicista MTFTR de escoamento monofásico em dutos curtos com vazamento. Tal modelo foi empregado para em experimentos com dutos de 1 m e 10 m de comprimento. Diferentes métodos de discretização e condições de contorno foram avaliados. Por fim, foi possível mostrar a importância de cada termo do equacionamento na correta previsão do perfil de pressão ao longo do duto.

Isermann (2011) apresenta uma coletânea de métodos de detecção e identificação de falhas em diferentes contextos como no monitoramento de atuadores e motores elétricos, diagnóstico de falhas em bombas centrífugas e detecção de vazamento em dutos. Ele deriva um método de detecção de vazamento a partir de observadores de estado construídos via modelagem fenomenológica (MTFTR) do escoamento de gás ou líquido.

No contexto MTETR, Vaidyanathan e Venkatasubramamanian (1992) estudaram a aplicação de redes neurais para detecção de falhas em processos químicos durante transientes causadas por estas falhas. Também foi testado o uso de média móvel sobre os dados de processo que alimentam a rede neural durante o treinamento. A eficiência da rede treinada com dados tratados com a média móvel foi tão boa quanto àquela que foi treinada com os dados brutos. A série de dados alimentada para a rede neural consiste das 3 últimas leituras dos sensores disponíveis e da leitura atual. O número de

leituras passadas a ser utilizada foi escolhido baseado em tentativa e erro. Foi possível diagnosticar falhas num curto período de tempo após o início da falha.

Também no contexto MTETR, Abdulla e Herzalla (2015) também utilizaram com sucesso redes neurais associadas a técnicas de inteligência artificial para detecção de vazamento em um aparato experimental. É interessante notar que, assim como nos frequentemente ocorre nos SPS, tal aparato dispõe apenas de duas leituras de pressão e uma medição de vazão na descarga do duto.

Reddy et al. (2011a) desenvolveram um método MTFTR de detecção de vazamento em redes de gás baseado em simulação em tempo real da rede com monitoração estatística dos dados de sensores através de testes de hipóteses. O modelo fenomenológico (MTFTR) empregado na simulação da rede isenta de vazamentos considera a compressibilidade de gás real, fator de atrito e escoamento subsônico. A detecção ocorre quando os dados monitorados não se enquadram no modelo proposto. Este método de detecção de vazamento mostrou-se satisfatório quando testado em escala laboratorial com ar comprimido e em larga escala (REDDY et al.,2011b).

Vaz Junior et al. (2010) aplicaram metodologias MTETR para tratamento de séries temporais de dados de processo visando detectar diferentes falhas em dutos. As falhas podem ser em sensores (erros de leituras) ou no próprio duto (vazamento). Dentre os métodos MTETR empregados destaca-se a utilização de preditores ARX-MIMO (*Auto-Regressive with eXtra input*) para identificar o processo e detectar eventuais falhas e vazamentos. A detecção é caracterizada quando há divergência entre as respostas preditas pelo detector ARX-MIMO e as amostragens de processo em tempo real. Foram testadas diversas ordens no preditor ARX-MIMO e diversos padrões de duração da janela de treinamento (calibração) versus duração da janela de vigilância na qual o preditor ARX (de um instante adiante) é colocado em modo de detecção acompanhando a evolução do processo.

No trabalho MTETR de Vaz Junior et al. (2010) redes de escoamento generalizadas – com ou sem ciclos – foram modeladas com escoamento de líquidos incompressíveis em contexto pseudo-estacionário para testar o desempenho de preditores ARX-MIMO (detector) de diversas ordens contra cenários de vazamentos simples ou múltiplos concomitantes com instrumentação limitada. Os testes realizados via simulação numérica mostram um ótimo desempenho do preditor ARX-MIMO para detectar vazamentos. O trabalho de Vaz Junior et al. (2010) também implementou, além da ferramenta ARX-MIMO de detecção – ou seja, o Detector – outra ferramenta ARX-MIMO-DUAL – ou seja, o Localizador – para localizar e quantificar o vazamento detectado anteriormente pelo Detector. Ou seja, Vaz Junior et al. (2010) apresentaram na verdade um conjunto de recursos ARX-MIMO em séries temporais para detecção e subsequente localização-quantificação de vazamentos em redes de escoamento generalizadas com fluido incompressível. Em termos de treinamento, a diferença entre o Detector e o Localizador é que o primeiro é treinado com séries temporais do processo operando em condição hígida (sem vazamento) sendo assim o Detector capaz de detectar a chegada de um novo padrão associado à rede com vazamento, enquanto o segundo é treinado com múltiplas situações de redes danificadas sob ação de vazamentos simples ou concomitantes, com posição e calibre diversos, de modo a criar "base de conhecimento" acerca da resposta do sistema sob a ação de danos (Vaz Júnior et al., 2010).

2.5. Características de instrumentação

No caso dos sistemas internos para detecção de vazamentos detalhado nas próximas seções, a instrumentação disponível normalmente é:

- Medidores de vazão;
- Sensores de pressão;
- Sensores de temperatura.

A incerteza associada à instrumentação certamente afeta o desempenho dos sistemas internos de detecção de vazamento. Portanto a limite de detecção de um sistema interno é limitado pela acurácia e incerteza da instrumentação por ele utilizada. A API 1149 descreve uma maneira de se avaliar quantitativamente este impacto, porém este tema foge ao escopo do presente trabalho.

O desempenho de um sistema de medição pode ser avaliado através de dois parâmetros: acurácia e repetibilidade.

Acurácia é o grau de precisão da medida, ou seja, o quão próximo do valor real o instrumento de medição pode medir. Para a maioria dos sistemas de medição, a acurácia pode ser especificada pela declaração da máxima magnitude do erro absoluto de medição aceitável. Por outro lado, a acurácia também pode ser especificada pelo erro

relativo a um determinado valor de referencia. É usual adotar o valor de referência como sendo o range de medição (valor máximo-valor mínimo).

A repetibilidade, no contexto de sistemas de medição, é o grau de concordância entre medições independentes obtidas com o mesmo sistema de medição sob mesmas condições (por exemplo mesmo escoamento e condições ambientais). Frequentemente a repetibilidade de um sistema de medição é especificado pelo máximo valor de desvio absoluto entre duas medições sucessivas obtidas sob mesmas condições operacionais. Fica claro que repetibilidade não implica em acurácia. Por outro lado, acurácia implica em repetibilidade.

2.5.1. Medidores de vazão monofásica

Geralmente os medidores de vazão são os instrumentos que fornecem as medições de maior relevância para os sistemas de detecção de vazamento. Existem diferentes tipos de medidores usados em linhas e equipamentos:

- Placa de orifício (pressão diferencial);
- Medidores tipo turbina;
- Medidores de deslocamento positivo;
- Medidores Coriolis;
- Medidores ultrassônicos.

Os medidores mais usuais são aqueles de placa de orifício; um tipo de medidor por diferencial de pressão. Apesar de esses medidores serem muito comuns em aplicações industriais, como em redes de gás natural, seu uso como instrumento acurado em método de detecção de vazamentos é questionável. A incerteza do coeficiente de descarga de um medidor de placa de orifício bem instalado é da ordem de 0.5% Além disso, o diferencial de pressão através da placa de orifício é proporcional não somente à vazão, mas também à densidade do fluido passando por ele. Assumir uma densidade constante (como é frequentemente utilizado) não é suficientemente acurado para aplicações em sistemas de detecção de vazamento. A incerteza total, levando em consideração todas as medições secundárias, é em muitos casos aproximadamente 3-5%.

Os medidores tipo turbina são dispositivos dotados de um rotor que mede a velocidade do fluido passando através dele. A transferência de momentum exercida pelo

fluido no rotor faz com que este gire a uma velocidade angular proporcional, primordialmente, à vazão volumétrica. Outros fatores como perdas por fricção podem impactar a medição. A incerteza total teórica em medidores tipo turbina usados para medição fiscal é próxima de 0.25%, porém na prática valores abaixo de 0.1% são alcançados. A Figura 2.15 mostra um medidor tipo turbina.



Figura 2.15. Medidor tipo turbina.

Medidores Coriolis possuem uma incerteza de no mínimo 0.5%. Este tipo de medidor possui a vantagem de medir diretamente a vazão mássica, o que significa que não são necessárias medições adicionais de temperatura e pressão nem uso de equações de estado para estimar a densidade do fluido. Os medidores Coriolis podem ser aplicados para gás ou líquido e são relativamente independentes da viscosidade. Uma desvantagem é que fica difícil verificar (calibrar) o desempenho do medidor Coriolis, pois a referência é normalmente obtida em base volumétrica.

2.5.2. Medidores de vazão multifásica

Em sistemas de produção submarina é praticamente certa a presença de escoamento multifásico (óleo, água e gás). Os medidores de vazão monofásica apresentados na seção anterior não são apropriados nos casos de fluidos multifásicos.

2.6. Análise de Séries Temporais

O objetivo desta seção é fornecer ao leitor uma base teórica para entendimento do algoritmo de detecção de vazamentos utilizado neste trabalho que é baseado em detectores ARX-MIMO propostos originalmente no método de Vaz Júnior et al. (2010). A nomenclatura utilizada neste trabalho segue aquela proposta por Ljung (1999).

A análise de séries temporais consiste na identificação de modelos de sistemas dinâmicos desconhecidos ou de difícil modelagem fenomenológica através da observação de dados representativos do sistema. O modelo resultante deve ser capaz de predizer o comportamento do sistema frente a perturbações conhecidas, de tal modo que as respostas dos modelos identificados sejam os mais próximos possíveis da resposta do sistema real.

Genericamente, um sistema dinâmico interage com diferentes sinais de entrada U, produzindo sinais de resposta Y. É possível que o sistema seja perturbado por perturbações medidas W e não-medidas V. A Figura 2.16 mostra esquematicamente a definição de um sistema dinâmico.



Figura 2.16. Diagrama esquemático de sistema dinâmico.

2.6.1. Sistemas lineares invariantes no tempo

Um sistema é dito invariante no tempo se sua resposta a um determinado sinal de entrada não depende do valor absoluto do tempo. O sistema é linear se sua resposta a uma combinação linear de sinais de entrada é a mesma combinação linear de respostas aos sinais de entrada individuais. Adicionalmente, o sistema é dito causal se sua resposta em dado instante depende apenas dos sinais de entrada até este instante.

