UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

ELÓI ROTAVA

ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM MALHAS DE ESCOAMENTO DE GAS NATURAL - UMA PROPOSTA PARA MALHAS COMPLEXAS

São Paulo

- 2020 -

ELÓI ROTAVA

ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM MALHAS DE ESCOAMENTO DE GAS NATURAL - UMA PROPOSTA PARA MALHAS COMPLEXAS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Eng. Mecânica de Energia e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Baliño

Co-Orientador: Prof. Dr. Flávio Celso Trigo

São Paulo

- 2020 -

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Rotava, Elói
Estimação de estado em malhas de escoamento de gás natural - Uma proposta para malhas complexas / E. Rotava -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
212 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.gasodutos 2.gás natural 3.fontes alternativas de energia 4.filtro de kalman 5.estruturas offshore I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ELÓI ROTAVA
Estimação de estado em malhas de escoamento de gás natural -
Uma proposta para malhas complexas

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Eng. Mecânica de Energia e Fluidos

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr._____

Instituição:_____ Assinatura:_____

Prof. Dr._____

Instituição:_____ Assinatura:_____

Prof. Dr._____

Instituição:_____ Assinatura:_____

Prof. Dr._____

Instituição:_____ Assinatura:_____

Dedico esta tese a Agnes e José, que toleram minhas peculiaridades e formam, comigo, uma linda família!

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo gostaria de agradecer aos professores Jorge Luis Baliño e Flávio Celso Trigo pelo auxilio e direcionamento no desenvolvimento do trabalho. Cada qual com seu conhecimento e forma de trabalho sempre dispostos a ajudar e apoiar este orientado. Sem vocês este trabalho não seria possível.

Agradeço aos amigos e colegas de laboratório Gabriel, Ivanilto, Sérgio e Lúcia pela agradável convivência e ajuda nos momentos de apuro.

Agradeço também a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela disponibilização de recursos e possibilidade de desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a Petrobras pelo incentivo ao desenvolvimento da pesquisa, bem como no apoio a publicação de trabalhos relacionados ao doutorado com participação em eventos ou disponibilização de informações. Agradecimento especial ao Dourado pelo apoio no ingresso e a Juliana por todos os anos de auxílio!

Agradeço a Universidade Católica de Santos e a Universidade Federal de São Paulo pelo apoio e compreensão da importância do doutorado na minha vida e carreira acadêmica.

E finalmente agradeço a todos, mesmo sem explicitar nomes, que me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho de diferentes formas!

Meus sinceros agradecimentos, Elói.

“Do not worry about your difficulties in Mathematics. I can assure you mine are still greater.” Albert Eintein.

ABSTRACT

Natural gas is economically important due to its low value and less environmental impact. Brazilian gas is produced mainly from offshore fields in deep water, where pipeline networks are in operation in order to transport this natural gas to onshore processing units. As a decision support tool, flow models integrated with field measurements are used, which estimate variables at different points in the flow. This work seeks to estimate the state in an offshore gas pipeline network in deep waters, including the estimation of flow parameters, to improve the prediction of pressure and temperature profiles and greater tolerance to inaccurate measurements. To achieve these objectives, the Kalman filter is used. A single-phase, transient, thermal and compositional flow model is proposed for the reproduction of flow dynamics in a gas pipeline network; this model is used in the extended Kalman filter to describe the dynamics of the system. Available cases in the literature are discussed, as proposed onshore and offshore gas pipelines, a simulated offshore network and a real network of pipelines in operation, in order to verify the scenarios where this proposal presents gains. The results show that the incorporation of the energy conservation equation in the propagation model on offshore pipelines improves the accuracy of profiles and flow parameters simultaneously estimation, for pressure and temperature profiles in scenarios with deep water flow transients. In addition, the approach was validated with field data for an offshore network in operation, presenting consistent results for the estimated parameters, as well as robustness to the non-representative measurements on the sensors. These are the main contributions of the Thesis.

Keywords: *pipeline network, natural gas, flow, state estimation, transient, thermal*

RESUMO

O gás natural tem importância econômica por seu baixo valor e menor impacto ambiental. O gás brasileiro é produzido majoritariamente de campos *offshore* em lâmina d'agua profunda, nos quais estão em operação malhas de gasodutos com o objetivo de transportar este gás natural para unidades de processamento em terra. Como ferramenta de suporte a decisão são utilizados modelos de escoamento integrados a medidas de campo, que estimam variáveis em diferentes pontos do escoamento. Este trabalho tem por objetivo a estimação de estado em malha de gasoduto *offshore* em águas profundas, incluindo a estimação de parâmetros do escoamento, para melhoria na estimação de perfis de pressão e temperatura e maior tolerância a medidas imprecisas. Para alcançar estes objetivos, utiliza-se o filtro de Kalman. É proposto um modelo de escoamento monofásico, transiente, térmico e composicional para a reprodução da dinâmica do escoamento em uma malha de gasodutos; este modelo é utilizado no filtro estendido de Kalman para a descrição da dinâmica do sistema. São abordados casos disponíveis na literatura, de gasodutos *onshore* e *offshore* propostos, uma malha *offshore* simulada e uma malha de dutos real em operação, com o objetivo de verificar os cenários onde esta proposta apresenta ganhos. Os resultados mostram que a incorporação da equação da conservação da energia no modelo de propagação em dutos *offshore* implica na melhoria da precisão das estimativas conjuntas de estado e parâmetros do escoamento, simultaneamente para perfis de pressão e temperatura em cenários com transientes em escoamentos em águas profundas. Além disso, a abordagem foi validada com dados de campo para uma malha *offshore* em operação, apresentando resultados coerentes para os parâmetros estimados, bem como robustez a medidas não representativas nos sensores. Estas são as principais contribuições da Tese.

Palavras-chave: *malha de gasodutos, gás natural, estimação de estado, transiente, térmico*

SUMÁRIO

Lista de Figuras vii

Lista de Tabelas xiii

Lista de Símbolos xv

Lista de Publicações xxi

Artigos publicados em conferência . . . xxi

Capítulo de livro publicado . . . xxi

1 Introdução 1

1.1 Malha *offshore* . . . 4

1.2 Estimação de estado . . . 7

1.3 Objetivos . . . 9

1.4 Estrutura da tese . . . 10

2 Revisão bibliográfica 13

2.1 Modelo de escoamento . . . 13

2.2 Solução do modelo . . . 17

2.3 Escoamento em malha . . . 19

2.4 Estimação de estado . . . 21

2.5 Filtro de Kalman . . . 24

2.6 Simuladores em tempo real . . . 27

2.7 Conclusões da revisão bibliográfica . . . 28

3 Modelo de escoamento **29**

3.1 Malha de gasodutos 29

3.2 Equações de conservação 30

3.3 Equações de fechamento 32

3.3.1 Massa molar 32

3.3.2 Compressibilidade do gás natural 33

3.3.3 Entalpia 33

3.3.4 Viscosidade 34

3.3.5 Fator de atrito 35

3.3.6 Troca térmica 36

3.4 Condições de contorno e iniciais 37

3.5 Nós intermediários 38

3.6 Equações algébricas 39

3.6.1 Alteração de variáveis 40

3.6.2 Alocação das variáveis 41

3.6.3 Conservação de massa 41

3.6.4 Conservação da quantidade de movimento 42

3.6.5 Conservação da energia 42

3.6.6 Conservação de espécies 42

3.6.7 Nós intermediários 42

3.6.8 Condições de contorno 43

3.7 Equações na forma matricial 43

3.8 Método numérico 43

3.9 Eficiência e precisão do modelo proposto 44

4 Estimação de estado **45**

4.1 Estimação 45

4.2 Fundamentação 46

4.3 Filtro estendido de Kalman 48

4.4 Algoritmo de estimação 49

5 Resultados **53**

5.1 Considerações gerais sobre o modelo de escoamento com cálculo térmico 54

5.2 Modelo de escoamento 58

5.2.1 Zhou e Adewumi(2000) 59

5.2.2 Chaczykowski (2010) 61

5.2.3 Pambour (2016) 63

5.3 Malhas físicas 67

5.3.1 Malha 1 67

5.3.2 Malha 2 70

5.4 Estimação de estado na literatura 73

5.4.1 Modisette et al. (2013) 74

5.4.2 Durgut e Leblebicioğlu (2016) 76

5.5 Gasodutos e malhas *offshore* 77

5.5.1 Gasoduto em águas profundas 78

5.5.1.1 Sem estimação isotérmico 80

5.5.1.2 Sem estimação 82

5.5.1.3 Estimação de estado com modelo isotérmico 84

5.5.1.4 Estimação de estado com cálculo térmico 87

5.5.1.5 Estimação de estado e parâmetro com modelo isotérmico 89

5.5.1.6 Estimação de estado e um parâmetro com cálculo térmico 92

5.5.1.7 Estimação de estado e dois parâmetros independentes 94

5.5.1.8 Comparativo dos perfis estimados para os diferentes parâmetros propostos 98

5.5.1.9 Comparativo para diferentes valores de coeficiente global de troca térmica . . . 102

5.5.1.10 Avaliação da covariância . . . 104

5.5.1.11 Conclusões para caso do gasoduto . . . 107

5.5.2 Malha em Y . . . 108

5.5.2.1 Estimação da rugosidade . . . 110

5.5.2.2 Estimação da rugosidade e troca térmica . . . 112

5.5.2.3 Comparativo entre estimação de um ou dois parâmetros com transientes . . . 116

5.5.3 Gasoduto *onshore* . . . 119

5.5.4 Dados de campo . . . 122

5.6 Dificuldades encontradas . . . 130

5.6.1 Parâmetros . . . 131

5.6.2 Incertezas . . . 131

6 Conclusões **133**

6.1 Conclusões . . . 133

6.2 Recomendações . . . 135

Referências **137**

Apêndice A – Filtro de Kalman **143**

A.1 Formulação para sistemas lineares . . . 144

A.2 Formulação para sistemas não lineares . . . 146

A.3 Medidas disponíveis de forma discreta no tempo . . . 148

Apêndice B – Modelo de escoamento **151**

B.1 Transformação de variáveis . . . 151

B.1.1 Conservação de massa . . . 152

B.1.2 Conservação da quantidade de movimento 153
B.1.3 Conservação da energia 154
B.1.4 Conservação de espécies 154
B.2 Discretização das equações de conservação 155
B.2.1 Discretização da geometria de escoamento 156
B.2.2 Conservação da massa 157
B.2.3 Conservação da quantidade de movimento 158
B.2.4 Conservação da energia 160
B.2.5 Conservação das espécies 162
B.3 Condições de contorno 162
B.3.1 Pressão definida 163
B.3.2 Vazão definida 163
B.3.3 Temperatura e composição 163
B.4 Equipamentos submarinos 164
B.4.1 Conservação de massa 164
B.4.2 Conservação da energia 165
B.4.3 Conservação de especies 166

Apêndice C – Método Numérico **167**

Apêndice D – Equação de Peng - Robinson **171**

LISTA DE FIGURAS

Figura - 1.1 Malha de gasodutos brasileira (VASCONCELOS et al., 2013). 3
Figura - 1.2 Malha de gasodutos em operação no Mar do Norte (HANMER et al., 2012). 5
Figura - 1.3 Exemplo de sistema de gestão de escoamento em malha (AL-RASHEED et al., 2011). 6
Figura - 2.1 Volume de controle típico para uso de MVF. 18
Figura - 2.2 Volume de controle para um nó de junção. 20
Figura - 3.1 Configuração construtiva típica de um gasoduto. 37
Figura - 3.2 Configuração de um nó intermediário com três dutos conectados. 39
Figura - 3.3 Disposição das variáveis na geometria de escoamento. 41
Figura - 4.1 Fluxograma para a estimação de estado. 51
Figura - 5.1 Comparativo do perfil de temperatura num gasoduto *onshore* típico a depender do modelo térmico adotado. 55
Figura - 5.2 Comparativo do perfil de pressões num gasoduto *onshore* típico a depender do modelo térmico adotado. 56
Figura - 5.3 Comparativo do perfil de temperaturas num *riser* típico a depender do modelo térmico adotado. 57
Figura - 5.4 Comparativo do perfil de pressões num *riser* típico a depender do modelo térmico adotado. 57
Figura - 5.5 Geometria típica de um *riser* de exportação *offshore* em LDA profunda. . . 58
Figura - 5.6 Gasoduto em estudo por Zhou e Adewumi (2000). 59
Figura - 5.7 Fluxo mássico na saída do gasoduto por Zhou e Adewumi (2000). 60
Figura - 5.8 Resultados do modelo para problema em Zhou e Adewumi (2000). 60
Figura - 5.9 Malha de gasoduto em estudo por Chaczykowski (2010). 61
Figura - 5.10 Temperatura de entrada para problema proposto por Chaczykowski (2010). 62
Figura - 5.11 Vazão de saída para problema proposto por Chaczykowski (2010). 62

Figura - 5.12 Tendência de vazão comparada a Chaczykowski (2010). 63
Figura - 5.13 Tendência de vazão comparada a Chaczykowski (2010) e Abbaspour e Chapman (2008). 64
Figura - 5.14 Gasoduto em estudo por Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016). 64
Figura - 5.15 Pressão definida no nó 1 para problema proposto por Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016). 65
Figura - 5.16 Vazões definidas nos nós 2 e 3 para problema proposto por Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016). 66
Figura - 5.17 Resultados do modelo para problema apresentado em Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016). 66
Figura - 5.18 Desenho esquemático dos gasodutos que compõem a malha 1. 67
Figura - 5.19 Geometria dos gasodutos que compõem a malha 1. 68
Figura - 5.20 Perfil de temperatura no mar em função da profundidade. 68
Figura - 5.21 Comparativo da tendência de pressão para o modelo de malha 1. 69
Figura - 5.22 Comparativo da diferença entre a pressão prevista e a medida com diferentes abordagens térmicas para o modelo de malha 1. 70
Figura - 5.23 Desenho esquemático dos gasodutos que compõem a malha 2. 71
Figura - 5.24 Geometria dos gasodutos que compõem a malha 2. 71
Figura - 5.25 Vazão de exportação nas diferentes UEPs para malha 2. 72
Figura - 5.26 Comparativo da tendencia de pressão na Malha 2. 73
Figura - 5.27 Desenho do gasoduto em estudo por Modisette et al. (2013). 74
Figura - 5.28 Tendências do estado estimado para caso similar a Modisette et al. (2013). 75
Figura - 5.29 Resíduo normalizado para caso similar a Modisette et al. (2013). 76
Figura - 5.30 Tendências de pressão medidas e estimadas para caso similar a Durgut e Leblebicioğlu (2016). 77
Figura - 5.31 Tendências dos parâmetros estimados para caso similar a Durgut e Leblebicioğlu (2016). 78
Figura - 5.32 Desenho do gasoduto simples para avaliações. 78
Figura - 5.33 Geometria do gasoduto simples. 79
Figura - 5.34 Tendência de resíduo para simulação sem estimação em modelo isotérmico. 81