Considere um sistema com um sinal de entrada escalar u(t) e um sinal de resposta também escalar y(t). Sabe-se que, para qualquer sinal de entrada, a resposta de um sistema linear, invariante no tempo e causal pode ser descrita pela Eq. (2.11), onde g é a resposta do sistema à função impulso unitário. Portanto a função g permite uma caracterização completa do sistema.

$$y(t) = \int_{0}^{\infty} g(\theta)u(t-\theta)d\theta$$
(2.11)

Os sistemas de aquisição de dados de processos frequentemente operam com uma frequência regular definida de amostragem, portanto os valores dos sinais de entrada e resposta somente são conhecidos nos instantes de amostragem (Δt). Considerando que o tempo entre duas amostragens consecutivas é muito curto, ou seja, que a frequência de amostragem é razoavelmente alta, pode-se admitir que o valor dos sinais permanece constante entre amostragens consecutivas. O valor do sinal de entrada é, portanto, descrito pela Eq. (2.12).

$$u(t=k) = u_k \forall t \in [k\Delta t, k\Delta t + \Delta t)$$
(2.12)

De forma análoga o sinal de entrada também é constante por intervalo. Note que t passa a ser um índice de instante de tempo. Substituindo-se (2.12) em (2.11) obtém-se a resposta para o sinal digital conforme a Eq. (2.13).

$$y(t) = \sum_{k=0}^{t-1} \int_{k\Delta t}^{k\Delta t+\Delta t} g(\theta) u(t\Delta t - \theta) d\theta$$
(2.13)

A Eq. (2.13) implicitamente adota a convenção que os sinais de entrada e saída são nulos para todo instante anterior à origem da marcação de tempo, ou seja, $u(t) = 0 \forall t < 0$ e $y(t) = 0 \forall t < 0$.

Como u(t) é constante por intervalos a Eq. (2.13) pode ser escrita conforme a Eq. (2.14).

$$y(t) = \sum_{k=0}^{t-1} u((t-k+1)\Delta t) \int_{k\Delta t}^{k\Delta t+\Delta t} g(\theta) d\theta$$
(2.14)

Fazendo a mudança de índices, l = k + 1, a Eq. (2.14) é reescrita na forma da Eq. (2.15).

$$y(t) = \sum_{k=l}^{t} u((t-l)\Delta t) \int_{(l-1)\Delta t}^{l\Delta t} g(\theta) d\theta$$
(2.15)

Para evitar sobrecarregamento da notação, daqui em diante omite-se o intervalo de amostragem Δt no argumento das séries (sequências). Assim, o valor do sinal de entrada no instante $t\Delta t$ será denotado por u(t). Portanto, usando esta notação escreve-se o sinal de resposta pela Eq. (2.16).

$$y(t) = \sum_{k=l}^{t} u(t-l) \int_{(l-1)\Delta t}^{l\Delta t} g(\theta) d\theta$$
(2.16)

Adicionalmente, é conveniente definir-se uma notação compacta para a integral da Eq. (2.16). Tal notação é definida pela Eq. (2.17).

$$g(l) = \int_{(l-1)\Delta t}^{l\Delta t} g(\theta) d\theta$$
(2.17)

Substituindo-se (2.17) em (2.16) obtém-se a forma compacta do sinal de resposta y(t) conforme a Eq. (2.18).

$$y(t) = \sum_{k=1}^{t} g(l)u(t-l)$$
(2.18)

Vale ressaltar que o limite superior do somatório da Eq. (2.18) pode ser substituído por infinito, pois $u(t) = 0 \forall t < 0$.

É interessante introduzir o conceito de operador de transferência discreto, para isso define-se o operador de deslocamento $q(\cdot)$ pela Eq. (2.19). O operador $q(\cdot)$ atua sobre uma série temporal (sequência) deslocando o índice do elemento sobre o qual opera. A n-ésima potência deste operador é definida de maneira análoga, deslocando-se n unidades do índice do elemento sobre qual atua.

$$q(u(t)) = u(t+1)$$
 (2.19)

A Eq. (2.20) é obtida substituindo-se (2.19) em (2.18).

$$y(t) = \sum_{k=l}^{\infty} g(l)q^{-l}(u(t))$$
(2.20)

Com isso, define-se o operador de transferência discreto G(q) pela Eq. (2.21), de modo que y(t) = G(q)u(t).

$$G(q) = \sum_{k=l}^{\infty} g(l)q^{-l}(\cdot)$$
(2.21)

Dado um sinal de entrada u(t), a Eq. (2.20) é capaz de informar qual é a saída exata do sistema. De fato, na maioria dos casos reais, isto não é verdade, pois todo sistema está sujeito a interferências medidas ou não que afetam aleatoriamente a resposta do sistema. Pode-se dizer que a Eq. (2.20) é uma versão não perturbada do sistema.

Com intuito de representar fidedignamente o sistema dinâmico real é necessário modelar a perturbação do sistema. Neste trabalho adota-se uma função perturbação linear e aditiva ao sinal de saída conforme mostra a Figura 2.17.



Figura 2.17. Diagrama esquemático de sistema dinâmico perturbado.

A resposta perturbada pode ser descrita pela Eq. (2.22).

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t)$$
 (2.22)

O valor da perturbação não é conhecido de antemão, porém informações sobre valores passados pode contribuir para uma boa estimativa to valor atual. O modelo proposto para a função perturbação v(t) apresentado na Eq. (2.23) é composto por uma sequência numérica e uma variável aleatória (ruído branco).

$$v(t) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) e(t-k)$$
(2.23)

Uma completa definição da função perturbação deve caracterizar estatisticamente o ruído branco, ou seja, deve especificar a função densidade de probabilidade da variável aleatória e(t). Por exemplo, uma possível caracterização do ruído branco é dizer que ele segue uma distribuição normal com média nula e dada variância, $e \rightarrow N(0, \lambda)$.

Utilizando-se a mesma notação de operador de transferência, a Eq. (2.23) pode ser reescrita conforme Eq. (2.24).

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t)$$
(2.24)

2.6.2. Identificação do modelo

Um modelo é caracterizado pela definição das funções de transferência G e H e da função densidade de probabilidade do ruído branco. As Eqs. (2.20) e (2.23) mostram que são necessárias sequências infinitas $\{g(l)\}$ e $\{h(k)\}$ para caracterizar o sistema dinâmico. Entretanto de maneira prática escolhe-se trabalhar com estruturas que permitam definições de um número finito de parâmetros para definição do modelo.

É comum representar o sistema através de funções de transferências racionais. Uma maneira simples de representar a o sistema é através da Eq. (2.25).

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) + e(t)$$
(2.25)

É possível organizar a Eq. (2.25) conforme a Eq. (2.26) de modo a relacionar a mesma com o modelo proposto na Eq. (2.24).

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$$

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m}$$
(2.26)

Portanto a Eq. (2.26) mostra que $G(q) = \frac{B(q)}{A(q)}$ e $H(q) = \frac{1}{A(q)}$.

O filtro A(q) opera sobre a série histórica do sinal de saída, por isso é dita autoregressivo. Por outro lado o filtro B(q) opera sobre um sinal de entrada por isso esta estrutura é conhecida por ARX (*auto-regressive extra-input*).

Analogamente existe uma série de modelos baseados em funções de transferência racionais como a estrutura ARX. A Eq. (2.27) mostra uma estrutura generalizada para tais modelos.

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$
(2.27)

A definição dos filtros da Eq. (2.27) descreve vários modelos particulares conforme mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Definições de filtros polinomiais para estruturas conhecidas.

Filtros utilizados	Nome da estrutura
В	FIR
AB	ARX
ABC	ARMAX
AC	ARMA
BF	OE
BFCD	BJ

Os parâmetros dos modelos são os coeficientes dos filtros polinomiais utilizados. Frequentemente não é possível determinar estes coeficientes com base no conhecimento fenomenológico do sistema (equações de balanço). Ao contrário eles entram no modelo como parâmetros a ser ajustados com base em um conjunto representativo de dados do sistema. Este procedimento é conhecido como *identificação do modelo*.

O modelo parametrizado da estrutura ARX-SISO é apresentado na Eq. (2.28).

$$y(t) = \varphi^{t}(t)\theta$$

$$\theta = \begin{bmatrix} a_{1} & a_{2} & \dots & a_{n} & b_{1} & \dots & b_{m} \end{bmatrix}^{t}$$

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} -y(t-1) & -y(t-2) & \dots & -y(t-n) & u(t-1) & \dots & u(t-m) \end{bmatrix}^{t}$$

(2.28)

Portanto a estrutura ARX possui um modelo linear nos parâmetros θ . As seguintes condições são consideradas para identificação:

- i. Amostragens de $\varphi(t)$ são estatisticamente independentes;
- ii. Modelo ARX é correto;
- iii. Valores das realizações $\varphi(t)$ são corretos;
- iv. Valores amostrados tem distribuição normal com esperança igual ao valor correto e variância λ conhecida.

Os parâmetros são ajustados com base no princípio da máxima verossimilhança resultando na Eq. (2.29).

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} \Phi^{t}W\Phi \end{bmatrix}^{-1} \Phi^{t}WY$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi^{t}(1) \\ \vdots \\ \varphi^{t}(N) \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} \lambda_{1} & 0 \\ & \ddots \\ 0 & & \lambda_{N} \end{bmatrix}$$
(2.29)

É possível demonstrar que o estimador $\hat{\theta}$ é não-tendencioso e coerente.

2.6.3. Predição da resposta do sistema

Nesta seção desenvolve-se uma metodologia para prever valores futuros da resposta de um sistema baseado em seu modelo e nas séries temporais de sinais de entradas, respostas e perturbações.

Supõe-se que estão disponíveis as séries temporais dos sinais de entrada u(s) e resposta y(s) para $s \le t-1$. Isto implica que a perturbação v(s) também é conhecida. Objetiva-se predizer o valor da resposta y(t) com base nestas informações.

Como a resposta descrita pela Eq. (2.24) possui uma componente aleatória (ruído branco), tudo o que se pode dizer é que a probabilidade condicional do valor y(t) estar entre $x e x + \Delta x$ dados informações u(s) e y(s) para $s \le t-1$ é definido pela PDF do ruído branco. Neste trabalho utiliza-se o valor médio da PDF como estimativa para predição do valor da resposta. Esta estimativa, conhecida como esperança condicional de y(t) é denotada por $\hat{y}(t|t-1)$. Uma vez que o ruído branco por definição possui média nula, a esperança condicional de y(t) é dada pela Eq. (2.30).

$$\hat{y}(t|t-1) = H^{-1}(q)G(q)u(t) + [1 - H^{-1}(q)]y(t)$$
(2.30)

Os limites do intervalo de confiança com α para valores corretos da resposta predita são dados pelas Eqs. (2.31).

$$y_{U} = \hat{y}(t|t-1) + T_{1-\alpha/2}\sqrt{\Phi COV(\theta)\Phi^{t}}$$

$$y_{L} = \hat{y}(t|t-1) - T_{1-\alpha/2}\sqrt{\Phi COV(\theta)\Phi^{t}}$$
(2.31)

3. Metodologia

Este capítulo primeiramente descreve o algoritmo de detecção utilizado neste trabalho. Este algoritmo é uma implementação do método original de Vaz Júnior et al. (2010) baseado em preditores estocásticos ARX-MIMO, porém aqui é implementado com foco no contexto de sistemas *subsea* de escoamento multifásico. Em sequência são detalhados os experimentos e simulações realizadas para testar o método de detecção.

3.1. Algoritmo de Detecção

O algoritmo opera em duas fases consecutivas: (i) calibração ou treinamento do preditor ARX-MIMO de detecção; e (ii) modo de vigilância ou monitoramento (modo de detecção). Na fase de calibração, os parâmetros do modelo são ajustados para que suas respostas (predições) sejam fidedignas ao comportamento do sistema isento de vazamento. Na fase subsequente de monitoramento utiliza-se o preditor ARX-MIMO previamente calibrado para confrontar as medições disponíveis com a resposta predita pelo modelo.

A estrutura ARX-MIMO para detecção de vazamentos com sinal de entrada (U) com *nu* componentes e sinal de resposta (Y) com *ny* componentes. Assim, a estrutura em forma matricial é dada pela Eq. (3.1).

$$\underline{Y}(t) + \underline{\underline{A}}_{\underline{I}}\underline{Y}(t-1) + \dots + \underline{\underline{A}}_{\underline{n}}\underline{Y}(t-n) = \underline{\underline{B}}_{\underline{I}}\underline{U}(t-1) + \dots + \underline{\underline{B}}_{\underline{m}}\underline{U}(t-m)$$
(3.1)

Onde $\underline{Y}(t) = \begin{bmatrix} y_1 & \cdots & y_{ny} \end{bmatrix}^t$ é o sinal de resposta, $\underline{U}(t) = \begin{bmatrix} u_1 & \cdots & u_{nu} \end{bmatrix}^t$ é o sinal de entrada, as matrizes $\underline{A}_{1...n}$ são os parâmetros do filtro AR e as matrizes $\underline{B}_{1...m}$ são os parâmetros do filtro X.

É possível parametrizar a estrutura ARX-MIMO de modo que a Eq. (3.1) pode ser reescrita em forma compacta pela Eq. (3.2).

$$\underline{\underline{Y}}(t) = \underline{\underline{\theta}}^{t} \underline{\underline{\Phi}}(t)$$

$$\underline{\underline{\theta}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{A}}_{1} & \underline{\underline{A}}_{2} & \dots & \underline{\underline{A}}_{n} & \underline{\underline{B}}_{1} & \dots & \underline{\underline{B}}_{m} \end{bmatrix}^{t}$$

$$\underline{\underline{\phi}}(t) = \begin{bmatrix} -\underline{\underline{Y}}(t-1) & -\underline{\underline{Y}}(t-2) & \dots & -\underline{\underline{Y}}(t-n) & \underline{\underline{U}}(t-1) & \dots & \underline{\underline{U}}(t-m) \end{bmatrix}^{t}$$
(3.2)

53

A primeira etapa do algoritmo consiste na escolha adequada das variáveis a serem tratadas como sinal de entrada (U) e aquelas tomadas por sinal de resposta (Y). Como explicado na Seção 2.6., é necessária uma prévia calibração dos filtros da estrutura ARX via identificação do sistema monitorado. Para tal, é necessária uma série temporal dos sinais de entrada (SU) e resposta (SY) com o sistema seguramente isento de vazamentos no formato descrito nas Eqs. (3.13) e (3.14).

$$\underline{\underline{SY}} = \begin{bmatrix} y_1(1) & y_2(1) & \cdots & y_{ny}(1) \\ y_1(t+1) & y_2(t+1) & \cdots & y_{ny}(t+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1(t+N) & y_2(t+N) & \cdots & y_{ny}(t+N) \end{bmatrix}$$
(3.3)
$$\underline{\underline{SU}} = \begin{bmatrix} u_1(1) & u_2(1) & \cdots & u_{ny}(1) \\ u_1(t+1) & u_2(t+1) & \cdots & u_{ny}(t+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1(t+N) & u_2(t+N) & \cdots & u_{ny}(t+N) \end{bmatrix}$$
(3.4)

A calibração dos filtros da estrutura ARX, em outras palavras, a identificação do modelo, é matematicamente expressa por um problema de regressão linear no qual os regressores estão definidos nas Eqs. (3.5) a (3.7) e a variável dependente é o próprio sinal de resposta do sistema.

$$\underline{\Phi}_{Y} = \begin{bmatrix} -y_{1}(t-1) & \cdots & -y_{ny}(t-1) & \cdots & -y_{1}(t-n) & \cdots & -y_{ny}(t-n) \\ -y_{1}(t-1+1) & \cdots & -y_{ny}(t-1+1) & \cdots & -y_{1}(t-n+1) & \cdots & -y_{ny}(t-n+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -y_{1}(t-1+N) & \cdots & -y_{ny}(t-1+N) & \cdots & -y_{1}(t-n+N) & \cdots & -y_{ny}(t-n+N) \end{bmatrix}$$
(3.5)

$$\underline{\Phi}_{U} = \begin{bmatrix} u_{1}(t-1) & \cdots & u_{nu}(t-1) & \cdots & u_{1}(t-m) & \cdots & u_{nu}(t-m) \\ u_{1}(t-1+1) & \cdots & u_{nu}(t-1+1) & \cdots & u_{1}(t-m+1) & \cdots & u_{nu}(t-m+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{1}(t-1+N) & \cdots & u_{nu}(t-1+N) & \cdots & u_{1}(t-m+N) & \cdots & u_{nu}(t-m+N) \end{bmatrix}$$
(3.6)

$$\underline{\Phi} = \begin{bmatrix} \underline{\Phi}_Y & \underline{\Phi}_U \end{bmatrix}$$
(3.7)

Note que devido à natureza recursiva do modelo ARX, as primeiras medições da série de treino não podem ser levadas em consideração por não terem medições anteriores. Assim as Eqs. (3.5) a (3.7) são válidas para t maior que a maior ordem dos filtros do ARX.

A seguir os parâmetros estimados do modelo podem calculados por meio da Eq. (3.8) (Vaz Júnior et al., 2010).

$$\hat{\underline{\theta}} = \left[\underline{\Phi}^{t} \underline{\Phi}\right]^{-1} \underline{\Phi}^{t} \underline{Y}$$
(3.8)

O cômputo numérico da matriz de parâmetros $(\hat{\underline{\theta}})$ apresentada na Eq. (3.8) pode ser facilitado aplicando-se a fatoração QR à matriz $\underline{\Phi}$ (Eq. (3.9)). De fato, o procedimento proposto por Ljung (1999), apresentado nas Eqs. (3.9) a (3.11), reduz significativamente o número de condicionamento da matriz a ser invertida para cômputo de $\hat{\underline{\theta}}$.

$$\underline{\Phi} = \underline{T}^{t} \begin{bmatrix} \underline{Q} \\ \underline{0} \end{bmatrix}$$
(3.9)

$$\underline{TY}_{==} = \begin{bmatrix} \underline{L} \\ \underline{\underline{M}} \end{bmatrix}$$
(3.10)

$$\hat{\underline{\theta}} = \underline{\underline{Q}}^{-1} \underline{\underline{L}}$$
(3.11)

O número de condicionamento da matriz \underline{Q} , invertida na Eq. (3.11), é a raiz quadrada do número de condicionamento da matriz $\underline{\Phi}^{t} \underline{\Phi}$, invertida na Eq. (3.8). Por esse motivo, neste trabalho adotou-se o cômputo da matriz de parâmetros através da Eq. (3.11).

A fase de monitoramento consiste na utilização da estrutura da Eq. (3.2), em modo de predição, calibrada com os parâmetros calculados pela Eq. (3.11). Uma vez estimados os parâmetros do modelo ARX, estes são mantidos fixos (invariantes no tempo) ao longo de toda a janela de vigilância (predição) do algoritmo.

Sabe-se que a probabilidade de ocorrência de um vazamento é diretamente proporcional ao desvio entre a predição e a resposta medida. Vaz Júnior et al. (2010)

utilizaram como valor limite para detecção discrepância instantânea entre a predição e a resposta medida maiores que 3 vezes a semi-largura do intervalo de confiança.

Adicionalmente, a incerteza de predição, matematicamente expressa pela largura de intervalo de confiança com nível de probabilidade fixa para valores corretos, também é uma métrica diretamente relacionada à ocorrência de um vazamento.

Neste trabalho define-se um TCI de vazamento (TCI_{LEAK}) por agregação de todos os TCIs de variáveis de resposta do ARX-MIMO (TCI_Y). Por sua vez, estes são obtidos por agregação de dois TCIs-filho: um relativo ao erro de predição (TCI_{RES}) e outro à largura do intervalo de confiança (TCI_{CI}).

A Figura 3.1 mostra a hierarquia de TCIs no caso de três variáveis de resposta do ARX-MIMO: P1, P2 e F1.



Figura 3.1. Exemplo de hierarquia de TCIs de vazamento.

As funções de transferência para cálculo do TCIs bem como a regra de agregação para cálculo do TCI_{LEAK} foram definidas arbitrariamente pelas Eqs. (3.12) a (3.15). Na prática essas equações devem ser calibradas caso a caso levando-se em consideração o sistema monitorado, a filosofia de operação e o limite aceitável de falsos alarmes.

$$TCI_{RES}^{Y(i)} = \begin{cases} 100 - \frac{100}{\frac{3}{2} (Y_U(i) - Y_L(i))} |Y(i) - \hat{Y}(i)|, & |Y(i) - \hat{Y}(i)| < \frac{3}{2} (Y_U(i) - Y_L(i)) \\ 0, & |Y(i) - \hat{Y}(i)| \ge \frac{3}{2} (Y_U(i) - Y_L(i)) \end{cases}$$
(3.12)

$$TCI_{CI}^{Y(i)} = \begin{cases} 100 - \frac{100}{3\sigma_{Y(i)}} \left(Y_U(i) - Y_L(i)\right), & \left(Y_U(i) - Y_L(i)\right) < 3\sigma_{Y(i)} \\ 0, & \left(Y_U(i) - Y_L(i)\right) \ge 3\sigma_{Y(i)} \end{cases}$$
(3.13)

$$TCI_{Y(i)} = \min\left(TCI_{RES}^{Y(i)}, TCI_{CI}^{Y(i)}\right)$$
(3.14)

$$TCI_{LEAK} = \min(TCI_{Y(1)}, TCI_{Y(2)}, ..., TCI_{Y(N)})$$
(3.15)

As Figura 3.2 e Figura 3.3 mostram graficamente a função de transferência do $TCI_{RES}^{Y(i)}$ e $TCI_{CI}^{Y(i)}$.



Figura 3.2. Representação gráfica da função de transferência do $TCI_{RES}^{Y(i)}$.



Figura 3.3. Representação gráfica da função de transferência do $TCI_{CI}^{Y(i)}$.

Em todos os casos foi avaliada a sensibilidade da ordem dos filtros AR e X na detecção. Foram testadas todas as combinações de filtros com ordens 2, 3 e 4. Entretanto, a fim de evitar-se repetição desnecessária de dados e figuras, são apresentados apenas os resultados da configuração do ARX-MIMO que apresentou melhor resultado em cada caso.