Figura - 5.35 Resíduo para modelo térmico sem estimação para caso de gasoduto. 83
Figura - 5.36 Resíduo para modelo isotérmico com estimação de estado para caso de gasoduto. 85
Figura - 5.37 Histograma do resíduo para caso de gasoduto com estimação e cálculo isotérmico. 86
Figura - 5.38 Resíduo para modelo térmico com estimação de estado para caso de gasoduto. 87
Figura - 5.39 Norma da matriz de covariância para o caso de gasoduto com estimação de estado. 88
Figura - 5.40 Histograma do resíduo para caso de gasoduto com estimação de estado para modelo térmico. 89
Figura - 5.41 Resíduo para modelo isotérmico com estimação de um parâmetro para caso de gasoduto. 90
Figura - 5.42 Histograma do resíduo para caso de gasoduto para modelo isotérmico com estimação de um parâmetro. 91
Figura - 5.43 Rugosidade estimada para caso de gasoduto com modelo isotérmico. 91
Figura - 5.44 Resíduo para caso com estimação de parâmetro térmico para caso de gasoduto. 92
Figura - 5.45 Histograma do resíduo para caso de gasoduto com cálculo térmico e estimação de um parâmetro. 93
Figura - 5.46 Rugosidade estimada para caso de gasoduto para caso com estimação de um parâmetro. 94
Figura - 5.47 Resíduo para modelo térmico com estimação de dois parâmetros. 95
Figura - 5.48 Histograma do resíduo para caso de gasoduto com modelo térmico e estimação de dois parâmetros. 96
Figura - 5.49 Rugosidade estimada para caso com estimação de dois parâmetros para caso de gasoduto. 96
Figura - 5.50 Troca térmica estimada para caso com estimação de dois parâmetros para caso de gasoduto. 97
Figura - 5.51 Norma da matriz de covariância para caso com estimação em gasoduto com dois parâmetros. 98

Figura - 5.52 Comparativo do desvio médio quadrático entre modelo isotérmico e com cálculo térmico para caso de gasoduto. 99

Figura - 5.53 Comparativo da rugosidade estimada entre modelo isotérmico e com cálculo térmico para caso de gasoduto. 99

Figura - 5.54 Comparativo de diferentes perfis de pressão para diferentes abordagens para caso de gasoduto. 100

Figura - 5.55 Comparativo de diferentes perfis de temperatura para diferentes abordagens para caso de gasoduto. 101

Figura - 5.56 Rugosidade estimada para gasodutos a depender do coeficiente global de troca térmica para caso de gasoduto. 102

Figura - 5.57 Comparativo de diferentes perfis de pressão para diferentes trocas térmicas para caso de gasoduto. 103

Figura - 5.58 Comparativo de diferentes perfis de temperatura para diferentes trocas térmicas para caso de gasoduto. 104

Figura - 5.59 Resíduo normalizado para caso de gasoduto. 105

Figura - 5.60 Norma euclidiana da matriz de covariância para caso de gasoduto e modificação da matriz de covariância. 106

Figura - 5.61 Rugosidades internas estimadas para diferentes abordagens na matriz de covariância. 106

Figura - 5.62 Coeficientes globais de troca térmica estimados para diferentes abordagens na matriz de covariância. 107

Figura - 5.63 Desenho esquemático da malha em Y. 108

Figura - 5.64 Valores de vazão nas extremidades para malha em Y. 109

Figura - 5.65 Geometria da malha em Y. 109

Figura - 5.66 Valores de Pressão para malha em Y. 110

Figura - 5.67 Valores de temperatura para malha em Y. 111

Figura - 5.68 Resíduo para malha de gasoduto com estimação de um parâmetro. 112

Figura - 5.69 Histograma do resíduo para modelo térmico e estimação de um parâmetros. 113

Figura - 5.70 Rugosidade estimada para malha de gasoduto com estimação de um parâmetro. 113

Figura - 5.71 Resíduo para malha de gasoduto com estimação de dois parâmetros. 114
Figura - 5.72 Histograma do resíduo para modelo térmico e estimação de dois parâmetros. 115
Figura - 5.73 Rugosidade estimada para malha de gasoduto com estimação de dois parâmetros. 115
Figura - 5.74 Coeficiente global de troca térmica estimado para malha em Y com estimação de dois parâmetros. 116
Figura - 5.75 Resíduo de pressão numa malha em Y, a depender da quantidade de parâmetros estimados. 117
Figura - 5.76 Histograma do resíduo na pressão para modelo térmico e estimação de dois parâmetros. 117
Figura - 5.77 Pressão estimada no PLEM para malha em Y. 118
Figura - 5.78 Temperatura estimada no PLEM para malha em Y. 119
Figura - 5.79 Comportamento dos parâmetros estimados para gasoduto *onshore*. 120
Figura - 5.80 Comparativo de pressão intermediaria estimada para cada uma das abordagens num gasoduto *onshore*. 121
Figura - 5.81 Histograma do resíduo para caso de gasoduto *onshore*. 121
Figura - 5.82 Desenho esquemático da malha com dados de campo. 122
Figura - 5.83 Vazões praticadas no caso com dados de campo. 124
Figura - 5.84 Pressões praticadas para caso com dados de campo. 124
Figura - 5.85 Temperaturas praticadas para caso com dados de campo. 125
Figura - 5.86 Resíduo normalizado para caso com dados de campo. 126
Figura - 5.87 Rugosidades estimadas para caso com dados de campo. 127
Figura - 5.88 Coeficientes globais de troca térmica estimados para caso com dados de campo. 128
Figura - 5.89 Comparativo de pressão de exportação medidas e estimadas para caso com dados de campo. 129
Figura - 5.90 Comparativo de temperaturas de importação medidas e estimadas para caso com dados de campo. 129
Figura - 5.91 Norma euclidiana da matriz de covariância para caso com dados de campo. 130
Figura - B.1 Esquema de índice das variáveis num volume de controle. 155

Figura - B.2 Esquema de colocação de variáveis numa geometria composta por 5 pontos. 156

Figura - B.3 Volume de controle para discretização da equação de conservação de massa. 157

Figura - B.4 Volume de controle para discretização da equação de conservação da quantidade de movimento. 158

Figura - B.5 Volume de controle para discretização da equação de conservação de massa para nó intermediário. 165

Figura - C.1 Fluxograma para cálculo das variáveis de escoamento. 170

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Propriedades dos componentes do gás natural. 32

Tabela 5.1 Casos modelados 55

Tabela 5.2 Propriedades da malha 1 de gasodutos. 69

Tabela 5.3 Diferenças na estimativa dos perfis de pressão e temperatura, para diferentes abordagens na modelagem e estimação de parâmetros. 101

Tabela 5.4 Diferenças na estimativa do perfil de pressão e temperatura com relação a informação original, para diferentes trocas térmicas ou estimação deste parâmetro. 103

Tabela 5.5 Composição das correntes para malha em Y. 110

Tabela 5.6 Composição da malha para caso com dados de campo. 123

Tabela B.1 Modelo de tabela para informações da geometria de escoamento. 157

LISTA DE SÍMBOLOS

As seguintes listas descrevem diferentes grupos de variáveis utilizadas no texto. São variáveis do modelo de escoamento, de índices para estas variáveis do modelo de escoamento, do filtro de Kalman, de índices para o filtro de Kalman e, finalmente, das siglas utilizadas.

Para o filtro de Kalman são tratados escalares como letras minusculas, vetores como letras minusculas em negrito e matrizes como letras maiúsculas.

Modelo de escoamento

$\Delta\mu_i$	Modificação na viscosidade do gás pelo contaminante	-
$\dot{Q}$	Troca térmica	W/m^2
$\dot{n}$	Vazão molar do gás	$kmol/s$
$\dot{n}_i$	Vazão molar no ponto i	$kmol/s$
γ_{gMix}	Massa específica do gás	kg/m^3
$\hat{v}$	Valor estimado pelo filtro de Kalman	-
$\mu_{1atm}^{uncorrected}$	Viscosidade do gás a pressão atmosférica sem modificação	Pa s
μ_{1atm}	Viscosidade do gás a pressão atmosférica	$Pa\,s$
ϕ	*Offset de medição*	-
ρ	Massa específica do gás	kg/m^3
σ	Incerteza associada a medida	-
$\sum \dot{n}_{in}$	Vazão molar de entrada no nó intermediaria	kmol/s
$\sum \dot{n}_{out}$	Vazão molar de saída no nó intermediaria	kmol/s
θ	Ângulo com a horizontal	rad
φ	Fugacidade do gás real	Pa

$_I$	Índice que indica nó interpolado	-
$_i$	Índice que indica nó em avaliação	-
A	Area de seção transversal	m^2
A_i	Constantes para cálculo da viscosidade do gás	-
A_{sup}	Área superficial para a troca térmica	m^2
$C_{j,i}$	Constantes para cálculo da entalpia ideal	-
D	Diâmetro interno	m
f	Fator de fricção	-
g	aceleração da gravidade	$9{,}81\, m/s^2$
h	Entalpia específica	J/kg
h^{res}	Entalpia residual da mistura	kJ/kg
h_i^{ideal}	Entalpia ideal do componente	kJ/kg
M_w	Massa molar do gás natural	$kg/kmol$
M_{w_i}	Massa molar do componente	$kg/kmol$
P	Pressão	Pa
P_c	Pressão crítica do componente	bar
P_i	Pressão no ponto i	bar
P_{P_r}	Pressão pseudo reduzida	-
Q_i	Vazão volumétrica em condições de referência no ponto i	$MM\ Nm^3/d$
R	Constante universal dos gases	$8314{,}4621\, kJ/K\ kmol$
s	Posição axial no duto	m
T	Temperatura	$°C$
t	Tempo	s
T_c	Temperatura crítica do componente	$°C$

T_{amb}	Temperatura ambiente no exterior do duto	$°C$
T_{P_r}	Temperatura pseudo reduzida	-
T_{Rref}	Temperatura de referência para o gás	$°C$
U	Coeficiente global de troca térmica	W/m^2K
u	Velocidade axial do gás	m/s
v	Valor de referência	-
Vol_i	Volume definido para o nó intermediário	-
X	Composição do fluido	-
X_i	Fração molar do componente i	-
z	Compressibilidade do gás	-
ε	Rugosidade interna do duto	m

Variáveis para filtro de Kalman

p	Parte do vetor de estado com parâmetros estimados
v	Parte do vetor de estado com variáveis de escoamento
x	Vetor de estado
F	Matriz de evolução do estado
I	Matriz identidade
m	Quantidade de variáveis de escoamento a serem calculadas
n	Quantidade de parâmetros a serem estimados
u	Vetor de controle
$\mathbf{z}_{t+1}$	Vetor de observação
B	Matriz de controle
H_{t+1}	Matriz de observação
K	Matriz do ganho de Kalman

Q Matriz de ruído do modelo

R Matriz do ruído das medidas

S Matriz do resíduo da covariância

v Ruído na observação

w Ruído no processo

$\tilde{\mathbf{y}}_{t+1}$ Vetor de resíduo da medição

F Matriz jacobiana da evolução

H Matriz jacobiana da observação

Siglas

Cv Coeficiente de vazão

Re Número de *Reynolds*

AGA *American gas association*

API *American petroleum institute*

EDP Equações diferenciais parciais

EnKF *Ensemble Kalman filter*

EnKS *Ensemble Kalman smoother*

FEK Filtro estendido de Kalman

GNL Gás natural liquefeito

HUB Unidade que recebe e destina diferentes correntes de gás

ILT *In line T*

LDA Lâmina d'agua

LU *Lower-Upper*, método numérico para inversão de matrizes

MDF Método das diferenças finitas

MEF Método dos elementos finitos

MMQ Método dos mínimos quadrados

MVF Método dos volumes finitos

PLEM *Pipeline end manifold*

PLET *Pipeline end terminal*

PMS *Pipeline management system*

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*

SDV *Shut down valve*

UEP Unidade estacionaria de produção

UKF *Unscented Kalman filter*

UTG Unidade de tratamento de gás

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Artigos publicados em conferência

ROTAVA, E.; TRIGO, F. C.; BALIÑO, J. L. Assessment of Uncertainties and Parameter Estimation in a Offshore Gas Pipeline *DINAME 2017*, 2017.

Capítulo de livro publicado

Rotava, E., Trigo, F. C. & Baliño, J. L., "Assessment of Uncertainties and Parameter Estimation in a Offshore Gas Pipeline" (doi:10.1007/978-3-319-91217-2_39), *Proceedings of DINAME 2017*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, (Fleury A., Rade D., Kurka P. (eds)), pp. 551-562, Springer, Cham, 2019.

1 INTRODUÇÃO

Óleo e gás natural são importantes fontes de energias fosseis, com grande relevância na economia mundial (DEHDAR et al., 2017). Em se tratando de transporte, estes dificilmente são substituíveis por fontes de energia renováveis pelo fato de estas em geral serem convertidas em eletricidade, sendo as fontes não renováveis responsáveis por 81% da energia primária consumida no mundo (GLOBAL, 2017).

O transporte de óleo, quando comparado ao do gás natural, é simples e seguro, podendo ser feito com a utilização de transportadores ou dutos. O valor de energia disponível por volume do óleo também é significativamente superior ao do gás natural. Por estes motivos o óleo cru ainda é a fonte de energia primária mais utilizada no mundo, respondendo por uma fração de 33% (GLOBAL, 2017).