3.2. Aplicação em Dados de Bancada

O método de detecção de vazamentos proposto neste trabalho foi testado para detectar de vazamentos utilizando um aparato experimental. Devido à complexidade de se construir um loop de escoamento multifásico, os testes de bancada foram realizados com escoamento de líquido.

O loop de bancada para testes de detecção de vazamento é composto por um circuito principal de 1" com aproximadamente 4 metros e por ramificações de diferentes bitolas (1/4", 1/8" e 1/16") dotadas de válvulas para acionar o vazamento. O loop é alimentado com fluido hidráulico HW50 por uma bomba triplex. A saída do loop é conectada ao reservatório de fluido hidráulico de modo que o sistema opera em circuito fechado (a menos do vazamento). Os ramos de vazamento descarregam em outro reservatório mantido aberto para atmosfera que coletam o fluido hidráulico vazado para devido descarte. A Figura 3.4 apresenta o esquema hidráulico do aparato experimental e a disposição da instrumentação utilizada.



Figura 3.4. Esquema hidráulico simplificado do aparato experimental para testes de detecção de vazamentos.

A Figura 3.5 mostra o loop principal, as válvulas para acionamento dos vazamentos e as válvulas utilizadas para regular a pressão de operação.



Figura 3.5. Circuito principal do aparato experimental para testes de detecção de vazamentos.

Simplificadamente o aparato experimental tenta reproduzir um poço produzindo para um *manifold* e exportando para superfície. Neste cenário, o poço é simulado pela bomba (fonte de vazão para o sistema), o *manifold* é simulado pelas derivações e conexões e a unidade de processamento em superfície é representada pelo próprio reservatório da bomba. Os vazamentos de diferentes magnitudes foram simulados por tubos de diferentes bitolas após válvulas de bloqueio.

Como dito anteriormente, os SPS possuem poucas instrumentações disponíveis para se monitorar vazamentos ou bloqueios nas linhas e equipamentos. Em um cenário típico, um SPS tem disponível apenas uma leitura de vazão, na ANM, e leituras de pressão e temperatura em ambas as extremidades do SPS, na ANM e na unidade de processamento em superfície, e no *manifold*. Assim também o aparato experimental foi projetado com apenas um sensor de vazão e três sensores de pressão. Não se avaliou a utilidade de medições de temperatura no SDV proposto.

Os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados *CompactRio* da *National Instruments*. Um pequeno programa supervisório desenvolvido em LabView determina a taxa de aquisição de dados, armazena e exporta os dados para um arquivo de Excel.



Figura 3.6. Painel com montagem dos sensores no sistema de aquisição de dados.

3.2.1. Materiais

O aparato experimental para validação do SDV foi construído com os itens apresentados na Tabela 3.1.

Item	QTD	Comentário
Tubo 1" OD	4m	Circuito principal
Tubo 3/8" OD	2m	Derivação para vazamento
Tubo 1/4" OD	2m	Linha de vazamento de 1/4"
Tubo 1/8" OD	2m	Linha de vazamento de 1/8"
Tubo 1/16" OD	2m	Linha de vazamento de 1/16"
Redução 3/8" x 1/4"	2	Redução para vazamento de 1/4"
Redução 3/8" x 1/8"	2	Redução para vazamento de 1/8"
Redução 3/8" x 1/16"	2	Redução para vazamento de 1/16"
Tê de redução 1" x 1" x 3/8"	6	Derivação para linha de vazamento
Válvula esfera 3/8"		Modelo: SS-4SKPS6-SHD. Para acionamento
	6	do vazamento
Tê 1" x 3/4 NPT x 1"	3	Conexão com transdutor de pressão
Válvula agulha 1/2"		Modelo: 8A-V8AN-SS-ST. Reguladoras de
	3	pressão de operação
Tê 1" x 1" x 1"	2	Conexão para derivação do loop principal
Transdutores de pressão	3	
Medidor de vazão tipo turbina	1	Modelo TVT12HP250
Sistema de aquisição de dados	1	National Instruments CompactRio

	Tabela 3.1.	. Itens do lo	op experimental	para validaçã	o do SDV.
--	-------------	---------------	-----------------	---------------	-----------

3.2.2. Procedimento Experimental

Esta seção descreve o procedimento adotado nos experimentos para detecção de vazamentos. Dois conjuntos de experimentos foram realizados: testes com apenas um vazamento e teste com dois vazamentos simultâneos.

Testes com apenas um vazamento

O procedimento a seguir foi repetido para cada uma das condições descritas na

Tabela 3.2.

- 1. Verificar que todos os sensores estão registrando valores no LabView com intervalo de leitura de 0.2 segundos;
- 2. Fechar as válvulas V1 a V6;
- 3. Abrir completamente as válvulas X1, X2 e X3;
- 4. Ligar a bomba;
- 5. Fechar parcialmente a válvula X3 até que a leitura do PT-01 estabilize na pressão estabelecida para o teste conforme
- 6. Tabela 3.2;
 - a) Aguardar 10 minutos;
 - b) Abrir a válvula esfera V3;
 - c) Aguardar 10 minutos;
 - d) Fechar a válvula esfera V3.
 - e) Aguardar 10 minutos;
 - f) Abrir a válvula esfera V2;
 - g) Aguardar 10 minutos;
 - h) Fechar a válvula esfera V2.
 - i) Aguardar 10 minutos;
- 7. Retornar ao passo 5 até que se tenha realizado todas as condições da
- 8. Tabela 3.2;
- 9. Desligar a bomba;
- 10. Salvar arquivo com dados dos sensores com o nome do teste (ex. TesteA.csv).

Tabela 3.2. Condições operacionais dos testes com um vazamento.

Teste No.	Pressão do PT-01 (psi)
1	2320

2	1450
3	580

Teste com dois vazamentos simultâneos

O procedimento a seguir foi executado no aparato experimental para o teste com dois vazamentos simultâneos.

- 1. Verificar que todos os sensores estão registrando valores no LabView com intervalo de leitura de 0.2 segundos;
- 2. Fechar as válvulas V1 a V6;
- 3. Abrir completamente as válvulas X1, X2 e X3;
- 4. Ligar a bomba;
- 5. Aguardar 10 minutos;
- 6. Abrir a válvula esfera V1;
- 7. Aguardar 10 minutos;
- 8. Abrir a válvula esfera V4;
- 9. Aguardar 10 minutos;
- 10. Fechar a válvula esfera V4;
- 11. Aguardar 10 minutos;
- 12. Abrir a válvula esfera V6;
- 13. Aguardar 10 minutos;
- 14. Fechar a válvula esfera V6;
- 15. Aguardar 10 minutos;
- 16. Fechar a válvula esfera V1;
- 17. Aguardar 10 minutos;
- 18. Desligar a bomba;
- 19. Salvar arquivo com dados dos sensores com o nome do teste (ex. TesteB.csv).

3.3. Aplicação em dados simulados

Simulações computacionais utilizando o *software* comercial OLGA v.7.0 geraram dados para teste do sistema para detecção de vazamento em dutos multifásicos conforme descrição dos casos a seguir.

3.3.1. Caso 1: Riser com produção estável

O caso 1 consiste na simulação do escoamento multifásico em uma linha submarina. Neste caso, a produção de um poço submarino é direcionada para um separador *topside* conforme mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7. Representação esquemática do caso 1.

A geometria da linha simulada é apresentada na Figura 3.8 e demais parâmetros da linha relevantes para a simulação são apresentados na Tabela 3.3. São apresentadas as coordenadas de cada vértice que compõe a linha, o diâmetro interno (ID), a rugosidade da parede interna e o tipo de parede.



Figura 3.8. Geometria do riser.

O *riser* possui um trecho revestido com isolamento térmico e outro não. Por isso, a Tabela 3.3 indica o tipo de parede de cada trecho da linha. Um tipo de parede é caracterizado pelos materiais e espessuras dos quais a linha é constituída.

x [m]	y [m]	ID [m]	Rugosidade [m]	Parede
0	-255	0.12	2.80E-05	Parede-1
1000	-255	0.12	2.80E-05	Parede-1
1400	-250	0.12	2.80E-05	Parede-1
1800	-255	0.12	2.80E-05	Parede-1
3400	-255	0.12	2.80E-05	Parede-1
4300	-270	0.12	2.80E-05	Parede-1
4300	30	0.1	2.80E-05	Parede-2
4400	30	0.1	2.80E-05	Parede-2

Tabela 3.3. Geometria e propriedades do riser.

A Parede-1 é composta por uma camada interna (em contato com o fluido de produção) de aço cuja espessura é 0.009m e uma camada externa (em contato com mar) de isolamento térmico cuja espessura é 0.02m. Por outro lado, a Parede-2 não possui isolamento térmico, mas é constituída de uma camada única de aço com 0.0075m de espessura. As propriedades das paredes do *riser* estão sumarizadas na Tabela 3.4.

Parede	Espessura[m]	Material
Parede-1	0.009; 0.02	Aço; Isolamento
Parede-2	0.0075	Aço

Tabela 3.4. Propriedades das paredes do riser

Uma vez definida os materiais e as espessuras de cada camada da parede do *riser*, é necessário caracterizar os materiais. Nas simulações de escoamento, em especial no contexto de sistemas *subsea* de produção de óleo e gás, a troca térmica com o ambiente externo (mar) é muito relevante. Para o cálculo da transferência de calor transiente por condução através da parede do *riser* são necessárias as propriedades térmicas dos materiais (INCROPERA et al., 2007). A Tabela 3.5 mostra as propriedades térmicas dos materiais utilizados na simulação do caso 1.

PropriedadeAçoIsolamentoCalor específico [J/kg/K]5001500Condutividade térmica [W/m/K]500.135Densidade [kg/m³]78501000

Tabela 3.5. Propriedades térmicas dos materiais

A simulação do escoamento requer condições de contorno apropriadas bem representar o caso a ser simulado. Na extremidade do *riser* conectada à ANM, o *riser* recebe certa vazão de fluidos de produção provenientes do poço. Na simulação do caso 1 admite-se que a vazão mássica de produção do poço é conhecida. Tal vazão é modelada como uma fonte de massa na entrada do *riser*. Vale ressaltar que a fração de fases não é assumida fixa, mas depende das condições de temperatura e pressão na entrada do *riser* bem como das propriedades do fluido.

Na outra extremidade da linha, o *riser* é conectado a um separador de produção *topside*. Os separadores de produção geralmente possuem controle de pressão para garantir uma boa separação gás-líquido. Consequentemente é razoável adotar uma condição de contorno de pressão fixa na saída do *riser*. A hipótese é de que o controle de pressão do separador garante pouca variação da pressão na saída do *riser* e que as pequenas flutuações de pressão não afetam significativamente o escoamento.