O gás natural, assim como o óleo cru, é formado por diferentes cadeias de hidrocarbonetos. Entretanto, por estas cadeias serem mais curtas, se apresenta em forma gasosa para as condições de referência. Dessa forma, são de difícil estocagem, com risco intrínseco maior e de complexo transporte a granel.

Tal complexidade tem sido vencida com a utilização de refrigeração em um conceito conhecido com gás natural liquefeito (GNL), no qual o gás natural é transportado como líquido numa temperatura de $-146\,°C$ através de navios criogênicos, sendo este modal de crescente importância na economia mundial. Atualmente esta liquefação é realizada apenas em terra ou em águas rasas, com o transporte acontecendo via mar, terminando numa regaseificação do gás natural em outro terminal terrestre (METELSKA et al., 2016).

Por outro lado, o gás natural é visto como uma alternativa com menor impacto ambiental quando comparado ao óleo cru ou carvão mineral, pela queima mais fácil em condições ideais e menor conteúdo de enxofre. Além disso, na extração de petróleo dos reservatórios sempre existe a produção de gás natural quando da produção de óleo cru em configuração onde o gás é dito associado ou a produção de condensado quando da produção de gás natural, onde o gás é dito não associado.

Com o aumento do valor associado a energia e a crescente regulação ambiental demandada pela dita economia de baixo carbono, o gás natural tem encontrado maior utilização na economia mundial, mesmo com a necessidade de infraestrutura específica para seu transporte até o consumo, sendo atualmente a terceira maior fonte de energia primária (GLOBAL, 2017).

São diversos os atores envolvidos na cadeia do gás natural. Temos unidades produtoras de gás, UEPs, que retiram o hidrocarboneto dos reservatórios, unidades de tratamento de gás, UTGs, que separam em diferentes correntes o gás produzido, gasodutos de transferência, que escoam gás ainda não pronto para o uso, gasodutos de transporte, que escoam gás já processado, consumidores, que utilizam as diferentes correntes separadas nas UTG e estações de recompressão, que aumentam a pressão no escoamento nos gasodutos.

Para este transporte entre os diferentes pontos envolvidos na cadeia do gás natural em geral são utilizados gasodutos. Estes gasodutos nada mais são que tubos de aço onde numa das extremidades o gás é colocado para ser retirado na outra. Pela grande quantidade de estruturas independentes envolvidas pode ser interessante a utilização de uma malha de gasodutos integrada, onde em algumas extremidades o gás natural é colocado e em outras retirado, com equipamentos de controle intermediários como válvulas e estações de compressão.

A instalação de gasodutos é feita através da soldagem de tubos de $12\,m$ de comprimento até que se obtenha o comprimento desejado do duto. A esta união entre tubos dá-se o nome de junta de campo. Dependendo das características desejadas para o duto são aplicadas diferentes técnicas para a junta de campo e a conformação dos tubos.

As características construtivas como diâmetro, espessura, material e técnica de fabricação destes gasodutos dependem de fatores como pressão de operação ou composição do gás natural transportado, e podem variar dependendo das condições de operação. Outras propriedades dos gasodutos como isolamento térmico e rugosidade interna são dependentes da forma de construção e podem, ainda, variar conforme operação do equipamento.

No mundo encontramos mais de $3\,600\,000\,km$ de dutos para transporte de hidrocarbonetos e outras formas de energia, sendo um total de mais $2\,700\,000\,km$ somente de gasodutos (ISOM et al., 2018). A maior parte destes dutos se encontra em aplicações terrestres nos Estados Unidos e Europa. Mas podem ser encontradas instalações em todo o mundo e também em aplicações *offshore*. No Brasil existem mais de $10\,000\,km$ de gasodutos em operação, com uma grande quantidade de unidades envolvidas.

A Fig. 1.1 apresenta as malhas de gasodutos terrestres no Brasil, mostrando a comple-

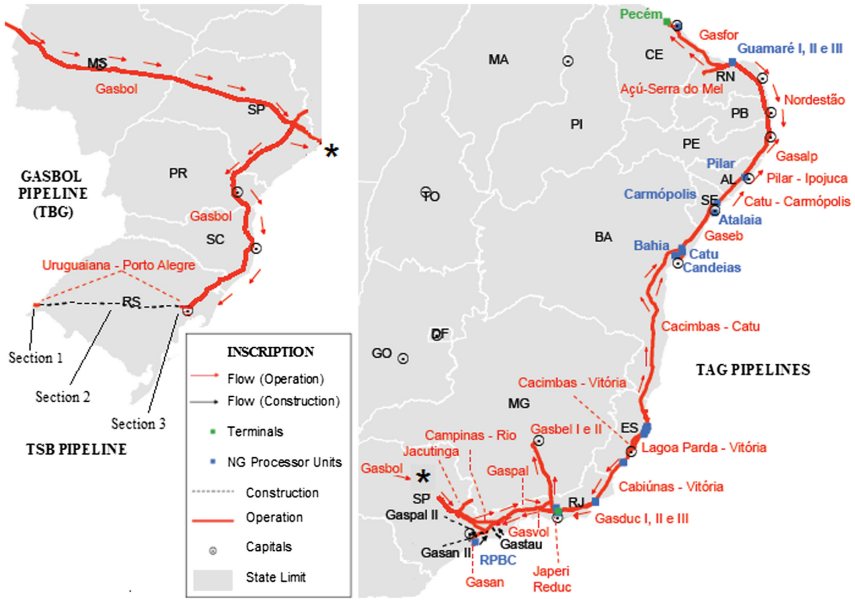


Figura 1.1: Malha de gasodutos brasileira (VASCONCELOS et al., 2013).

xidade e tamanho desta. Uma vez instalado, um gasoduto opera na dependência das condições em suas extremidades, com influência de cada extremidade nas demais. Uma boa colocação das condições das extremidades é fundamental para um melhor aproveitamento da capacidade de escoamento da malha.

Para a colocação destas condições de forma mais conveniente e otimizada existe a figura de um operador da malha, ou gestor, que faz a interface entre os diversos envolvidos com o objetivo de maximizar a continuidade operacional e de transportar a quantidade adequada de gás natural. Como existe a possibilidade de eventos inesperados, esta é uma atuação constante.

A malha de gasodutos é instrumentada em diferentes pontos, e costuma ter informações quanto a pressão e temperatura em uma grande quantidade de locais, e vazão e composição do gás numa quantidade menor de pontos. A disposição desta instrumentação depende de aspectos contratuais e operacionais da malha de gasodutos.

Estas medidas de campo são realizadas por diferentes equipamentos, com diferente precisão do valor obtido. Informações a respeito de pressão e temperatura tem alta precisão, enquanto que vazão tem precisão menor, por depender de outras informações para cálculo. Estas informações são transmitidas a operadora da malha para acompanhamento e registro.

A fim de se obter uma atuação adequada a operadora utiliza modelos computacionais integrados às medidas disponíveis para o acompanhamento da condição atual do escoamento e predição de impactos de eventuais variações nos demais pontos da malha (REED et al., 2006) (SUDJATMIKO et al., 2009) (AL-RASHEED et al., 2011). A depender dos eventos esperados,

são demandadas alterações nas condições de diferentes plantas, como redução ou aumento da vazão de gás natural trabalhada.

Tanto os atores que colocam o gás na malha quanto os que retiram este gás da malha eventualmente têm problemas operacionais com variação da vazão de gás natural trabalhada, o que impossibilita o escoamento numa malha de gasodutos de atingir algum regime permanente. Este comportamento dificulta a obtenção de períodos estáveis nos quais seria possível se determinar propriedades-macro da malha.

1.1 Malha *offshore*

Apesar de a maior parte dos gasodutos no Brasil e no mundo serem localizados em terra, também existem malhas de gasodutos *offshore*. Esta configuração é utilizada para transporte de gás natural entre países ou para escoar a produção *offshore*, como é o caso do Mar do Norte, por exemplo, onde existem gasodutos com estes dois objetivos. A Fig. 1.2 mostra a malha de gasodutos *offshore* do Mar do Norte, operado pela Gascoo.

No Brasil, os gasodutos *offshore* tem por objetivo levar o gás produzido em alto mar para seu processamento e consumo em terra, em diferentes bacias produtoras. Atualmente, está sendo construída uma malha para o gás natural associado produzido no pré-sal, com mais de $1\,000\,km$ de extensão e capacidade de escoamento de $45\,MM\,Nm^3/d$, o que é significativo para um pais que consome cerca de $70\,MM\,Nm^3/d$.

A unidade considerada para escoamento de gás no Brasil é o metro cubico em condições normais Nm^3. Isto se dá por questões legais, e significa o volume ocupado pelo gás a $20\,°C$ e $1\,atm$, ou em condições normais. Esta informação é relacionada à massa do gás a partir de sua massa molécula, ou pode ser relacionada a quantidade de moléculas, visto que o volume ocupado pelo gás a baixa pressão depende somente da sua quantidade de moles.

Para vazão de gás natural é utilizada a unidade Nm^3/d, que é um valor bastante baixo, então são utilizados o milhar de metros cúbicos em condição normal por dia $M\,Nm^3/d$ ou o milhão de metros cúbicos em condição normal por dia $MM\,Nm^3/d$. Apesar de esta nomenclatura não ser coerente com sistemas de unidades mais tradicionais, são utilizadas no Brasil por questões legais.

Apesar de similar às malhas *onshore*, as malhas *offshore* têm algumas diferenças que tornam a sua operação mais complexa e, por vezes, com maiores impactos. A presença de estações de recompressão é quase que inviabilizada, dado que em geral não existe espaço e

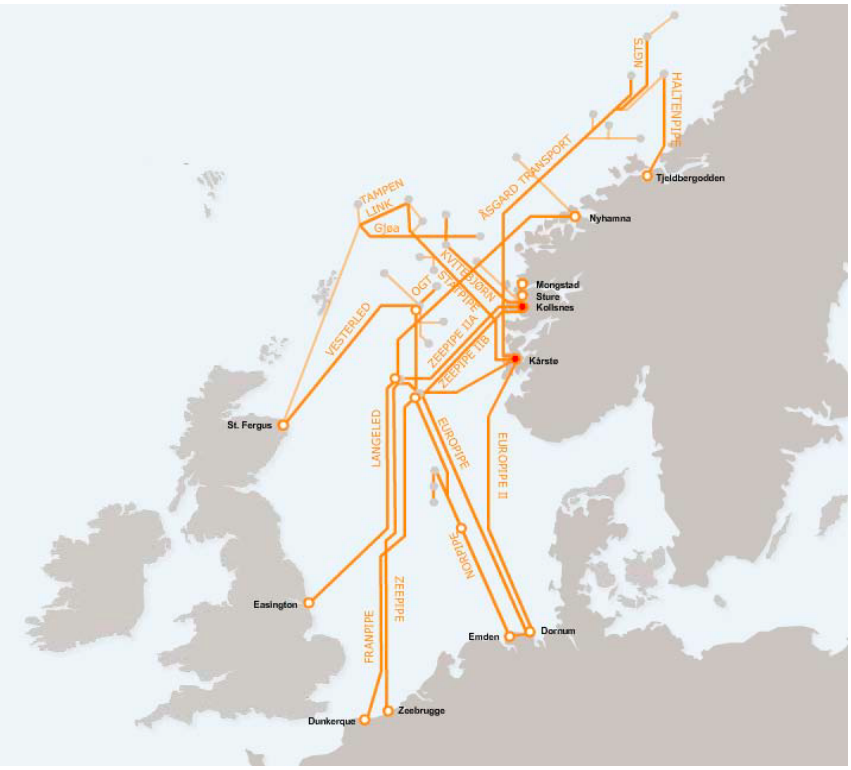


Figura 1.2: Malha de gasodutos em operação no Mar do Norte (HANMER et al., 2012).

capacidade de carga disponível na infraestrutura existente. Outro ponto é a disposição da instrumentação, muito mais esparsa, em geral disponível apenas nos pontos de entrada e saída de gás dos dutos.

Por se tratar de escoamento com gás natural não processado, podem acontecer mudanças de fases com a formação de condensado no interior dos gasodutos, que inclusive podem se manter estáveis em baixas pressões. Além disso, existem pontos de mistura de gás sem controle direto, o que pode levar a uma variação da composição do gás retirado da malha de forma não controlada.

Uma malha de gasodutos *offshore* possui, em geral, dois tipos de envolvidos com relevância. O primeiro são as unidades estacionarias de produção (UEPs), que produzem óleo e gás natural, e exportam parte do gás produzido ou importam gás para a geração elétrica, a depender do fluido produzido. Estas UEPs podem também receber correntes provenientes de gasodutos e destinar as diferentes correntes para outros dutos, numa configuração denominada HUB. Segundo, mas não menos importantes, são as unidades de tratamento de gás (UTGs), que recebem o gás, processam e separam diferentes correntes do gás natural para comercialização, como o gás natural veicular, o GLP e o condensado estabilizado, entre outros.

Diferentes gasodutos podem também ser ligados através de equipamentos submarinos denominados *pipeline end manifolds* (PLEMs), onde não existe um controle direto das vazões

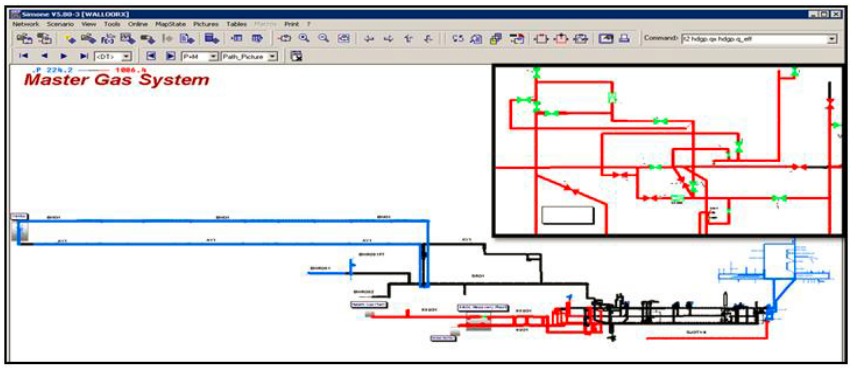


Figura 1.3: Exemplo de sistema de gestão de escoamento em malha (AL-RASHEED et al., 2011).

de cada uma das correntes e estas são definidas pela dinâmica do escoamento. Por vezes as correntes têm características diferentes e esta mistura deve ser feita respeitando-se determinadas proporções a fim de se especificar a composição final do gás para a chegada na UTG.

As UEPs se localizam sobre o campo a ser produzido, enquanto que as UTGs se encontram em terra, com comunicação à malha de gasodutos terrestre. A depender da localização dos campos, estes gasodutos podem atingir mais de $300\ km$ de comprimento, em lâmina d'água (LDA), profunda, o que leva o escoamento a uma grande variação das condições de escoamento como a pressão e a temperatura do gás natural.

Estas características, aliadas ao fato de uma indisponibilidade da malha de gasodutos levar a uma redução da produção de gás natural associado, o que leva a uma redução da produção de óleo das plataformas, traz consigo uma criticidade na operação de malhas de gasodutos *offshore*. Neste cenário se faz o uso de modelos e simuladores para a operação da malha.

Estes modelos consideram equações para o escoamento do gás natural, com simplificações a depender do cenário. Em geral são utilizadas equações de conservação de massa e quantidade de movimento unidimensionais com condições de contorno definidas pelas medidas disponíveis, permitindo uma inferência sobre as condições de escoamento intermediárias à instrumentação e uma previsão de comportamento futuro para um determinado evento.

A Fig. 1.3 mostra uma solução comercial para o acompanhamento de uma malha de gasodutos *offshore*, que integra medidas de campo disponibilizadas em tempo real e um modelo de escoamento para a malha de gasodutos, calculando propriedades intermediárias nos dutos como pressão e temperatura, e com a possibilidade de previsão de comportamento futuro para cenários pré-determinados.

Entretanto, a baixa quantidade de medidas e sua localização próxima apenas as extremidades dos dutos tornam imprecisa a aplicação de modelos diretamente. Outro fator que

dificulta esta aplicação direta é a imprecisão das medidas, uma vez que são feitas com fluido não estabilizado e com possibilidade de troca de fases (DANDREA, 2015). De forma similar, nas demais malhas de gasodutos, não é atingido regime permanente, o que permitiria uma inferência sobre parâmetros globais relacionados a perda de carga e troca térmica.

Uma das possibilidades para se contornar estas dificuldades é a utilização de procedimentos estatísticos para conseguir um valor mais adequado de parâmetros de escoamento, com o uso de medidas redundantes de propriedades do escoamento não aplicadas diretamente ao modelo de escoamento, com a possibilidade de discernir entre as informações adequadas e as menos confiáveis a partir do próprio histórico de operação da malha de gasodutos.

1.2 Estimação de estado

Variável de estado é uma das variáveis de um sistema utilizada para descrever a condição deste. O estado pode ser definido como uma condição particular de um sistema num determinado momento ou é a condição em que uma série de variáveis de estado se encontra (PALM, 2005).

Estimação de estado é a denominação dada à área do conhecimento que visa inferir o estado atual de um sistema a partir do conhecimento de sequências de entradas e saídas, ou de estimar o comportamento do estado interno de um processo que não é diretamente mensurável ou acessível.

A estimação de estado mais antiga é descrita pelo Método dos mínimos quadrados (MMQ) (SORENSON, 1970), onde a partir de uma série de pontos e cálculo matricial é ajustada uma função onde a distância entre a função e os pontos é minimizada. O formato da função depende da teoria envolvida, mas conta com algumas variáveis para ajuste, suportadas por uma teoria cabível ao problema analisado.

Este conceito pode ser utilizado também para problemas de escoamento em malha de gasodutos, onde um objetivo é colocado para a malha como um todo e informações disponíveis são utilizadas para conseguir condições mais próximas aos objetivos.

Uma forma de estimação de estado utilizada em modelo de escoamento é minimizar o desvio entre medidas e estimativas de pressão e vazão, cada qual com um peso diferente, como forma de se utilizar estas duas informações nos modelos de escoamento e, com isso, conseguir uma maior tolerância a desvios nas medidas e imprecisões do modelo.

O filtro de Kalman é uma ferramenta estocástica eficiente para a estimação, pois tra-

balha minimizando o desvio quadrático entre estimativas e medidas. Ele é aplicado quando o sistema possui modelo dinâmico, mais especificamente quando o sistema é observável, como sinais ou medidas, e através delas propõem uma melhor estimativa para as variáveis de estado. Estas estimativas podem ser feitas tanto para o presente quanto para o futuro.

Para sua utilização, além do estado e de um modelo da dinâmica do sistema, se faz necessária a definição de informações complementares referentes às incertezas tanto na planta (processo) quanto nas observações (medidas dos sensores).

O algoritmo funciona basicamente em duas etapas. Inicialmente ele faz a predição do estado, com a utilização do modelo de dinâmica do sistema, condições de estado anteriores e informações externas de controle. Esta etapa pode ser feita inclusive para cenários futuros, sem a necessidade de se esperar informações adicionais.

A segunda etapa é descrita como atualização, onde o estado gerado pela predição é comparado com medidas de campo, e então o estado é corrigido a partir das diferenças encontradas e a precisão das medidas é atualizada conforme o desvio entre condição predita e medida.

O problema de escoamento em tubulações é não linear, e desta forma o filtro de Kalman não pode ser aplicado diretamente. Algumas variações para sistemas não lineares são disponíveis como o filtro de Kalman estendido (FEK), o *Unscented Kalman filter* (UKF), o *Ensemble Kalman smoother* (EnKS) ou *Ensemble Kalman filter* (EnKF). O FEK pode ser visto como a forma mais similar ao filtro original, porém a linearização é feita em torno da última estimativa do estado, o que torna seu custo computacional maior.

Assim, para o escoamento de gás natural em malha de gasoduto, apesar de não ser atingido o regime permanente, com a utilização deste filtro é possível se obter o estado correspondente aos parâmetros e condições de escoamento, bastando acessar as medidas num intervalo de tempo.

Isso permite a construção de *softwares* para acompanhamento em tempo real das condições da malha, inclusive com melhoria das estimativas dos parâmetros com o passar do tempo, com possibilidade de avaliação de comportamento futuro para cenários pré-determinados, a serem utilizados como ferramenta de auxílio na decisão da operadora.

Mais do que isso, o filtro pode fornecer também informações quanto a precisão das medidas de campo apresentadas, mostrando quais dados são mais confiáveis e quais não, indicando necessidade de manutenção ou calibração destes sensores, ou mesmo a necessidade de tecnologias mais adequadas.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo propor uma abordagem baseada na utilização do Filtro estendido de *Kalman* para a estimação de parâmetros de escoamento para gás natural em malha de gasodutos. O filtro de *Kalman* possibilita a realização dessa tarefa sem a necessidade de que o regime permanente tenha sido atingido; para tanto, impõe-se a construção de um modelo que considere os transientes no escoamento numa malha do gasodutos.

Assim, inicialmente será desenvolvido um *software* para a solução de escoamento em malha, com precisão para capturar comportamentos importantes para o escoamento em malha de gasoduto e custo computacional adequado a operação em tempo real. Ele tem por base equações de conservação unidimensionais e relações de fechamento tradicionalmente utilizadas no transporte de gás natural.

Vencida a primeira etapa, será construído um modelo em espaço de estados adequado à estimação de parâmetros pelo filtro estendido de *Kalman*.

Como objetivos específicos podem ser citados:

1. Propor modelo de escoamento aplicável para o problema estudado, i.e., escoamento de gás natural em malha de gasodutos *offshore*;

2. Validar modelo de escoamento em termos de precisão de resposta e velocidade de processamento para aplicações em tempo real para cenário *offshore* em LDA profunda;

3. Propor forma para estimação de parâmetros de escoamento em gasoduto;

4. Modelar malha de gasodutos *offshore* em LDA profunda sintética e real;

5. Avaliar comportamento do filtro de *Kalman* com relação a malha de escoamento sintética proposta;

6. Avaliar resultados obtidos pelo filtro de Kalman para malha real modelada;

7. Comparar estimação de parâmetros por filtro de Kalman com outras abordagens utilizadas em gasoduto, e verificar coerência destes parâmetros estimados.

Destes objetivos específicos descritos acima os de número 2, 5 e 6 são contribuições deste trabalho.

1.4 Estrutura da tese

O trabalho está estruturado conforme descrito a seguir. O Capítulo 1, aborda o contexto e a motivação para sua realização.

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica a respeito do projeto de gasodutos e malhas, modelagem de escoamento do gás natural e equacionamento utilizado, bem como simplificações utilizadas na literatura e seus impactos, além de apresentação da estimação de estado por filtro de Kalman e outras formas de estimação aplicadas a gasodutos.

No Capítulo 3 são apresentadas as equações regentes do problema de escoamento, as simplificações adotadas, transformações de variáveis e relações para fechamento do modelo. Também é abordado como são tratadas a condição inicial e as condições de contorno para um problema de escoamento em malha. Por fim são tratadas a discretização destas equações e método numérico de solução, e apresentados trabalhos de referência para comparação.

Já o Capítulo 4 apresenta a fundamentação da estimação de estado através de filtro de *Kalman*, suas diferentes formas para aplicação em problemas não lineares e possíveis ganhos para a sua utilização em estimação de parâmetros num problema de escoamento interno em tubulações.

O Capítulo 5 apresenta os casos simulados e reais de modelagem para o estudo, bem como os parâmetros e estado a serem estimados e sua influência no modelo de escoamento. Os resultados obtidos são comparados a demais resultados disponíveis na literatura, assim como são apresentados os valores de referência esperados para cada parâmetro avaliado.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, mais comparações com resultados obtidos da literatura e propostas de desenvolvimentos futuros, bem como são evidenciados os ganhos obtidos com o desenvolvimento proposto e as diferenças encontradas para outros cenários de aplicação.

Após a estrutura básica do trabalho, são apresentados anexos e apêndices com maior detalhamento dos modelos utilizados e como estes foram obtidos ou são aplicados no procedimento de cálculo.

No Apêndice A é apresentada a teoria envolvida no filtro de Kalman, bem como variáveis e procedimentos para viabilização em sistemas dinâmicos não lineares. Ao final é apresentado fluxograma para exemplificar o procedimento adotado.

No Apêndice B é apresentada a derivação do modelo de escoamento proposto para o presente trabalho, com modificação das variáveis, discretização das equações de conservação e

generalização das equações para nós intermediários de escoamento.

No Apêndice C é apresentado o procedimento numérico adotado para a solução das equações regentes do problema de escoamento, tratando-se de um método direto iterativo, com o objetivo de aumentar a velocidade de solução e viabilizar abordagens em tempo real.

Finalmente, o Apêndice D apresenta a equação de estado utilizada neste trabalho e formas de solução para compressibilidade e entalpia específica, bem como procedimentos iterativos para determinação destes parâmetros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita revisão bibliográfica em continuidade aos conceitos apresentados no Capítulo 1. Serão abordados de forma mais aprofundada assuntos relevantes para a modelagem do escoamento de hidrocarbonetos, escoamento em malha de gasoduto, estimação de estado e filtro de Kalman, também em sua forma não linear. Visto que o modelo de escoamento tem influência no comportamento do filtro, este será tratado com maiores detalhes que os demais assuntos.

2.1 Modelo de escoamento

Um modelo de escoamento de gás natural em dutos é necessário à gestão de escoamento em malha de gasoduto. Com os demais modelos de escoamento de hidrocarbonetos, este também necessita de simplificações (SHOHAM, 2006) para tornar viável sua utilização em aplicações práticas.

Diversos trabalhos da literatura abordam diferentes modelos de escoamento para gasodutos, em sua grande maioria com a utilização de equações de conservação para escoamento unidimensional (GILLIJNS et al., 2006) (FARZANEH-GORD; RAHBARI, 2016) (ISOM et al., 2018) (MADOLIAT; KHANMIRZA; MOETAMEDZADEH, 2016) (ABDOLAHI et al., 2007) (LÓPEZ-BENITO; TENREIRO; GUTIÉRREZ-PÉREZ, 2016) (DURGUT; LEBLEBICIOĞLU, 2016) (BEHROOZ; BOOZARJOMEHRY, 2015b) (CHACZYKOWSKI et al., 2018) (BEHROOZ; BOOZARJOMEHRY, 2015a) (OSIADACZ; CHACZYKOWSKI, 2001) (OSIADACZ; CHACZYKOWSKI et al., 1998) (JALVING; ZAVALA, 2018) (HERRÁN-GONZÁLEZ et al., 2009) (WOLDEYOHANNES; MAJID, 2011) (LORENTZEN; NÆVDAL; LAGE, 2003) (HERTY; MOHRING; SACHERS, 2010) (SANTOS, 2010) (SANTOS et al., 2011) (AAMO; SALVESEN; FOSS, 2006), onde não são tratados efeitos radiais no escoamento, ou estes são tratados com médias gerais. Outra simplificação utilizada nestes trabalhos é a presença de uma única fase, a gasosa, e consequente inexistência de formação de condensado.

Poucos trabalhos utilizam *software* comercial como modelo de escoamento (OVEN, 2014) (HODNE, 2008) (HAUGE, 2007) (DANDREA; ROTAVA; MUKATI, 2015). Apesar de consolidados, estes modelos são fechados e com restrições a modificação, motivo pelo qual são menos utilizados em trabalhos científicos. A velocidade de processamento também é inferior aos modelos simplificados utilizados em outros trabalhos, o que dificulta sua utilização em tempo real.

Em geral são utilizadas as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento para descrever o escoamento de gás natural, com variáveis do escoamento sendo a densidade do gás natural, velocidade local de escoamento e pressão. A composição do gás é tratada como invariável no tempo e espaço, composto principalmente por frações leves.