Como dito anteriormente, a troca térmica com o ambiente externo é relevante nas simulações de escoamento. No caso 1, a troca térmica foi modelada assumindo-se conhecida a temperatura do ambiente externo e o coeficiente de película para convecção externa. Note que a condução através da parede do *riser* também foi considerada. Neste caso, simplificadamente adotou-se uma temperatura externa e coeficiente de película constantes. Por fim, a Tabela 3.6 apresenta as condições de contorno usadas na simulação do caso 1.

Condições de contorno	Posição	Valor
Fonte de massa	0 m	15 kg/s
Temperatura	0 m	62 °C
Coeficiente de película	0-4700 m	6.5 W/m²/K
Temperatura Ambiente	0-4700 m	6 °C
Pressão	4700 m	50 bar

Tabela 3.6. Condições de contorno do caso 1

A caracterização do fluido que escoa pelo *riser* é importante para cálculo da fração de fases (óleo, gás e água) e também para determinar propriedades termodinâmicas, como densidade e entalpia, e de transporte como viscosidade. A composição do fluido usada na simulação do caso 1 é apresentada na Tabela 3.7.

Componente	% mol	РМ	dliq [g/cm ³]
N2	0.03	28.014	
CO2	1.23	44.01	
C1	39.29	16.043	
C2	7.65	30.07	
C3	6.43	44.097	
iC4	2.14	58.124	
nC4	4.44	58.124	
iC5	1.99	72.151	
nC5	2.57	72.151	
C6	4.35	86.178	0.664
C7	19.5	101.3	0.702
C8	3.62	213	0.755
С9	6.76	302	0.82

Tabela 3.7. Composição do fluido para o caso 1.

O vazamento foi modelado como uma válvula, portanto caracterizado por um diâmetro e um coeficiente de descarga associado a uma pressão externa fixa. Para diâmetro e coeficiente de descarga fixos, a vazão do vazamento é tão maior quanto maior for a diferença de pressão interna e externa. O vazamento inicia-se no instante 7200s na posição 2000m (contados a partir da entrada do *riser*). Por fim, a Tabela 3.8 apresenta os parâmetros do vazamento simulado no caso 1.

Parâmetro	Valor
Instante de vazamento	7200 s
Diâmetro	10 mm
Posição	2000 m
Coeficiente de descarga	0.84
Pressão externa	20 bar

Tabela 3.8. Parâmetros do vazamento para o caso 1.

3.3.2. Caso 2: Riser com regime de escoamento em golfadas

No sistema de produção é desejável que o escoamento seja estável sem apresentar variações abruptas das taxas pertinentes. Entretanto, variações abruptas de vazões nos sistemas *subsea* de produção podem ocorrer quando o escoamento se dá em golfadas severas. O escoamento em golfadas ou intermitência severa é típico de escoamento multifásico em dutos verticais à jusante de um prolongado trecho de duto quase horizontal levemente negativamente inclinado (NUNES et. al, 2010).

Como mostra a Figura 3.8, a geometria do *riser* do caso 1 tem as características típicas de sistemas que podem sofrer com escoamento intermitente severo. O caso 2 busca simular uma condição na qual o *riser* do caso 1 opere em regime de intermitência severa. Nunes et al. (2010) apresentam uma metodologia para se determinar o limite de intermitência severa em função das velocidades de gás é líquido. É possível notar que baixas velocidades de gás tendem a levar o escoamento para intermitência severa. Por isso, o caso 2 é uma repetição do caso 1, porém com menor vazão de entrada no *riser*. Todas as condições de contorno do caso 2 são idênticas ao do caso 1, com exceção da vazão de entrada, conforme mostra a Tabela 3.9.

Condições de contorno	Posição	Valor
Fonte de massa	0 m	5 kg/s
Temperatura	0 m	62 °C
Coeficiente de película	0-4700 m	6.5 W/m²/K
Temperatura Ambiente	0-4700 m	6 °C
Pressão	4700 m	50 bar

Tabela 3.9. Condições de contorno do caso 2

As características do *riser*, do fluido produzido e do vazamento simulado no caso 2 são as mesmas do caso 1.

4. Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados da detecção de vazamentos via preditores estocásticos ARX-MIMO aplicados em dados de bancada obtidos conforme descrito na Sec. 3.2., e aplicados em dados obtidos nas simulações descritas na Sec. 3.3. A aplicação em dados de bancada serve para validar a metodologia proposta em termos de detecção de vazamentos. Por outro lado, a detecção aplicada aos dados simulados indicará a adequação do método à aplicação em sistemas *subsea* de produção de óleo e gás.

4.1. Detecção em Dados de Bancada

Esta seção apresenta os resultados dos experimentos de vazamentos realizados no *loop* experimental bem como a aplicação do algoritmo de detecção de vazamentos proposto sobre os dados obtidos.

4.1.1. Testes com apenas um vazamento

Como descrito na Sec. 3.2., foi realizado um planejamento experimental com dois fatores: pressão de operação do *loop* e bitola de vazamento. São propostos três níveis de pressão (2320psi, 1450psi e 580psi) e dois níveis de bitola de vazamento (1/4" e 1/8"). Com isso, será possível avaliar o efeito destes fatores na detecção de vazamentos via preditores estocásticos ARX-MIMO.

Nota-se que apesar de o loop experimental ser equipado com válvula de vazamento de 1/16", esta não foi utilizada na bateria de casos com apenas um vazamento. Inicialmente foi previsto experimentos com este nível de bitola, porém atrasos na entrega da válvula impediram a realização destes experimentos.

A Figura 4.1 apresenta os dados obtidos durante o Teste 1. A pressão de operação não pôde ser ajustada exatamente no valor descrito no procedimento da seção 3.2., pois o ajuste manual da válvula agulha X3 não permitiu um ajuste fino da pressão. Esta observação se aplica a todos os testes apresentados neste trabalho.

Nos primeiros treze minutos, o sensor de vazão FT-01 ficou com leitura congelada por motivo desconhecido, porém a abertura de um vazamento em torno de 13 min fez com que a turbina que estava emperrada voltasse a indicar valores não nulos. Optou-se por fechar novamente a válvula de vazamento e aguardar os 10 minutos especificados no procedimento e retomar o andamento dos experimentos sem desprezar esta rodada.
O primeiro vazamento, de bitola 1/4", ocorre a partir do instante 25 minutos e dura 10 minutos. A partir de 35 minutos, quando cessa o vazamento de 1/4" (fecha-se a válvula V3), os valores dos sensores voltam a marcar valores próximos daqueles de antes do vazamento. Passados os dez minutos de estabilização, inicia-se, no instante 45 minutos o vazamento de 1/8". É possível notar que o impacto nas leituras dos sensores é muito menor com o vazamento de menor bitola. Isto é um indício de que a detecção de vazamentos será mais desafiadora quanto menor o vazamento. Este resultado ratifica aqueles descritos por Vaz Junior et. al (2010).



Figura 4.1. Resultados experimentais do Teste 1.

A Figura 4.2 apresenta o resultado da bateria de vazamentos do Teste 2 no qual o *loop* opera a aproximadamente 1450psi. Novamente o início do teste apresentou problemas de execução como nota-se pelas medidas confusas dos sensores. A partir do instante 15 minutos, com o *loop* estabilizado, dá-se o início do procedimento de vazamentos. O vazamento de 1/4" tem início em 25 minutos e persiste por 10 minutos. Durante esse evento, a leitura do PT-03 atingiu o fundo de escala e ficou congelado enquanto o vazamento estava ocorrendo. Novamente, não descartou-se o teste e deu-se prosseguimento ao procedimento. O segundo vazamento, de 1/8", inicia-se no instante 45 minutos e também persiste por 10 minutos. Após cessar o vazamento de 1/8", o teste prossegue por mais 10 minutos e desliga-se a bomba finalizando o teste.



Figura 4.2. Resultados experimentais do Teste 2.

A Figura 4.3 mostra a série histórica das leituras dos sensores do loop experimental durante o Teste 3. O vazamento de 1/4" inicia-se no instante 15 minutos e o vazamento de 1/8" inicia-se no instante 35 minutos. Ambos persistem por 10 minutos. Assim como nos testes anteriores, os primeiros instantes são de adaptação às condições do teste.



Figura 4.3. Resultados experimentais do Teste 3.

Para aplicação do algoritmo de detecção foram extraídas as séries temporais dos sensores disponíveis desde 5 minutos antes do vazamento até 5 minutos após o início do vazamento. Considerando que a taxa de aquisição de dados é de 5Hz, os 10 minutos selecionados contém 3001 leituras (ou instantes).

O teste 3-1/8" (teste a 580psi e com vazamento de 1/8") foi selecionado para verificar quais as variáveis medidas devem ser tratadas como saída ou entrada do sistema. Este teste foi aquele que apresentou menores variações de pressão e vazão no instante do vazamento, por isso é considerado o mais desafiador para detecção.

Considerando o esquema hidráulico do teste, apresentado na Figura 3.4, são necessárias duas especificações para simular a rede de escoamento. Portanto o sinal de entrada deve conter duas variáveis, consequentemente as duas restantes serão tratadas como saídas monitoradas do sistema. Existe uma combinação ótima de variáveis de entrada para o preditor ARX-MIMO (Vaz Júnior et. al, 2010).

A fim de avaliar a melhor combinação de variáveis de entrada, todas as seis possibilidades foram testadas. Sabe-se que a ordem dos filtros AR e X bem como o número de instantes de treinamento também influenciam o desempenho do preditor. Todavia, estes parâmetros serão analisados posteriormente e serão mantidos fixos para seleção do sinal de entrada e saída do preditor ARX-MIMO. Nesta análise foram utilizados ordens de filtro e instantes de treinamento usuais (Vaz Júnior et. al, 2010). Optou-se por filtros de segunda ordem com 300 instantes de treinamento. Da Figura 4.4 a Figura 4.9 são apresentados os resultados da detecção com ARX-MIMO com diferentes variáveis de entrada. Note que apenas as saídas monitoradas (aquelas que não são as entradas) são apresentadas nos gráficos.



Figura 4.4. Resultados da detecção ARX com P3 e F1 como sinal de entrada.



Figura 4.5. Resultados da detecção ARX com P2 e F1 como sinal de entrada.



Figura 4.6. Resultados da detecção ARX com P2 e P3 como sinal de entrada.



Figura 4.7. Resultados da detecção ARX com P1 e F1 como sinal de entrada.



Figura 4.8. Resultados da detecção ARX com P1 e P3 como sinal de entrada.



Figura 4.9. Resultados da detecção ARX com P1 e P2 como sinal de entrada.

Fica claro que a única opção de variáveis de entrada cujas predições de ambas saídas na fase de detecção (Fase 2) extrapolam o intervalo de confiança para valores corretos a 99% de certeza é o conjunto P1 e P2 (ver Figura 4.9). Esta seleção de variáveis será adotada nos demais testes de detecção utilizando dados de bancada. De fato, trabalhos anteriores do grupo já indicavam que ao menos uma medição de vazão é necessária como variável monitorada (Vaz Júnior et. al, 2010).