A depender das condições de escoamento, este é tratado como invíscido (GILLIJNS et al., 2006) mas, em geral, a perda de carga viscosa no escoamento é modelada por meio de um fator de atrito, tomado como constante e com valor pré-determinado (HERRÁN-GONZÁLEZ et al., 2009) ou com a utilização de funções mais complexas, podendo depender da rugosidade interna da tubulação e do Número de *Reynolds* de escoamento (Re), (FARZANEH-GORD; RAHBARI, 2016). Apesar de mais precisa, esta última proposta necessita da viscosidade do fluido para utilização, propriedade não necessariamente utilizada nos demais cálculos de escoamento realizados.

Algumas possibilidades para este cálculo mais complexo para o fator de atrito foram descritas em diferentes trabalhos. O primeiro dele, dado em Colebrook et al. (1939), aponta uma forma implícita para o fator de atrito de Darcy dependente da rugosidade relativa do duto e o Re de escoamento. Chen (1979) apresenta uma variação desta formulação. Gersten et al. (2000) apresentam trabalho específico para o escoamento de gás natural, flexibilizando a formulação proposta anteriormente para alteração do comportamento deste fator de fricção, e Bratland (2009) apresentou nova correlação, também explicita, para avaliação de fator de fricção para escoamento monofásico.

É proposta também a utilização de formas explícitas para o fator de fricção (COLEBROOK et al., 1939), como Swamee e Jain (1976) ou Haaland (1983). Estas formas explícitas têm erro, quando comparadas à forma original, menor que $0{,}5\,\%$. Porém, mesmo com todas essas variações encontradas, os resultados parecem ser pouco influenciados pela abordagem utilizada, assim como o formato apresentado também apresenta similaridade entre as propostas.

O método numérico utilizado nestes trabalhos varia, mas em geral é utilizado o método das características, como em Herrán-González et al. (2009). Neste método, as equações diferenciais são discretizadas através do método das diferenças finitas e as variáveis são modificadas

com a utilização da velocidade do som.

Porém a velocidade do som no meio não é, de fato, constante, e esta abordagem pode trazer imprecisão. Sem esta alteração de variáveis, se faz necessária a determinação da relação entre pressão e densidade. Uma forma simplista de se tratar o problema é considerar o gás como ideal.

Nestas condições a compressibilidade do gás é unitária e a entalpia é dependente apenas da temperatura. Isso traz resultados coerentes para condições de baixa pressão e alta temperatura, mas introduz consideráveis erros para condições de alta pressão, comuns em gasodutos. Assim, é necessária a avaliação de não linearidades para o gás natural em gasoduto.

Isto pode ser conseguido através de equacionamento empírico (MODISETTE et al., 2000) ou através de equações de estado gerais. Equações empíricas, como a da *American gas association* AGA-8, são bastante precisas para escoamento de gás já especificado, mas sem precisão esperada para escoamento diferente das condições encontradas nos gasodutos *onshore* (MODISETTE et al., 2000).

As equações de estado se dividem em diversos tipos. Para gás natural em geral são utilizadas equações cúbicas, onde a partir do equacionamento proposto por van der Waals para gases reais compostos por partículas de tamanho não desprezível foi desenvolvido para gás natural equacionamento similar em Soave (1972), que a partir de poucas constantes prevê o equilíbrio gás-líquido e outras propriedades do gás natural, como massa específica ou entalpia.

Foi proposta melhoria do modelo de Soave (1972) para condições próximas ao ponto crítico, apresentado em Peng e Robinson (1976), com novo desenvolvimento posterior em Robinson e Peng (1978). Para misturas de hidrocarbonetos é comum a proximidade das condições de temperatura e pressão em algum ponto do escoamento às condições críticas. Adicionalmente foi proposta alteração com o objetivo de melhorar a precisão na previsão de densidade do líquido de gás natural em Péneloux, Rauzy e Fréze (1982).

Mais recentemente, foi iniciada a abordagem de modelagem por pseudo-fluido (KUNZ; WAGNER, 2012). Nesta abordagem são utilizadas muitas constantes para descrever o comportamento do gás natural, com boa precisão inclusive para condições extremas de pressão e temperatura. Apesar deste melhor resultado em condições mais genéricas de aplicação, a complexidade e maior custo computacional dificultam a sua utilização em acompanhamento em tempo real.

Estas equações de estado dependem de caracterização do fluido, como sua densidade ou sua composição, e da pressão e temperatura a que este está submetido para determinação de

propriedades como a massa específica ou viscosidade. As diferentes constantes utilizadas nos cálculos intermediários são obtidas através de experimentos em laboratório.

Em geral os problemas tratados são considerados em regime permanente, o que leva a simplificação nas equações de escoamento e permite uma solução marchante, com equacionamento explicito. Entretanto, modelos para acompanhamento em tempo real são necessariamente transientes (HERRÁN-GONZÁLEZ et al., 2009), com uma solução numérica mais complexa.

Apesar da simplificação de escoamento isotérmico se aplicar sem grandes erros às malhas *onshore*, para um melhor entendimento do escoamento e seu comportamento é necessário um cálculo mais refinado das temperaturas do escoamento. Isto é conseguido com a utilização da equação da conservação de energia.

Neste caso também é necessário o cálculo de mais uma propriedade do escoamento, a entalpia específica do gás natural ou de sua variação com a pressão e temperatura, a depender do equacionamento adotado. Da mesma forma que a massa específica pode ser calculada através de equacionamento empírico ou equações de estado, a entalpia também pode, e depende da composição ou densidade do fluido, da pressão e da temperatura.

Porém esta relação com a temperatura e pressão são não lineares, e são necessárias linearizações no equacionamento de forma a permitir sua discretização e solução numérica posterior. Ainda é necessário o efeito de troca térmica com o meio para fechamento desta equação.

Diferentes abordagens para a troca térmica são possíveis de serem utilizadas (OSIADACZ; CHACZYKOWSKI, 2001). A mais simples é desconsiderando a capacidade térmica da tubulação, onde a troca térmica é simplesmente proporcional a diferença de temperatura entre fluido e meio. Isto simplifica a modelagem, sem perda de precisão nos resultados para avaliações de regime permanente.

Mas é possível também utilizar equacionamento completo para cada uma das camadas da tubulação, adicionando mais variáveis para serem calculadas. Esta abordagem é coerente para avaliações transientes, porém perde seu ganho para efeitos de longo prazo no escoamento.

Apesar da maioria dos trabalhos utilizar uma densidade constante para caracterizar o gás natural, a utilização de composição variável no espaço e tempo é viável (CHACZYKOWSKI et al., 2018). Nesta abordagem são adicionadas mais variáveis de estado para o escoamento, a composição do gás, onde cada componente adiciona uma equação de conservação a ser resolvida. Para efeitos de escoamento, as variações encontradas na composição do gás parecem ser de baixa influência.

Uma avaliação da influência dos diversos parâmetros utilizados nos modelos de escoamento foi realizada para escoamento laminar e turbulento (ABDOLAHI et al., 2007), considerando variações de rugosidade interna, troca térmica e formato do perfil radial de velocidades. Os resultados mostraram uma grande influência dos parâmetros de rugosidade interna e coeficiente de troca térmica nos perfis de pressão e temperatura.

Os resultados mostram variação mínima dos resultados para alterações no perfil de velocidade, mas para condições de operação típicas de gasodutos, como alto Re, onde o fator de atrito tem influência relevante no perfil de pressões calculado e a condutividade térmica do solo tem influência considerável no perfil de temperatura de um duto.

2.2 Solução do modelo

Uma alternativa é propor formulações convenientes para os termos das equações de conservação de quantidade de movimento (WOLDEYOHANNES; MAJID, 2011) ou tratar o escoamento como não viscoso (GILLIJNS et al., 2006). Com isso torna-se possível obter uma solução algébrica para o perfil de pressão de escoamento. Porém esta abordagem traz consigo uma grande simplificação do problema real.

O conjunto de equações diferenciais parciais não pode ser resolvido analiticamente sem muita simplificação nas equações, necessitando de algum tipo de discretização ou modificação para que seja possível sua solução numericamente. Uma proposta de escoamento permanente pode ser colocada, o que elimina termos temporais no equacionamento.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = f\left(P\left(x\right)\right) \tag{2.1}$$

Esta é uma equação de primeira ordem que pode ser resolvida numericamente com algoritmo marchante, onde a pressão é colocada em um ponto, $P\left(x\right)$ é determinado neste mesmo ponto e $P\left(x + \Delta x\right)$ é calculado até o final do domínio. Então aqui é necessário definir algum tipo de malha de pontos no escoamento, que define onde serão calculadas as variáveis de interesse.

Uma alternativa com menos simplificações é a transformação de variáveis, sendo a mais utilizada chamada de "método das características". Neste método é utilizada a transformação de variáveis, com o objetivo de tornar mais simples a solução. Com esta simplificação a equação para modelagem se torna diferencial ordinária, e a solução aparece a partir da equação característica proposta.

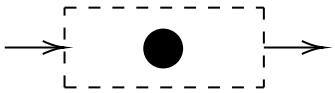


Figura 2.1: Volume de controle típico para uso de MVF.

Estes métodos de solução são computacionalmente mais eficientes, porém esbarram na quantidade de simplificações adotadas. Não é possível capturar efeitos térmicos, efeitos transientes e comportamento não ideal do gás natural de forma simultânea. Então são propostos métodos mais robustos para discretização das equações diferenciais parciais (EDPs), e sua solução se dá com maior custo computacional.

Para transformação das EDP em equações algébricas é utilizada a discretização por Método dos elementos finitos (MEF), volumes finitos (MVF), e diferenças finitas (MDF). O MDF é o método mais antigo para a solução de EDP, sendo apresentado por Euler. Nesta abordagem, as derivadas são obtidas pela expansão em série de Taylor. Porém só é aplicável a problemas de geometria simples.

O MVF utiliza as EDP em sua forma integral e conservativa. O domínio é dividido em uma serie de volumes de controle e sobre eles são aplicadas as equações de conservação. Necessita das integrais de superfície nos volumes de controle, sendo mais fácil de implementar em malhas complexas.

O MEF é similar aos MVF, porém com definição de função peso multiplicando o equacionamento. Isso traz uma maior facilidade de trabalho com malhas triangulares ou quadrilaterais, permitindo modelagem de problemas ainda mais complexos, com malhas bastante refinadas.

Para problemas de escoamento o mais utilizado é o MVF. Neste caso as equações de conservação pertinentes são colocadas num volume de controle de pequenas dimensões onde são integradas como mostrado na Fig. 2.1. Para avaliação das propriedades nas superfícies de controle são utilizadas interpolações, e as EDP de conservação tornam-se algébricas.

Pela natureza do problema são necessárias avaliações das variáveis no tempo e no espaço. No tempo, para a continuidade da solução, são possíveis avaliações explicitas, implícitas, semi-implícitas ou de maior ordem. Propriedades do escoamento podem ser avaliadas no instante de tempo anterior já calculado ou no instante a ser calculado.

No espaço também é necessário avaliar derivadas. Mais que isso, pelo MVF torna-se necessário avaliar alguns parâmetros em pontos intermediários da malha definida. Esta avaliação pode depender de informações diferentes, onde as diferentes formas de avaliação podem ser

classificadas em primeira ordem, segunda ordem ou maior, a depender da quantidade de dados utilizada para esta avaliação.

Uma vez definida a abordagem a ser utilizada, podemos construir um conjunto de pontos onde são alocadas as variáveis a serem calculadas. A este conjunto de variáveis que representa, de forma aproximada, o gasoduto, e damos o nome de linha. Aqui são colocadas informações de geometria, composição e propriedades do gasoduto.

Com isso pode ser interessante a alocação de diferentes malhas de pontos a depender da variável em avaliação. Em problemas de escoamento é recorrente se posicionar as variáveis de velocidade entre os pontos de pressão, temperatura e composição, pela característica convectiva das equações. Isto traz consigo menor efeito das interpolações descritas acima na solução das EDPs. A esta configuração damos o nome de malha defasada.

Uma vez montadas as equações algébricas de conservação, grandes matrizes são alocadas com os coeficientes. Estas matrizes são esparsas, e podem ser utilizados métodos numéricos específicos para sua solução, como decomposição *lower upper* (LU). A depender da abordagem temporal utilizada pode ser necessário procedimento iterativo para convergência, como no caso de esquemas implícitos.

Neste caso é necessário avaliar quando a convergência é atingida, e esta avaliação pode ser feita com uma variação RMS normalizada das variáveis calculadas em comparação às mesmas variáveis calculadas na iteração anterior. Quando o resíduo for baixo o suficiente, o procedimento iterativo é terminado.

2.3 Escoamento em malha

Além do modelo de escoamento em tubulações descrito na Seção 2.1, este deve ser expandido para uso em malha. Para isso, é necessário definir os pontos onde são unidos os diferentes dutos. A estes pontos de união damos o nome de nós, ou nó de junção (BEHROOZ; BOOZARJOMEHRY, 2015b).

Esta abordagem depende muito do esquema proposto para a malha e qual o efeito interessante de ser avaliado. Mas, em termos gerais, a abordagem consiste em considerar determinadas propriedades similares para diferentes pontos de escoamento nos nós, e integrar as equações de conservação em volume de controle no entorno do nó, que tem geometria definida.

A depender da malha de solução adotada estes pontos podem considerar uma pressão compartilhada, quando os gasodutos se iniciam ou terminam em nós de pressão (BEHROOZ;

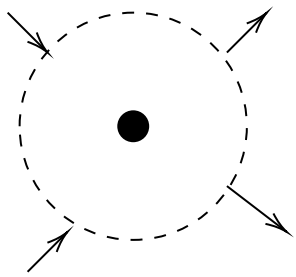


Figura 2.2: Volume de controle para um nó de junção.

BOOZARJOMEHRY, 2015b), temperatura e composição definidos, como mostrados na Fig. 2.2 e com conservação de massa, ou onde a vazão que entra é igual à que sai, quando as linhas avaliadas se iniciam e terminam em pontos de velocidade (FARZANEH-GORD; RAHBARI, 2016), conforme equacionamento a seguir.