Como dito anteriormente, a ordem do filtro auto-regressivo (n), a ordem do filtro entrada extra (m), bem como o número de instantes de treinamento (N) são importantes parâmetros para detecção de vazamento via preditor estocástico ARX. Uma vez selecionados os sinais de entrada (P1 e P2) e os sinais de saída (P3 e F1), procede-se uma análise de sensibilidade aos parâmetros supracitados.

Para selecionar-se os parâmetros do preditor ARX-MIMO, testaram-se ordens dos filtros entre 1 e 3 e instantes de treinamento entre 100 e 700. Os testes foram realizados adotando-se como caso base os dados experimentais do teste 3-1/8 (560psi e com vazamento de 1/8") pelo motivo discutido anteriormente.

É desejável que o preditor ARX-MIMO seja capaz de predizer as resposta do sistema isento de vazamento sem falso alarme e, por outro lado, seja também eficiente para detectar um vazamento tão logo ele ocorra. Isto pode traduz-se em baixos resíduos de predição quando o sistema está sadio (antes do vazamento) e alto resíduo de predição na presença de vazamento.

Para cada conjunto de parâmetros (N, n, m) foi calculado a média do quadrado dos resíduos relativos de predição para cada variável de resposta conforme a Eq. (4.1) antes e depois do vazamento.

$$\left\langle S_{R}^{2}\right\rangle = \frac{1}{NI} \sum_{i} \frac{\left(\underline{\hat{Y}}_{i} - \underline{Y}_{i}\right)^{2}}{\underline{Y}_{i}}$$
(4.1)

Onde *NI* é o número de instantes antes ou depois do vazamento conforme o caso. Em teoria o vazamento ocorre 5 minutos após o início do treino do ARX-MIMO, porém na prática devido à operação manual dos testes experimentais, o vazamento ocorre aproximadamente nesse tempo (variando alguns segundos entre um caso e outro). Lembrando que a taxa de aquisição de dados é de 5Hz, este intervalo de tempo contem uma quantidade não desprezível de instantes de tempo.

A Figura 4.10 e a Figura 4.11 apresentam o resumo dos resultados dos testes para seleção dos parâmetros do ARX-MIMO.



Figura 4.10. Análise dos resíduos relativos de predição antes e depois do vazamento da variável P3.



Figura 4.11. Análise dos resíduos relativos de predição antes e depois do vazamento da variável F1.

Idealmente buscamos uma combinação de parâmetros (N, n, m) que forneça baixo resíduo antes da predição (curvas azuis cheias) e alto resíduo depois do vazamento (curvas vermelhas pontilhadas). A Figura 4.11 mostra que a variável F1 é mais sensível à detecção que a variável P3 (ver Figura 4.10). De fato, isto já pôde ser verificado na Figura 4.9.

Analisando-se a Figura 4.11 é possível concluir que, à exceção do caso com N=100, o resíduo de predição é mais sensível à variação de n do que à variação de m. Note que as curvas formam platôs de três em três. A mudança de platô ocorre justamente quando n muda. Nota-se também que à medida que n aumenta o resíduo antes do vazamento diminui e o resíduo depois aumenta, por isso foi selecionado as ordens n=3 e m=1. Em relação ao número de instantes de treinamento, é possível notar que o sucessivo incremento de N resulta em diferenças cada vez menores nos resíduos médios. Isto fica mais evidente na Figura 4.10. Por isso, selecionou-se N=300.

É interessante avaliar a influência da bitola de vazamento e da pressão de operação no desempenho do detector estocástico ARX-MIMO. Neste estudo utilizam-se os parâmetros selecionados anteriormente. A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos resultados do estudo. Além do $\langle S_R^2 \rangle$, definido na Equação (4.1), calculado para as variáveis P3 e F1 depois do vazamento, também é apresentado do menor valor do TCI para resíduos e intervalo de confiança bem como o TCI agregado para vazamento.

Bros	Bitola Vaz.	$\left< S_R^2 \right>$ [%]		Mínimo TCI _{RES}		Mínimo TCI _{CI}		Mínimo TCI _{LEAK}
[psi]		P3	F1	Р3	F1	P3	F1	-
2320	1/4"	2.08	6.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1450	1/4"	118.42	13.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
580	1/4"	12.51	13.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2320	1/8"	0.01	8.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1450	1/8"	0.03	5.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
580	1/8"	0.21	4.57	10.29	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela 4.1. Análise da influência da pressão e bitola de vazamento no desempenho de detecção com ARX 3X1-300.

Nota-se que a detecção torna-se mais difícil na medida em que se reduz a pressão de operação ou se reduz a bitola do vazamento. Nota-se um resultado anômalo no resíduo da variável P3 na detecção de vazamento de 1/4" a 1450psi. O sensor de P3 ficou com leitura congelada no fundo de escala (zero) por algum tempo após o vazamento. Por isso, neste instantes, o resíduo disparou.

Em todos os casos, o algoritmo de detecção via preditores estocásticos ARX foi capaz de detectar o vazamento (TCI_{LEAK} = 0). Cabe ressaltar que as funções de transferência e regras de agregação são arbitrárias e foram ajustadas neste trabalho exatamente para detectar os vazamentos em todos os casos sem nenhum falso alarme. Os resultados de detecção com preditor ARX-MIMO 3x1-300 em todos os cenários de vazamento são apresentados da Figura 4.12 à Figura 4.35.



Figura 4.12. Predição do ARX 3x1-300 no vazamento 1/4" a 2320psi.



Figura 4.13. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 2320psi.



Figura 4.14. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 2320psi.



Figura 4.15. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4"

a 2320psi.



Figura 4.16. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 1450psi.



Figura 4.17. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a

1450psi.



Figura 4.18. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 1450psi.



Figura 4.19. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4"

a 1450psi.



Figura 4.20. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 580psi.



Figura 4.21. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 580psi.



Figura 4.22. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 580psi.



Figura 4.23. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/4" a 580psi.



Figura 4.24. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 2320psi.



Figura 4.25. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 2320psi.



Figura 4.26. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 2320psi.



Figura 4.27. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 2320psi.



Figura 4.28. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 1450psi.



Figura 4.29. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 1450psi.



Figura 4.30. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 1450psi.



Figura 4.31. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8"

a 1450psi.



Figura 4.32. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 580psi.



Figura 4.33. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 580psi.



Figura 4.34. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 580psi.



Figura 4.35. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no vazamento 1/8" a 580psi.

4.1.2. Testes com dois vazamentos simultâneos

Assim como em Vaz Junior et. al (2010), este trabalho verificou o desempenho do detector ARX-MIMO para múltiplos vazamentos simultâneos. A Figura 4.36 apresenta o resultado do teste com dois vazamentos ocorrendo simultaneamente. Neste teste, executa-se um vazamento de 1/16" (abre-se a válvula V1) e em seguida, ainda com o vazamento de 1/16" em andamento, abre-se um segundo vazamento de 1/16" ao abrir-se a válvula V4. O primeiro vazamento de 1/16" inicia-se no instante 14 minutos e o segundo inicia-se dez minutos depois, ou seja, no instante 24 minutos. O segundo vazamento de 1/16" persiste por dez minutos até que a válvula V4 é fechada. Após dez minutos de estabilização (ainda com a válvula V1 aberta) inicia-se o um segundo vazamento simultâneo no *loop*. Desta vez o vazamento tem bitola de 1/4" (válvula V6). No instante 44 minutos a válvula V6 é fechada e, no instante 57 minutos, o primeiro vazamento de 1/16" (válvula V1) é encerrado.



Figura 4.36. Resultados experimentais do Teste com dois vazamentos simultâneos.

Para detecção de vazamentos utiliza-se o preditor ARX-MIMO com a mesma configuração adotada nos testes com apenas um vazamento. Uma vez que o sistema (ou o processo) não mudou, é razoável esperar que a análise dos parâmetros ótimos para o preditor ARX-MIMO descrita na Sec. 4.1.1. seja aplicável no teste com dois vazamentos simultâneos.

Os resultados de detecção de vazamento com o ARX-MIMO são apresentados da Figura 4.37 a Figura 4.40. A Figura 4.37 mostra as predições do ARX-MIMO em comparação com as medições experimentais, adicionalmente os intervalos de confiança também são apresentados. A Figura 4.37 evidencia a dificuldade de detecção dos vazamentos de 1/16". Entretanto a Figura 4.38 mostra que há um efeito aditivo do segundo vazamento que facilita a detecção quando há dois vazamentos simultâneos. Note que durante a ocorrência de apenas um vazamento de 1/16" os TCI_{RES} das variáveis de saída oscilam entre 50 e 0 indicando certa dúvida de detecção. Por outro lado, quando ocorre o segundo vazamento (neste caso, dois). Já a métrica de TCI_{CI} apresentada na Figura 4.39 foi capaz de detectar o primeiro vazamento de 1/16". Consequentemente, a métrica TCI_{LEAK}, que por definição é o menor entre os TCI_{CI} e TCI_{RES}, apresentada na Figura 4.40 indicou o vazamento desde o primeiro vazamento de 1/16".



Figura 4.37. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois vazamentos a 2320psi.



Figura 4.38. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois vazamentos a 2320psi.



Figura 4.39. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois vazamentos a 2320psi.



Figura 4.40. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no teste com dois vazamentos a 2320psi.

4.2. Detecção em Dados Simulados

Esta seção apresenta os resultados das simulações de escoamento e da aplicação do algoritmo de detecção de vazamento proposto sobre os dados gerados pelas simulações.

4.2.1. Resultados do caso 1

O fluido especificado na Sec. 3.3.1. foi caracterizado no *software* PVTsim® 20.0 com a equação de estado Peng-Robinson com correção de Peneleux. A Figura 4.41 apresenta o envelope de fases resultante da caracterização do fluido do caso 1. Note que dadas as condições de contorno de temperatura e pressão especificadas no caso 1 o fluido estará bifásico.



Figura 4.41. Envelope de fases do fluido do caso 1.

No caso 1 o regime de escoamento é estável, portanto as variáveis do escoamento (e seus perfis ao longo do *riser*) não sofrem variações bruscas ao longo do tempo. Isto não implica que não haja variações suaves ao longo do horizonte de simulação (mesmo sem efeito do vazamento). A simulação transiente do escoamento permite avaliar o impacto do vazamento nos perfis de variáveis de escoamento como temperatura e pressão. Como os perfis variam no tempo, selecionaram-se aqueles perfis imediatamente antes do

vazamento e muito tempo depois do aparecimento do vazamento (no instante 14400s), de modo que o efeito transiente do vazamento cessou.

A Figura 4.42 apresenta os perfis de pressão no *riser* antes e depois do vazamento no caso 1. A mudança acentuada no gradiente de pressão ocorre no ponto do riser onde há transição do trecho predominantemente horizontal (perda de carga predominantemente por fricção) para o trecho vertical (perda de carga predominantemente gravitacional). É interessante notar que a perda de carga no *riser* diminui após o vazamento pois há menor vazão passando pelo trecho à jusante do vazamento reduzindo a perda por fricção.



Figura 4.42. Perfis de pressão no riser antes e depois do vazamento do caso 1.

Como pode ser observado na Figura 4.43, os perfis de temperatura no *riser* permanecem praticamente inalterados antes e depois do vazamento. Também é possível notar um maior gradiente de temperatura no trecho não isolado do *riser*.



Figura 4.43. Perfis de temperatura no riser antes e depois do vazamento do caso 1.

Uma variável importante no escoamento multifásico é a fração de fases. O *holdup* é a fração de área transversal da linha ocupada com líquido. A Figura 4.44 mostra o perfil de *holdup* ao longo do *riser* antes e depois do vazamento no caso 1. É possivel notar que o *holdup* no trecho do *riser* antes do vazamento diminui razoavelmente devido à diferença de pressão (ver Figura 4.42). De fato, como não há variação significativa de temperatura, o distanciamento entre os perfis de *holdup* antes e depois segue o mesmo comportamento que os perfis de pressão.



Figura 4.44. Perfis de *holdup* no *riser* antes e depois do vazamento do caso 1.

Considera-se que o sistema *subsea* de produção possui apenas dois transdutores de pressão/temperatura: um imediatamente antes do separador *topside* (Ptop/Ttop) e outro na ANM (Psub/Tsub). Adicionalmente há um medidor de vazão de líquido à jusante do separador *topside*. Como a simulação do caso 1 não inclui o separador assume-se que a vazão de líquido (Qtop) é igual àquela no último vértice modelado do *riser*. Adicionalmente é apresentada a vazão mássica *subsea* na ANM (Wsub), porém esta não é utilizada no algoritmo de detecção.

Os sistemas de produção submarinos possuem maiores limitações de transferência de dados que sistemas de controle típicos de plantas de processo. Por esta razão, as séries históricas presumem um período de aquisição de 5s (ou taxa de aquisição de dados de 0.2Hz).

A Figura 4.45 apresenta a série temporal das pressões e temperaturas disponíveis. Note que Ptop permanece praticamente inalterada, pois esta medição está muito próxima da condição de contorno de pressão fixa *topside*. Por outro lado há uma variação significativa em Psub após o início do vazamento em t=7200s. As variações de temperatura são menos acentuadas.



Figura 4.45. Séries temporais de Ptop, Psub, Tsub e Ttop no caso 1.

A Figura 4.46 apresenta as séries temporais de Wsub e Qtop. A vazão de líquido na saída do *riser* despenca após o vazamento, por outro lado a vazão mássica na ANM (Wsub) permanece inalterada.



Figura 4.46. Séries temporais de Wsub e Qtop no caso 1.

O algoritmo de detecção de vazamentos utilizado neste trabalho foi testado com as séries temporais geradas pela simulação numérica do escoamento multifásico conforme apresentadas na Figura 4.45 e Figura 4.46. Neste teste, as variáveis a serem tratadas como entradas ou saídas monitoradas do ARX-MIMO foram definidas de acordo com as condições de contorno do caso 1. As variáveis Ptop e Tsub foram selecionadas como entrada porque estão "próximas" das condições de contorno de pressão fixa e temperatura da fonte de massa na ANM, respectivamente. As demais variáveis (com exceção da Wsub) serão tratadas como saídas monitoradas do preditor ARX-MIMO. Embora não seja o ideal, os parâmetros do preditor (N, n e m) foram assumidos iguais àqueles selecionados na Sec. 4.1.

A Figura 4.47 mostra os sinais de entrada utilizados no preditor ARX-MIMO para detecção de vazamentos no caso 1.



Figura 4.47. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 1.

As respostas do preditor ARX-MIMO dadas as séries temporais de entradas, conforme Figura 4.47, são apresentadas na Figura 4.48. Nota-se que a Qtop foi a variável que as predições após o vazamento mais se distanciaram das medições. Isto mais uma vez ratifica que as medições de vazão têm maior relevância na detecção de vazamentos.



Figura 4.48. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1.

As métricas TCI_{RES} (Figura 4.49), TCI_{CI} (Figura 4.50) e TCI_{LEAK} (Figura 4.50) mostram que o detector ARX-MIMO foi capaz de detectar corretamente o vazamento sem apresentar falsos alarmes.



Figura 4.49. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1.



Figura 4.50. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1.



Todas Respostas TCI_{LEAK} PREDITOR 3 X 1, ny=3, nu=2, Instantes^{Fase1}=300, Instantes^{Fase2}=2590

Figura 4.51. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1.

Os sistemas de medição (instrumentação, sistemas de transmissão de dados, etc.) não são perfeitos, pelo contrário, inevitavelmente são incapazes de informar o valor exato das variáveis do escoamento. É interessante avaliar se o detector ARX-MIMO consegue

detectar o vazamento utilizando valores corrompidos. Para avaliar-se o efeito da incerteza do sistema de medição na detecção de vazamento com o ARX-MIMO, definese uma variável estocástica calculada a partir do valor dado pela simulação numérica, porém com certo grau de incerteza. É razoável propor que esta variável estocástica siga uma distribuição de probabilidade normal com média igual ao valor simulado e com desvio padrão arbitrado. Consequentemente, quanto maior a incerteza do sistema de medição maior deverá ser o desvio padrão arbitrado. Foram testados desvios padrões arbitrados como porcentagem (λ) da média ($\underline{Y}(t)$). As novas séries temporais corrompidas ($\underline{Y}^{corr}(t)$) foram geradas utilizando a Eq. (4.2).

$$\underline{Y}^{corr}(t) = \underline{Y}(t) + (\lambda \underline{Y}(t)) \cdot \underline{\varepsilon}$$
(4.2)

Onde $\underline{\varepsilon}$ é uma variável aleatória com distribuição de probabilidade normal padrão sorteada durante a execução do algoritmo de detecção.

A Figura 4.52 apresenta as séries temporais de entrada do ARX-MIMO corrompidas com λ =0.01. As métricas TCI_{RES} (Figura 4.53), TCI_{CI} (Figura 4.54) e TCI_{LEAK} (Figura 4.55) mostram que o detector ARX-MIMO, embora com mais dificuldade, foi capaz de detectar corretamente o vazamento precisamente sem apresentar falsos alarmes.



Figura 4.52. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 1 com λ =0.01.



Figura 4.53. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.01.



Figura 4.54. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.01.



Figura 4.55. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.01.



Todas Respostas TCI_{LEAK} PREDITOR 3 X 1, ny=3, nu=2, Instantes^{Fase1}=300, Instantes^{Fase2}=2590

Figura 4.56. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.01.

O desempenho do preditor ARX-MIMO para detecção de vazamento no caso 1 com λ =0.01 é apresentado da Figura 4.57 a Figura 4.61. A Figura 4.57 mostra sinais de entrada muito ruidosos, consequentemente a predição do ARX-MIMO apresentada na Figura 4.58 não é tão precisa quanto antes. As métricas para detecção indicam que o ARX-MIMO não foi capaz de detectar o vazamento com este elevado grau de incerteza
nas medições. O indicador final TCI_{LEAK} , mostrado na Figura 4.61, oscila aproximadamente em torno de 60 após o vazamento o que não indica a presença indubitável de um vazamento.



Figura 4.57. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 1 com λ =0.05.



Figura 4.58. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.05.



Figura 4.59. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.05.



Figura 4.60. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.05.



Figura 4.61. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 1 com λ =0.05.

4.2.2. Resultados do caso 2

O caso 2 é uma variação do caso 1, porém o *riser* propositadamente opera em regime de intermitência severa. Pretende-se neste caso 2 avaliar o desempenho do ARX-MIMO na detecção de vazamentos em sistemas *subsea* de produção que operam no regime de golfadas severas.

A Figura 4.62 e a Figura 4.63 mostram as variações bruscas das variáveis do escoamento quando ocorrem as golfadas. É possível notar na Figura 4.62 que o período de oscilação (relacionado ao tamanho da golfada) muda após o vazamento. Assim como no caso 1, observa-se que Psub cai após o vazamento (mesmo que oscilatório, o valor médio de Psub cai). O comportamento da vazão de líquido *topside* (Qtop), mostrado na Figura 4.63, é complexo, mas percebe-se mudança no padrão de comportamento depois do vazamento. Observam-se inclusive momentos onde a vazão Qtop é negativa, ou seja, há fluxo reverso no *riser* em direção à ANM.



Figura 4.62. Séries temporais de Ptop, Psub, Tsub e Ttop no caso 2.



Figura 4.63. Séries temporais de Wsub e Qtop no caso 2.

A detecção de vazamento no caso 2 é certamente desafiadora, pois há incessantes mudanças bruscas das variáveis medidas. De fato, testes preliminares com o ARX-MIMO com a mesma configuração (parâmetros N, n e m) dos testes anteriores não conseguiram detectar o vazamento. Seguindo um procedimento similar ao descrito na Sec. 4.1.1., ou seja, seleção das variáveis de entrada e saída e dos parâmetros N, n e m, é possível concluir que as medições disponíveis não são suficientes para que o detector ARX-MIMO funcione apropriadamente neste cenário de *slug* severo. Neste caso, optouse por inserir a variável Wsub como entrada para o preditor ARX-MIMO.

A Figura 4.64 mostra os sinais de entrada utilizados no preditor ARX-MIMO para detecção de vazamentos no caso 2 e a Figura 4.65 apresenta o resultado das predições do ARX-MIMO utilizando as entradas apresentadas anteriormente.



Figura 4.64. Série temporal das entradas do ARX-MIMO 3x1-300 do caso 2.



Figura 4.65. Predição do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2.

As métricas TCI_{RES} utilizadas neste trabalho mostram que, no caso 2, exatamente no instante do vazamento as predições do ARX-MIMO divergem significativamente das medições ($TCI_{RES} = 0$ em todas as variáveis de saída). Entretanto as variações bruscas típicas do regime de golfadas severas confundem o detector ARX-MIMO de modo que, ao contrário do que se gostaria, os TCI_{RES} tornam a subir mesmo com um vazamento em andamento. Também é possível notar na Figura 4.66 que há falsos alarmes: mesmo antes do vazamento há momentos nos quais o detector ARX-MIMO se confunde e o TCI_{RES} da variável Ttop é praticamente zero.



Figura 4.66. Resultado de TCI_{RES} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2.

A Figura 4.67 mostra os resultados de TCI_{CI} do detector ARX-MIMO no caso 2. Esta métrica não acusou falsos alarmes. Assim como o TCI_{RES} , esta métrica não foi capaz de indicar continuamente o vazamento. Curiosamente, observa-se uma queda progressiva do TCI_{CI} após o vazamento que indica uma deterioração da capacidade preditiva do ARX-MIMO.



Figura 4.67. Resultado de TCI_{CI} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2.