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = 0 \tag{2.2}$$

onde Q_i indica a vazão de cada corrente entrando/saindo num nó intermediário. Assim, para viabilizar a modelagem de malhas de gasodutos, é necessário considerar um ponto com diferentes entradas e saídas de gás natural e aplicar o MVF para esta quantidade genérica de interfaces. A depender da colocação da malha, este nó pode necessitar de um volume definido, a ser colocado.

Além desta capacidade de união de tramos, com escoamento convergente ou divergente, uma malha de gasodutos ainda conta com a presença de equipamentos intermediários, como estações de compressão ou válvulas *chokes*, que permitem uma maior flexibilidade de direcionamento do gás natural.

As estações de compressão, quando utilizadas, são modeladas com um mapa de performance característica (WOLDEYOHANNES; MAJID, 2011). As informações básicas utilizadas são a vazão, a velocidade, o *head*, ou ganho de pressão, e a eficiência adiabática, permitindo uma avaliação dos compressores a depender de uma série de constantes definidas para cada equipamento.

Já as válvulas e *chokes* utilizados para fechamento de gasodutos ou controle de pressão ou vazão podem ter diferentes abordagens. Uma primeira, e mais focada no comportamento do equipamento, relaciona o diferencial de pressão com outras propriedades como vazão e abertura da válvula, conforme *American Petroelum Institute* (API) 12-B.

Uma segunda abordagem para tais equipamentos é a consideração de sua influência

no escoamento nos gasodutos. Nesta abordagem a modelagem foca no efeito gerado no escoamento. No caso de uma válvula fechada, a vazão é colocada como nula. Um outro caso possível é um controle de pressão num determinado ponto, onde as equações de conservação são modificadas e a pressão passa a ser determinada.

Outros equipamentos podem ser utilizados na operação de uma malha de gasoduto, como o *pipe line end terminal* (PLET), ou o PLEM. Estes equipamentos se encontram nas extremidades dos dutos e são compostos por conectores e válvulas. Entretanto sua operação é baseada na condição de válvulas de bloqueio simplesmente, sendo sua modelagem feita definindo-se a vazão como nula quando da válvula estar fechada. Como estas válvulas possuem alto coeficiente de vazão (Cv), e impõe baixa perda de carga no escoamento para aberturas intermediárias, uma modelagem aberto ou fechado é suficiente para se conseguir bons resultados.

2.4 Estimação de estado

A estimação de estado busca conseguir uma melhor descrição para um sistema dinâmico considerando o fato de as medidas possuírem incertezas para as variáveis avaliadas e a possibilidade de não existir medida para uma variável de interesse. Esta avaliação pode ser simples ou criteriosa.

Para malha de gasoduto, a estimação de estado em geral vem acompanhada de modelo de escoamento, o que permite calcular perfis de pressão, vazão, temperatura e outras propriedades do escoamento em pontos intermediários dos dutos. O modelo de escoamento proposto e a forma com que este é utilizado varia para cada estudo.

Um primeiro trabalho apresenta uma técnica para uso de medidas de vazão e pressão num mesmo ponto do escoamento ou conjunto de medidas em equipamento (HOEVEN et al., 1987). Esta técnica ajusta os valores medidos para permitir ao estado estimado dividir os erros de forma estruturada, com o nome de método dos erros similares. Esta técnica é bastante estável, simples e de baixo custo computacional. Entretanto provoca erros sistemáticos nas medidas para estimação do estado, não permite derivação de variáveis de estado sem medida direta e não lida com medidas em pontos diferentes. Ainda hoje tem sido aplicada a simuladores de gasodutos.

Uma alternativa para o uso de informações em locais diferentes em modelos de escoamento foi proposta em Modisette et al. (2009), com o nome de método da máxima verossimilhança. Nesta proposta uma série de medidas é comparada com os valores previstos pelo modelo, que é alterado de forma a minimizar a diferença entre valores medidos e previstos. Os resultados parecem superiores ao método dos erros similares. Este mesmo trabalho sugere a

possibilidade de uso apenas de condições de contorno de pressão definida para permitir uma maior robustez do modelo, e um filtro passa baixa para suavização das medidas antes sua utilização nos modelos. Assim seria possível estimar toda a condição de escoamento com alterações mínimas em tempo real com modelos existentes.

A estimação de estado, além do uso em simuladores em tempo real, também conta com outras aplicações frequentes. Uma delas é a reconciliação de dados, uma operação necessária para ajuste dos erros sistemáticos nas medidas. O problema é caracterizado pela diferença nas medidas de entrada e saída de um duto.

Em um cenário real, é esperada a conservação de massa num sistema fechado como um duto. Porém, com a existência de erros sistemáticos, por menores que sejam, existe sempre diferença nas medidas de entrada e saída, algo não compatível com a conservação de massa esperada. Estas diferenças podem ser minimizadas por uma adequada seleção da tecnologia e calibração periódica dos equipamentos, mas não pode ser removida apenas com isso.

Isom et al. (2018) apresentam proposta de reconciliação de dados para malha de dutos transportando líquidos incompressíveis, usando equações de conservação de massa e quantidade de movimento, e comparando com dados simulados obtidos através de *software* proprietário, HYSYS, com boa performance inclusive para malhas complexas.

Outro trabalho (D'ANDRÉA, 2016) aborda diferentes técnicas de reconciliação aplicadas a gasodutos *offshore*, com a proposta de método específico para malha *offshore* e comparação dos trabalhos de Romagnoli e Sanchez (1999) e Narasimhan e Jordache (1999). O trabalho também avalia como grande a influência de efeitos de troca de fase no problema de reconciliação de dados.

Uma aplicação necessária a estimação de estado é a estimativa de inventário de gás natural em gasodutos. O gás natural é tido como um ativo de valor contábil mesmo quando ainda em gasodutos, e a estimativa do volume neste é de grande importância para uma operadora.

Diferentes propostas para cálculo do inventário em gasodutos são apresentadas em D'Andréa (2016), com uma comparação entre métodos clássicos com base empírica e simplificações e modelagem de escoamento com cálculo a partir dos perfis de pressão e temperatura obtidos. Os resultados mostram que, para gasodutos em grandes LDA, é importante o uso de simulação de escoamento para uma adequada avaliação dos perfis de pressão e temperatura e, com isso, minimizar os erros na estimativa de gás presente dentro de uma malha de gasodutos.

Outra aplicação da estimação de estado é na obtenção de parâmetros do escoamento como troca térmica ou rugosidade interna. A esta ação damos o nome de *tunnig* ou ajuste,

que tem por objetivo avaliar o valor de diferentes propriedades do escoamento com o uso de medidas indiretas como pressão, vazão e temperatura em diferentes pontos.

Em geral são utilizados períodos de medidas num sistema real onde não foram observadas perturbações e, a partir de valores representativos, são estimados parâmetros médios de escoamento com métodos quadráticos ou mesmo menos estruturados, levando a boa precisão dos resultados para condições de escoamento similares às utilizadas.

Entretanto, uma malha de gasoduto dificilmente apresenta tal período sem perturbações por contar com uma grande quantidade de unidades envolvidas e esta estratégia não pode ser aplicada diretamente, sendo necessário algum tipo de suavização que traz consigo diminuição da precisão dos resultados ou mesmo inviabilidade do método.

O trabalho de Modisette et al. (2004) apresenta alternativas para atividades de ajuste com o uso de métodos automáticos. Através de informações disponibilizadas por um sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA), são avaliados diferentes parâmetros de escoamento, podendo estes sofrer ajustes de forma individual a cada avaliação ou de forma integrada. Os resultados mostram ganho no ajuste de parâmetros simultaneamente.

A precisão dos parâmetros de escoamento estimados é influente nos resultados das simulações realizadas (HANMER et al., 2012). Este mesmo trabalho apresenta diferentes formas para ajuste de rugosidade interna dos dutos ou tempo de trânsito das moléculas neste mesmo gasoduto através da troca térmica com o meio externo.

As soluções propostas passam por ajustes manuais das propriedades com base na experiência do operador, de forma automática a partir de variações das pressões de entrada dos dutos ou qualidade do gás na saída do duto, ou com a utilização do método de máxima verossimilhança.

Ainda existem trabalhos com o objetivo de detectar a ocorrência de vazamentos em dutos através de diferentes técnicas de estimação de estado. Aamo, Salvesen e Foss (2006) apresentam um sistema deste tipo com a utilização de simulação de escoamento dedicada, onde tanto a posição quanto a vazão de uma ruptura no duto são estimados.

Um trabalho recente desenvolve técnica para estimação de estado com o uso de uma abordagem baseada em otimização numa malha de transporte de gás natural com uma série de medidas intermediárias (JALVING; ZAVALA, 2018), numa composição típica de sistemas *onshore* e com grandes efeitos transientes, com o objetivo de gerar perfis de vazão e pressão adequados e consequentemente com precisão na determinação de inventário, mesmo para eventos transientes. Este trabalho também indica a necessidade de ferramentas gráficas para a estimação

de estado em malhas complexas e com grande quantidade de gasodutos diferentes. As simplificações propostas de desconsiderar efeitos convectivos no escoamento diminuem pela metade o tempo de simulação sem perdas perceptíveis de precisão nos perfis, mesmo para transientes.

O uso de observador não linear num escoamento de hidrocarbonetos é descrito em Hauge (2007). Com o uso de *software* comercial para modelagem do escoamento, o autor propôs uma variação ao observador de *Luenberger* de forma não linear para detectar e localizar vazamento em dutos operando em regime permanente ou transiente. Os resultados de localização do vazamento para dutos em operação no regime permanente foram satisfatórios tanto para gás quanto para líquido, mas apresentaram dificuldade para tais tarefas em escoamentos transientes. O uso de múltiplos observadores no duto parece melhorar o cenário.

Para escoamento bifásico Hodne (2008) apresenta aplicação similar à anterior. Os resultados mostram maior dificuldade na detecção e localização de um vazamento quando este acontece em duto multifásico, quando comparado a uma só fase no escoamento. Isto se deve a maiores incertezas quanto a perda de carga neste tipo de escoamento.

Ainda assim, os dois métodos anteriormente apresentados dependem de ajuste de parâmetros no observador, o que em geral não é viável de ser efetuado em sistemas reais, dada a dificuldade de se impor uma condição de vazamento em um duto para calibração destas constantes.

2.5 Filtro de Kalman

A estimação de estado descrita acima, apesar de poderosa, não possui estruturação e sistemática para utilização em larga escala. Além disso, a utilização de medidas complementares do mesmo tipo não traz melhorias aos resultados pela dificuldade em determinar qual a de maior precisão.

Assim, mais recentemente tem sido utilizada a estratégia de aplicação de filtro de Kalman para a estimação de estado e parâmetros em malha de gasoduto, para aplicações similares às descritas na secção anterior, com resultados mais promissores.

Alguns trabalhos buscam inferir propriedades internas do escoamento de lama em perfuração de poço (LORENTZEN; NÆVDAL; LAGE, 2003). Quando utilizada, a estimação teve a capacidade de reproduzir os efeitos medidos e melhorar os sem medidas. Tais resultados foram confirmados com dados de campo.

Para a fusão de sinais, que também pode ser aplicada à malha de gasoduto, é apresen-

tada estratégia baseada em filtro de Kalman descentralizado (SUN; DENG, 2004), permitindo o uso de medidas complementares em um mesmo local ou em diferentes localizações.

Com respeito a trabalhos dedicados ao escoamento em dutos, Gillijns et al. (2006) utilizam os filtros de Kalman estendido e ensemble para estimar valores de massa específica do gás. Os resultados mostram um ganho significativo quando comparado ao não uso de assimilação das informações para ambos os filtros, mas com um tempo de processamento maior para o filtro estendido.

A detecção de falhas e inconsistência em medidas pode ser feita com o uso de diferentes técnicas. Wei, Verhaegen e Engelen (2010) apresenta forma para a detecção de falhas em medidas de sistema dinâmico, onde foi possível isolar dados considerados menos adequados para uma melhor estimação do estado.

Para a detecção de vazamento também é utilizado o filtro de Kalman. Santos et al. (2011) utilizam abordagem chamada de variação linear de parâmetros para inferir a presença de vazamentos. Muito embora a técnica não permita a localização do vazamento de gás, apenas líquido, ela pode ser usada para determinar o fechamento da operação do duto.

A estimação de parâmetros de escoamento em gasoduto é apresentada em Modisette et al. (2013) com o uso de filtro ensemble para um sistema com compressão intermediária e dois trechos de $18{,}6\,mi$ ($30\,km$) de comprimento, trabalhando com condições permanentes e transientes em diferentes avaliações. Os parâmetros a serem estimados foram considerados a rugosidade interna dos dutos, que permitem ajuste do perfil de pressão, um *offset* de medição na saída do sistema, que permite ajuste para conservação de massa no seu interior e uma eventual posição de um vazamento. Os resultados mostram um bom comportamento dos parâmetros estimados tanto para gás quanto para líquido em condições permanentes ou transientes. Entretanto, para estimação de vários parâmetros de forma simultânea estes divergiram e o resultado não pode ser considerado coerente.

Para malha de gasodutos, Behrooz e Boozarjomehry (2015b) apresentam uma modelagem térmica e transiente para o escoamento e uso de equacionamento descontínuo para equipamentos intermediários, onde são propostas formas de estimação com o uso de diferentes informações e comparação com as medidas reais.

O estimador utilizado é chamado de filtro de Kalman central, uma variação do filtro de Kalman estendido. As avaliações foram feitas para gasoduto com instrumentação intermediária e para uma proposta de malha de transmissão de gás natural com diferentes atores. Os resultados mostram boa coerência do estado estimado, com influência marcante das medidas utilizadas na

assimilação sobre as estimativas. A ausência de medidas ou sua não utilização faz com que as variáveis de estado intermediárias do escoamento tenham erros significativos.

Para malhas longas é proposta a estimação de estado descentralizada (BEHROOZ; BOOZARJOMEHRY, 2015a), onde o tempo de processamento, normalmente alto pela complexidade e tamanho da malha, pode ser reduzido com o uso de processamento paralelo. Nesta abordagem é usado o filtro de Kalman distribuído e descentralizado que, diferentemente do central, aborda apenas parte da malha. Com isso o estado a ser estimado fica menor, assim como é usada uma menor quantidade de medidas. Com o uso de um mesmo modelo de escoamento, cada filtro fica responsável por uma determinada região da malha e o custo computacional envolvido em cada estimador é mais baixo, muito embora o sistema total continue o mesmo. Esta técnica tem perda quando aplicada a sistemas onde os efeitos dinâmicos se comunicam entre as diversas partes. Para o problema em questão, as avaliações são descentralizadas e realizadas até equipamentos de controle como *chokes* e compressores, nos quais existe descontinuidade dos efeitos dinâmicos.