Por fim, o TCI_{LEAK} para o caso 2 apresentado na Figura 4.68 mostra a ineficiência do detector ARX mesmo com a inclusão de uma terceira variável no sinal de entrada. Também cabe ressaltar que não foram consideradas incertezas no sistema de medição neste caso. Por isso é possível concluir que o preditor ARX-MIMO não seria adequado para detecção de vazamento neste cenário.



Figura 4.68. Resultado de TCI_{LEAK} do ARX-MIMO 3x1-300 no caso 2.

5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma metodologia para detecção de vazamentos em sistemas de produção *subsea* utilizando preditores estocásticos auto-regressivos do tipo ARX-MIMO. Neste trabalho, também é proposto um aparato experimental para validação do método de detecção de vazamento. Apesar de tipicamente os sistemas de produção de petróleo apresentarem escoamento multifásico, neste trabalho o aparato experimental operou com unicamente com líquido. Simulações numéricas com software comercial OLGA® verificaram a adequação do detector ARX-MIMO no contexto multifásico dos sistemas *subsea* de produção.

Uma ampla bateria de testes experimentais comprovou que o detector ARX-MIMO é capaz de detectar com precisão vazamentos em dutos monofásicos pressurizados com pouquíssimas medições disponíveis (três pressões e uma vazão volumétrica). Foram testados vazamentos de 1/4", 1/8" e 1/16" em uma linha principal de 1" operando a 2320psi, 1450psi e 580psi. Adicionalmente, em um experimento com dois vazamentos simultâneos, verificou-se o efeito aditivo de dois pequenos vazamentos sucessivos ocorrendo simultaneamente.

Utilizando os dados obtidos experimentalmente avaliou-se a influência dos parâmetros de configuração do preditor ARX-MIMO no seu desempenho de detecção de vazamentos. A escolha das variáveis para entrada ou saída do ARX-MIMO é fundamental para um bom desempenho do detector. São necessárias variáveis de entrada coerentes para que o preditor consiga "simular" as saídas monitoradas. Outros parâmetros importantes são a ordem dos filtros AR e X e o número de instantes de treinamento do preditor. Tais parâmetros de configuração do preditor ARX-MIMO devem ser selecionados para cada caso específico; não há indicação de configuração ótima para todos os casos em geral.

Através de simulações numéricas de escoamento multifásico é possível mostrar que o preditor ARX-MIMO foi capaz de detectar um pequeno vazamento de 10mm em um *riser* de 0.12m com mais de 4km de comprimento com regime de escoamento estável. Vale ressaltar que dependendo do nível de incerteza do sistema de medição o detector tem funcionalidade reduzida ou mesmo perdida. Maiores ruídos de medição pioram o desempenho do método de detecção de vazamento proposto.

O desempenho do detector ARX-MIMO não foi satisfatório em um caso onde há escoamento com intermitência severa. O sistema não foi capaz de detectar o vazamento de 10mm anteriormente detectável quando com escoamento estável.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- Realizar experimentos com vazamento em ambiente subaquático e pressurizado, como por exemplo, em câmara hiperbárica;
- Automatizar o loop experimental de modo que as variáveis de operação do loop sejam melhor controladas;
- Realizar experimentos com vazamento em dutos com escoamento multifásico;
- Realizar testes exaustivos com simulações para definir o limite de detecção (menor vazamento detectável) do ARX-MIMO em diferentes cenários de operação;
- Testar o método de detecção de vazamento em sistemas subsea de produção quando há perturbações na planta de processamento na superfície para verificar que o preditor estocástico é capaz de não acusar falsos alarmes nestas situações;
- Testar o sistema de detecção via preditores estocásticos em cenários transientes frequentes em sistemas *subsea* de produção como fechamento de um poço (redução da vazão de entrada no *riser*);
- Testar outros modelos auto-regressivos lineares e não lineares, como por exemplo, ARMAX e NARX.

6. Referências

ABDULLA, M. B.; HERZALLAH, R. Probabilistic multiple model neural network based leak detection system: Experimental study. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, n. 36, p. 30-38, 2015.

AMIN, A. Evaluation of commercially available virtual flow meters (VFMs). Offshore Technology Conference, 2015.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. ANP RTDT. Regulamento Técnico de Dutos Terrestres para Movimentação de Petróleo, Derivados e Gás Natural, 2010.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. ANP SGSS. Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional de Sistemas Submarinos, 2015.

Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis : 2015 / Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. - Rio de Janeiro : ANP, 2008.

API. American Petroleum Institute. API 1130. Computational pipeline monitoring for liquid pipelines, 2002.

API. American Petroleum Institute. API 1155. Evaluation methodology for software based leak detection systems, 1995.

BAI, Y.; BAI, Q. Subsea engineering handbook. Gulf Professional Publishing, 2010.

BASSEVILLE, M.; NIKIFOROV, I. V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. Prentice-Hall, Inc., 1993.

BEGGS, H. D.; BRILL, J. P. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. Journal of Petroleum Technology, n. 255, p. 607-617, 1973.

BENDIKSEN, K. H.; MALNES, D.; MOE, S. The Dynamic Two-Fluid Model OLGA: Theory and Application. SPE Production Engineering, p. 171-180, 1991.

BERGE, S. P.; LUND, B. F.; UGARELLI, R. Condition monitoring for early failure detection. Frognerparken pumping station as case study. Procedia Engineering, n. 70, p. 162 – 171, 2014.

BRATLAND, O. Pipe Flow 2: Multiphase Flow Assurance. 2010.

BRENNEN, C. E. Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge University Press, 2005.

CORONADO, M; AAS, T; HOLMÅS, K; LUNDE, G. G.; RUDRUM, G; ANGELO, P; Ormen Lange Flow Assurance System (FAS) – online monitoring and advice. Subsea Leak Detection Symposium, 2013.

CRAMER, R.; SHAW, D.; TULALIAN, R.; ANGELO, P.; VAN STUIJVENBERG, M. Detecting and correcting pipelines leaks before they become a big problem. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition, 2014.

DE MEDEIROS, J. L. Notas de Aula de Identificação de Processos Químicos e Bioquímicos - EQE752. Escola de Química, UFRJ, 2003.

DNV. Det Norske Veritas. Recommended practice DNV-RP-F116. Integrity management of submarine pipeline systems, 2009.

DNV. Det Norske Veritas. Recommended practice DNV-RP-F302. Selection and use of subsea leak detection systems, 2010.

Experimental and field evaluation. Computers and Chemical Engineering, n. 35, p. 662–670, 2011.

GAMBOA-MEDINA, M. M.; REIS, L. F. R.; GUIDO, R. C. Feature extraction in pressure signals for leak detection in water networks. Procedia Engineering, n. 70, p. 688 – 697, 2014.

GEIGER, G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localisation. Pipeline Technology Conference, 2006.

GUO, B.; LYONS, W. C.; GHALAMBOR, A. Petroleum production engineering. Gulf Professional Publishing, 2007.

ISERMANN, R. Fault-Diagnosis Applications. Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems. Springer, 2011.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6. ed. Nova York: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

KAM, S. I. Mechanistic modeling of pipeline leak detection at fixed inlet rate. Journal of Petroleum Science and Engineering, n. 70, p. 145–156, 2010.

LABANCA, E. L. Metodologia para a seleção de arranjos submarinos baseada na eficiência operacional. Dissertação. 2005.

LIMA, H. F. Metodologia para tomada de decisão no projeto de sistemas submarinos de produção de óleo e gás. Dissertação. 2007.

LJUNG, L. System identification: theory for the user. Prentice Hall, 2a Ed, 1999.

MIRATS-TUR, J. M.; JARRIGE, P. A.; MESEGUER, J.; CEMBRANO, G. Leak detection and localization using models: field results. Procedia Engineering, n. 70, p. 1157 – 1165, 2014.

MOLINA-ESPINOSA, L.; CAZAREZ-CANDIA, O.; VERDE-RODARTE, C. Modeling of incompressible flow in short pipes with leaks. Journal of Petroleum Science and Engineering, n. 109, p. 38–44, 2013.

NIST/SEMATECH.e-HandbookofStatisticalMethods,http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/, acessado em 25 de fevereiro de 2016.

NUNES, G. C; MEDEIROS, J. L.; ARAUJO, O. Q. F. Modelagem e controle na produção de petróleo. São Paulo: Blucher, 2010.

NYSTAD, B. H.; Technical Condition Indexes and Remaining Useful Life of Aggregated Systems. Tese, Norwegian University of Science and Technology, 2008.

REDDY, H. P.; NARASIMHAN, S.; BHALLAMUDI, S. M.; BAIRAGI, S. Leak detection in gas pipeline networks using an efficient state estimator. Part II.

REDDY, H. P.; NARASIMHAN, S.; BHALLAMUDI, S. M.; BAIRAGI, S. Leak detection in gas pipeline networks using an efficient state estimator. Part-I: Theory and simulations. Computers and Chemical Engineering, n. 35, p. 651–661, 2011.

ROALD, P. K.; AAS, T; SMITH, G. G.; SOOSAIPILLAI, C.; ALFSTAD, D. E.; BRESSAND, J. Y. Condition Performance Monitoring for Subsea: Experience and Value documentation from the Gjøa Field. Offshore Technology Conference, 2013.

SALA, D.; KOLAKOWSKI, P. Detection of leaks in a small-scale water distribution network based on pressure data - experimental verification. Procedia Engineering, n. 70, p. 1460 – 1469, 2014.

SILVA, H. V. MOROOKA, C. K.; GUILHERME, I. R.; FONSECA, T. C.; MENDES, J. R. P. Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system. Journal of Petroleum Science and Engineering, n. 49, p. 223-238, 2005.

SUN, L.; CHANG, N. Integrated-signal-based leak location method for liquid pipelines. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, n. 32, p. 311-318, 2014.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE Journal, n. 1, p. 47-55, 22, 1976.

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. Editora Interciência, 2001.

VAIDYANATHAN, R.; VENKATASUBRAMAMANIAN, V. Representing and diagnosing dynamic process data using neural network. Engng. Applic. Artif. Intell, v. 5, n 1, p 11-21, 1992.

VAZ JUNIOR, C. A.; MEDEIROS, J. L.; ARAUJO, O. Q. F; ARX modeling approach to leak detection and diagnosis. Journal of loss prevention in the process industries, n. 23, p. 462-475, 2010.

WANDERLEY, R. R.; Modelagem de escoamento compressível de CO₂ supercrítico com detecção de vazamentos via preditor estocástico ARX-MIMO. Dissertação, 2015.

WANG, G.; DONG, D.; FANG, C. Leak detection for transport pipelines based on autoregressive modeling. IEEE transactions on instrumentation and measurement, n. 42, p. 68-71, 1993.

ZHANG, J.; HOFFMAN, A.; KANE, A.; LEWIS, J. Development of pipeline leak detection technologies. 10th International Pipeline Conference, 2014.

ZHANG, Y.; , S.; LI, J.; JIN, S. Leak detection monitoring system of long distance oil pipeline based on dynamic pressure transmitter. Measurement, n. 49, p. 382–389, 2014.