Em vista da dificuldade de estimar parâmetros de forma simultânea, Durgut e Leblebicioğlu (2016) apresentam aplicação com filtros independentes para perfil de pressão e de vazão, após encontrar dificuldade na estimação destes de forma simultânea. A solução se tornou mais estável. O problema avaliado é composto de um gasoduto simples, onde as pressões e vazões na entrada e saída são conhecidos, e variam em função do tempo conforme descrito. O trabalho também avalia a influência de parâmetros como a velocidade do som e fator de fricção nos resultados obtidos. O uso de estimação independente para vazão e pressão se mostrou mais simples e com maior estabilidade dos resultados. Porém não foram realizadas avaliações dos efeitos para pontos não usados na assimilação, e não foi tratado o problema em malha com diferentes rotas para o gás.

Trabalho similar envolvendo estimação em malhas é apresentado por Lesyshen (2005) para detecção de vazamentos em malha de distribuição de água. Tais malhas convivem com vazamentos quase que permanentemente e sua localização é difícil pelo enterramento dos dutos. O trabalho apresenta um método de localização dos vazamentos através do uso de filtro de Kalman estendido e uso de outras técnicas simultaneamente para a detecção. A precisão se mostrou razoável, porém foi encontrada limitação para a localização de dois ou mais vazamentos simultâneos.

Ainda em dutos de transporte e distribuição de água, Doney (2007) apresentou método de detecção e localização de vazamentos numa malha com o uso de filtro de Kalman estendido e uma proposta de contorno estendido, com melhoria dos resultados obtidos quando comparado

a Lesyshen (2005). O contorno estendido consiste da utilização de dutos virtuais adicionais na modelagem do escoamento de forma a garantir que os vazamentos a serem detectados estejam no duto intermediário. A utilização deste contorno estendido possibilitou a detecção e localização de vazamentos de forma simultânea. A proposta foi testada em dados de um sistema de distribuição real de água para localização de vazamentos, porém sem sucesso. O provável motivo deste insucesso é a qualidade e quantidade dos dados utilizados.

A expansão dos conceitos anteriores para uma malha verdadeira é dada em Oven (2014), com o uso de filtro de Kalman estendido para a detecção de vazamentos em malhas mais complexas que os trabalhos anteriores. O filtro se mostrou capaz de detectar e localizar vazamentos.

2.6 Simuladores em tempo real

Empresas operadoras utilizam para acompanhamento e gestão do escoamento em gasodutos sistemas que mesclam informações em tempo real vindas de sistemas SCADA e modelos de escoamento. A esta configuração damos o nome de *Pipeline Management System* (PMS).

Tais sistemas tem como ganho um aumento da segurança e eficiência operacional, redução no consumo de energia para o transporte de gás, melhor estimativa do volume de gás presente nos gasodutos, melhoria na resposta a contingencia e rastreio da qualidade do gás (D'ANDRÉA, 2016).

Para a malha de gasodutos terrestre brasileira existe PMS descrito em Reed et al. (2006), operada pela Transpetro, em malha com capacidade de transporte de até $20\,MM\,Nm^3/d$ de gás processado, considerando estações de compressão e de redução intermediários.

Os resultados gerados são disponibilizados amplamente aos envolvidos na gestão da malha, e tem foco no impacto econômico gerado por eventos com funcionamento 24 horas por dia. Também podem ser efetuadas avaliações para manobras em preparo e avaliações de cenários pré-definidos.

Outro trabalho (SUDJATMIKO et al., 2009) apresenta proposta similar com foco em estimar condição atual e futura de escoamento nos gasodutos. São mais de $1\,000\,km$ de dutos gerenciados, com apontamentos diários de fluidos transportados e condição de escoamento.

No Oriente Médio, Al-Rasheed et al. (2011) apresentam desenvolvimento de sistema similar para gestão de gasoduto da Saudi Aramco, na Arábia Saudita, com nome *Master Gas System*, contando com detecção e vazamento e condições de operação dos produtores, consu-

midores e equipamentos intermediários, amplamente disponível para os diversos interessados.

No Mar do Norte, Velde (2013) apresenta característica e capacidade de um sistema PMS operado pela GASSCO, denominada GASLED. São mais de $7\,800\,km$ de dutos *offshore* acompanhando qualidade do gás, com foco em pontos submarinos de mistura, aumento da capacidade de escoamento, avaliações de cenários futuros e aviso aos envolvidos em caso de perda da especificação do gás.

Neacsu e Eparu (2013) apresentam uma proposta de sistema para gestão de malha a ser utilizado na Romênia em malha *onshore* de escoamento de gás natural processado, com a presença de estações de compressão intermediárias, e dados de campo provenientes de sistema SCADA, com foco em gerenciar interfaces entre os diversos envolvidos.

O trabalho de Dandrea, Rotava e Mukati (2015) descreve a implementação de um sistema PMS em malha de gasodutos *offshore*, com modelagem para escoamento multifásico, transiente e em tempo real, com fluido em escoamento sendo gás natural não processado. Este simulador em tempo real trata não somente do escoamento nos dutos, mas também em *chokes* para controle de vazão em pontos intermediários.

2.7 Conclusões da revisão bibliográfica

Apesar de todo o desenvolvimento apresentado no Capítulo 2, ainda são necessários avanços em diferentes efeitos presentes numa malha de gasodutos e sua estimação de estado. A simplificação utilizada de escoamento isotérmico não é razoável para gasoduto *offshore* em LDA profunda, onde as temperaturas do gás variam de $4\,°C$ a $60\,°C$ em condições normais de operação.

Isso mostra a necessidade de ser utilizada a equação da conservação de energia para descrever o problema de escoamento em gasodutos. A utilização desta equação traz consigo a necessidade de linearizações no comportamento da entalpia específica e uso de estratégias adequadas de solução das equações discretizadas.

Este trabalho busca investigar a lacuna apresentada, verificando influências da equação da conservação da energia no cenário de gasoduto em águas profundas, e expande a aplicação da estimação de estado para este cenário.

3 MODELO DE ESCOAMENTO

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático utilizado para descrição do escoamento na malha de gasodutos. As equações são apresentadas em sua forma conservativa e após trabalho para permitir a solução algébrica dos perfis calculados. Os passos intermediários para a transição entre as diferentes formas podem ser encontrados nos apêndices.

Conforme descrito no Capítulo 2, o problema estudado é de escoamento de gás natural não processado em gasodutos *offshore* com variação temporal das propriedades de escoamento. Por se tratar de um assunto complexo são necessárias simplificações na modelagem de forma a tornar a solução viável e com velocidade adequada. Tais simplificações e suas consequências serão abordadas neste capítulo, com proposta de método de solução das equações geradas e algoritmo estruturado para a simulação de escoamento.

3.1 Malha de gasodutos

O escoamento de gás natural é realizado em longos e delgados gasodutos, e soluções unidirecionais apresentam resultados similares a abordagem bidimensional (OOSTERKAMP; HELGAKER; YTREHUS, 2015). Em se tratando de um escoamento em malha, com diferentes correntes, a composição do gás é de importância para o acompanhamento. Muito embora a variação da composição não seja significativa para o escoamento em si, ela é importante por questões comerciais.

Não é considerada a troca de fases no escoamento, sendo este tratado como monofásico através de modelo de mistura. Esta abordagem é compatível com gasodutos monofásicos, onde não existe a presença de líquidos ou, quando esta existe, é proveniente de condensação a partir do gás no próprio gasoduto.

3.2 Equações de conservação

Por se tratar de um problema unidimensional, transiente e térmico, são utilizadas três equações de conservação. a de massa, a de quantidade de movimento e a de energia. A equação da conservação de massa, que depende das variáveis de massa específica ρ e velocidade u no tempo t e no espaço s, pode ser escrita como (HERRÁN-GONZÁLEZ et al., 2009):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(\rho u) = 0 \tag{3.1}$$

Nesta equação aparecem as primeiras variáveis para avaliação. Apesar de compatíveis com o problema, é conveniente a alteração destas variáveis para outras relacionadas diretamente com o escoamento de gás natural, como a pressão e a vazão mássica ou molar.

A segunda equação de conservação utilizada é a de quantidade de movimento, que relaciona a queda de pressão em um escoamento com a viscosidade e geometria. Esta equação, que também depende da pressão P, do fator de atrito f, do diâmetro interno da tubulação D, da aceleração da gravidade g e da direção do escoamento com relação a gravidade θ, é dada a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial s}\left(\rho u^2\right) + \frac{\partial P}{\partial s} = -\frac{f \rho u \left|u\right|}{2D} - \rho\, g\, \mathrm{sen}\theta \tag{3.2}$$

Aqui são utilizados o fator de atrito, que depende de parâmetros do escoamento e do duto e relaciona perda viscosa no escoamento a pressão, e inclui também a geometria da linha com base na sua inclinação. A presença de um termo dependente da velocidade ao quadrado dificulta a solução desta equação.

Também temos a conservação da energia, que permite avaliar o comportamento da temperatura no escoamento, que por sua vez influência nas demais variáveis a serem avaliadas de forma menos significativa, mas ainda assim com efeito nos resultados da simulação. Esta equação adiciona variáveis de entalpia específica h, de troca térmica com o meio $\dot{Q}$ e de temperatura T.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(h + \frac{u^2}{2} - \frac{P}{\rho}\right)\rho\right] + \frac{\partial}{\partial s}\left[\left(h + \frac{u^2}{2}\right)\rho\right] = \dot{Q} - \rho\, u\, g\, \mathrm{sen}\theta \tag{3.3}$$

Esta equação utiliza o conceito de entalpia; esta propriedade pode ser determinada e depende da temperatura, da pressão e da composição do fluido no local. Também aparece a troca térmica com o meio externo, que depende de modelagem específica para permitir a solução das

equações.

Por se tratar de um problema onde é interessante o acompanhamento da qualidade do gás, são utilizadas equações de conservação das espécies. Este equacionamento é similar a conservação de massa, mas aplicada separadamente para cada componente do escoamento. Aqui é utilizado o conceito de fração molar do componente na mistura X_i

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho X_i\right) + \frac{\partial}{\partial s}\left(\rho u X_i\right) = 0 \tag{3.4}$$

A caracterização do fluido é importante para a determinação de propriedades intermediárias, e para o caso de malha de gasoduto *offshore* esta é feita com aproximadamente 14 componentes, cada qual com sua equação de conservação. Como o fluido é composto por todos os componentes e a velocidade é comum a todos eles, a soma das equações de conservação de espécies é a conservação de massa.

Como as variáveis descritas de massa específica e velocidade são incomuns para o uso direto, as equações são modificadas para uso de variável de pressão, medida diretamente, e de vazão molar, relacionada a vazão em condição normal, unidade utilizada para escoamento de gás natural no Brasil.

Dado o problema composicional em avaliação, esta primeira mudança de variáveis pode ser realizada usando a lei dos gases reais conforme abaixo, considerando o fator de compressibilidade do gás z, a constante universal dos gases R, a massa molar do gás M_w e a composição do gás X.

$$\rho = \frac{P\, M_w\left(X\right)}{z\left(P, T, X\right) R\, T} \tag{3.5}$$

A alteração da velocidade pode ser feita com a utilização de propriedades geométricas do escoamento como a área de secção transversal A disponível para o fluxo e a vazão molar $\dot{n}$:

$$\rho\, u = \frac{\dot{n} M_w\left(X\right)}{A} \tag{3.6}$$

Com estas alterações de variáveis o problema de conservação de massa fica mais fácil de ser equacionado, e o uso de pontos de união de gasodutos numa malha fica direto, pela pressão comum nestas uniões, e as condições de contorno ficam óbvias, como pressão constante ou vazão constante.

Tabela 3.1: Propriedades dos componentes do gás natural.

Composição	M_{w_i} $[kg/kmol]$	T_c $[°C]$	$P_c[bar]$
N_2	28,014	126,2	33,94
CO_2	44,01	304,2	73,76
C1	16,043	190,6	46,00
C2	30,07	305,4	48,84
C3	44,097	369,8	42,46
iC4	58,124	408,1	36,48
nC4	58,124	425,2	38,00
iC5	72,151	460,2	33,84
nC5	72,151	469,6	33,74
C6	86,178	507,4	29,69
C7	100,205	540,4	27,36
C8	114,232	568,8	24,82
C9	128,258	594,6	23,1
C10	142,285	617,6	21,08

Ao final da modificação das variáveis, o problema de escoamento fica descrito com variáveis de pressão, vazão molar, temperatura e composição, todas relacionadas diretamente a medidas disponíveis de sistemas reais.

3.3 Equações de fechamento

Para a solução das equações de conservação ainda se fazem necessárias formas de calcular propriedades intermediárias do escoamento, como a compressibilidade do gás natural, a entalpia e outros. Cada uma destas propriedades é calculada separadamente por teoria específica.

3.3.1 Massa molar

A massa molar, utilizada nas equações de conservação depende da composição do gás natural e da massa molar de cada um destes componentes, numa média ponderada pela fração molar do componente. Os hidrocarbonetos mais leves e contaminantes influentes no escoamento são utilizados na modelagem do problema, e suas propriedades são dadas na tabela 3.1.

Onde usamos a temperatura crítica do componente T_c, a pressão crítica P_c e a massa molar do componente M_{w_i}. A massa molar da mistura pode ser calculada como:

$$M_w = \sum_{i=1}^{14} X_i \, M_{w_i} \tag{3.7}$$

Outros componentes podem estar presentes no gás natural. O mais notável, H_2S, tem impacto significativo na integridade dos dutos. Mas sua pequena quantidade, da ordem de partes por milhão, torna-o pouco influente no comportamento do escoamento, e por isso pode ser desconsiderado.

3.3.2 Compressibilidade do gás natural

A compressibilidade do gás natural é utilizada para relacionar a massa específica deste a uma determinada pressão e temperatura a pressão que este gás está submetido. Existem diferentes equacionamentos para este cálculo, e neste trabalho será utilizado o proposto por Peng e Robinson (1976). Neste trabalho é apresentado desenvolvimento para estimativa da compressibilidade de um gás a partir de sua pressão, composição e temperatura, com uso das propriedades críticas dos componentes. Estas propriedades podem ser encontradas na tabela 3.1. Também são utilizados fatores de iteração entre componentes, que podem ser encontrados em Pedersen, Christensen e Shaikh (2014).

3.3.3 Entalpia

Para avaliações térmicas se faz necessário algum meio de determinação da entalpia específica para a solução da equação de conservação da energia. São disponíveis diferentes formas de se fazer este cálculo. Formas mais simples definem equacionamento baseado na densidade, pressão e temperatura do gás (FARZANEH-GORD; RAHBARI, 2011).

Para o presente trabalho será utilizada abordagem que utiliza a composição, pressão e temperatura do gás (PEDERSEN; CHRISTENSEN; SHAIKH, 2014), como forma de avaliar de forma mais precisa os efeitos térmicos no escoamento. Essa abordagem é coerente com a formulação proposta para o problema e traz consigo maior precisão em efeitos de resfriamento isoentálpico, típico de *chokes*.

Este modelo prevê duas fontes calculadas para a entalpia do gás. O primeiro é dito entalpia do gás ideal, e depende da temperatura do gás. A segunda é a entalpia residual, dependente da temperatura e da fugacidade do gás. Esta relação pode ser dada por:

$$h = \sum_{i=1}^{14} X_i \, h_i^{ideal} + h^{res} \tag{3.8}$$

O primeiro termo pode ser calculado com o uso de constantes empíricas e uso de integração a partir de uma temperatura de referência, como $T_{Rref} = 0\,°C$. As constantes utilizadas dependem do componente avaliado, e podem ser encontradas em Reid, Prausnitz e Poling (1987) e o equacionamento é dado por:

$$h_i^{ideal} = \int_{T_ref}^{T} \left(C_{1,i} + C_{2,i}T + C_{3,i}T^2 + +C_{4,i}T^3 \right) dT \tag{3.9}$$

O termo para a entalpia residual depende da fugacidade, que é determinada pela equação de estado utilizada. Sua forma geral é dada por:

$$h^{res} = R\,T^2 \frac{\partial \left(\ln \varphi\right)}{\partial T} \tag{3.10}$$

Maiores detalhes para o modelo e algoritmo de cálculo da entalpia específica pode ser encontrado em Pedersen, Christensen e Shaikh (2014). Os resultados foram comparados a *software* comercial PVTSim para validação, com comportamento similar para uma grande variação da composição, temperatura e pressão.

3.3.4 Viscosidade

A viscosidade de um gás em escoamento pode ser descrita de diferentes formas. Uma forma mais rebuscada para se descrever este comportamento é referenciar as propriedades críticas do gás com as do metano, uma vez que a viscosidade do metano é bem descrita na literatura (PEDERSEN; FREDENSLUND, 1987).

Apesar de precisa para uma maior variação dos parâmetros envolvidos, esta abordagem é complexa e de difícil implementação. Uma vez que os resultados são pouco influenciados pela viscosidade do gás natural, é utilizada abordagem mais simples baseada na densidade do gás natural, sua temperatura pseudo reduzida (T_{Pr}), sua pressão pseudo reduzida (P_{Pr}), uma serie de constantes (A_i) e quantidade de contaminantes presentes no gás.

$$\mu = \mu_{1atm} \left[1 + \frac{A_{11}}{{T_{Pr}}^5} \left(\frac{{P_{Pr}}^4}{{T_{Pr}}^{20} + {P_{Pr}}^4} \right) + A_{12} \left(\frac{P_{Pr}}{T_{Pr}} \right)^2 + A_{13} \left(\frac{P_{Pr}}{T_{Pr}} \right) \right] \tag{3.11}$$

onde:

$$\mu_{1atm} = \mu_{1atm}^{uncorrected} + \Delta\mu_{N_2} + \Delta\mu_{CO_2} + \Delta\mu_{H_2S} \tag{3.12}$$

$$\mu_{1atm}^{uncorrected} = \left(A_1\gamma_{gMix}^{A_2}\right)(T - 459\ 67) + A_3 + A_4\ \log_{10}\gamma_{gMix} \tag{3.13}$$

$$\Delta\mu_{N_2} = y_{N_2}\left(A_5\ \log_{10}\gamma_{gMix} + A_6\right) \tag{3.14}$$

$$\Delta\mu_{CO_2} = y_{CO_2}\left(A_7\ \log_{10}\gamma_{gMix} + A_8\right) \tag{3.15}$$

$$\Delta\mu_{H_2S} = y_{H_2S}\left(A_9\ \log_{10}\gamma_{gMix} + A_10\right) \tag{3.16}$$

Informações quanto as constantes utilizadas A_i e teoria envolvida podem ser encontradas em Jarrahian e Heidaryan (2014). O valor de γ_{gMix} é baseada na composição do gás em escoamento.

3.3.5 Fator de atrito

Por se tratar de um problema de escoamento monofásico, a perda de carga pode ser estimada com o uso do fator de atrito de Darcy-Weisbach. Como descrito, o escoamento em avaliação é de gás natural em tubulações, que tem por característica um alto Re dada a baixa viscosidade do gás natural.

Para isto pode ser utilizado o coeficiente de resistência proposto por Colebrook et al. (1939), que depende da rugosidade interna do duto ε, cujo formato se apresenta em forma de equação implícita:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7D} + \frac{2{,}51}{R_e\sqrt{f}}\right) \tag{3.17}$$

Este formato é inconveniente para uso por necessitar de método iterativo para avaliação do fator de atrito. A literatura apresenta aproximações com forma explicita de diversas maneiras. Abaixo temos a forma utilizada neste trabalho, proposta por (SWAMEE; JAIN, 1976).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left[\frac{\varepsilon/D}{3{,}71} + \left(\frac{7}{Re}\right)^{0{,}9}\right] \tag{3.18}$$

Uma simplificação sem grande impacto nos resultados pode ser realizada considerando o escoamento totalmente turbulento, com grande Re. Nesta simplificação considera-se apenas o termo relativo a rugosidade da tubulação. Essa simplificação é precisa para escoamento onde o fluido seja de baixa viscosidade, como em geral é o caso de gasodutos.

A influência desta simplificação será avaliada em aplicações de simulação de escoamento de malha de gasodutos. O interessante desta simplificação é eliminar a necessidade de cálculo da viscosidade para determinação do Re, o que torna o procedimento numérico mais simples.

3.3.6 Troca térmica

Diferentes abordagens podem ser adotadas para o cálculo da troca térmica num gasoduto. Fisicamente o gasoduto é composto por diferentes camadas metálicas e polimérica superpostas, cada uma com diferente capacidade e condutividade térmica, o que traz consigo uma complexidade de modelagem para transientes.

Uma abordagem mais robusta é o uso de equacionamento para cada camada. Isto traz consigo a necessidade de mais uma variável de estado com uma equação de conservação para a solução do problema de escoamento. Muito embora isso possa ser feito, o custo computacional não justifica a melhoria na precisão dos resultados (FARZANEH-GORD; RAHBARI, 2018).

Como os transientes envolvendo esta capacidade térmica das camadas do gasoduto são da ordem de horas, e o problema de interesse tem dinâmica mais lenta, é interessante desconsiderar esta característica para simplificação do modelo e maior velocidade de processamento.

Para o caso simplificado proposto, usando o coeficiente global de troca térmica U, a temperatura no exterior do duto T_{amb} e a área superficial disponível para troca térmica A_{sup}, a troca térmica pode ser colocada como:

$$\dot{Q} = -U\left(T - T_{amb}\right)A_{sup} \tag{3.19}$$

Onde o coeficiente global de troca térmica pode ser calculado a partir da condutividade térmica e espessura de cada camada do duto, conforme Fig. 3.1, somadas a um efeito de convecção nas paredes interna e externa do duto. Comportamento similar é adotado para dutos

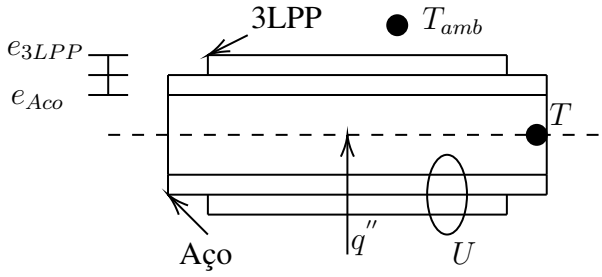


Figura 3.1: Configuração construtiva típica de um gasoduto.

flexíveis, apesar de sua maior complexidade construtiva.

Estes dutos normalmente são compostos por uma camada de aço, de alta condutividade, e uma serie de camadas de polipropileno, ou 3LPP, de baixa condutividade, a de maior influência para a troca térmica. Para o problema de escoamento e gasoduto, os efeitos de convecção são muito menos significativos que a condutividade do polipropileno, e podem ser desconsiderados.

3.4 Condições de contorno e iniciais

Por se tratar de um conjunto de equações diferenciais parciais se faz necessário a utilização de condições de contorno para sua solução. Matematicamente podem ser propostas diferentes formas para as condições de contorno num problema de malha, mas as mais comuns são bastante simples.

Podem ser propostas condições de vazão constante numa determinada extremidade do duto ou uma pressão constante na extremidade do duto (DURGUT; LEBLEBICIOĞLU, 2016). Condições mistas envolvendo vazão e pressão são encontradas na literatura (WIGGINS et al., 1996), mas são usados com mais frequência em problemas envolvendo poços produtores e injetores, e não são utilizadas no presente trabalho.

Como as variáveis básicas para o modelo de escoamento proposto são relativas a vazão molar ou em condições padrão e a pressão local, estas são formas simples de se colocar as condições de contorno numericamente, além de serem formas representativas de avaliação de escoamento em gasodutos no Brasil, uma vez que são fundamentadas na legislação vigente.

Inicialmente definimos como pode ser uma condição de pressão definida. Esta condição é usualmente encontrada em nós de saída de um duto, quando este entrega o gás numa UPGN ou numa UEP importadora que trabalha com o objetivo de manter a pressão num patamar

adequado, conforme descrito abaixo:

$$P_i = f\,(t) \tag{3.20}$$

A segunda condição de contorno utilizada é a de vazão definida, que considera um fluxo volumétrico a ser colocado ou retirado do duto. Neste caso a variável de vazão molar $\dot{n}_i$ é colocada no equacionamento. Apesar de não intuitiva, esta variável é relacionada diretamente a vazão volumétrica em condição padrão.

$$\dot{n}_i = f\,(t) = Q_i \,/\, 0{,}4902 \tag{3.21}$$

Onde a constante 0,4902 surge a partir da definição de condição de referência na pressão ($1\,atm$) e temperatura ($20\,°C$).

Já para condições inicias existem duas diferentes abordagens. A primeira é utilizada para avaliações em regime permanente ou para transientes. Nesta abordagem são definidos valores para cada elemento de malha, conforme equacionamento abaixo:

$$P_i = f\,(x) \tag{3.22}$$

$$\dot{n}_i = f\,(x) \tag{3.23}$$

Uma segunda forma de se definir as condições iniciais do escoamento consiste de uma avaliação em regime permanente após a utilização da abordagem anterior. Em termos práticos, aqui colocamos uma solução de regime permanente como condição inicial para uma avaliação transiente.

3.5 Nós intermediários

Como se trata de uma malha de escoamento, não apenas um gasoduto singelo, existe a possibilidade de uma união entre diferentes dutos, com ou sem controle sobre as correntes envolvidas. O caso mais comum é a mistura direta em equipamentos submarinos do tipo PLEM.

Com estas características fica preferível a utilização de mais um tipo de nó, não apenas dos tipo pressão definida e vazão definida. Aqui a pressão é comum aos dutos que compartilham um mesmo nó, enquanto que a massa se conserva entre entradas e saídas de fluido e

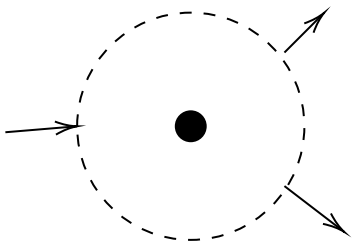


Figura 3.2: Configuração de um nó intermediário com três dutos conectados.

pressurização do nó, de forma similar aos demais pontos de malha, mas com a possibilidade de mais fluxos acontecerem.

A este nó damos o nome de intermediário, sendo que ele aparece em locais de integração de diferentes dutos, possibilitando a construção e simulação de malhas de escoamento. A Fig. 3.2 mostra um desenho esquemático para três dutos compartilhando um mesmo nó intermediário.

Nesta configuração, com a utilização de malha defasada, pode ser aplicada diretamente a conservação de massa no volume de controle definido. Em termos práticos, isso significa que a diferença entre o que entra e o que sai do nó é equivalente a variação da quantidade interna de massa. Assim, é necessário definir o volume do nó para cálculos transientes.

3.6 Equações algébricas

Com a aplicação do "método dos volumes finitos", (MVF), é possível se trabalhar as equações propostas anteriormente e, a partir das equações diferenciais parciais, obter um conjunto de equações algébricas com solução numérica possível (MALISKA, 1995). Para tanto se faz necessário definir o esquema temporal e espacial de interpolação.

Para o esquema temporal este trabalho utiliza o dito implícito, onde variáveis intermediarias de cálculo são avaliadas no instante de tempo calculado. Esta abordagem traz consigo mais estabilidade da solução para intervalos de integração maiores, mas com uma maior difusividade dos resultados.

Para interpolação espacial é utilizado o *upwind* de primeira ordem, onde variáveis intermediárias à discretização espacial são avaliadas diretamente a depender da direção de escoamento, com uma simplificação das equações discretizadas obtidas, mas uma maior difusão nos resultados.

O resultado obtido é um conjunto de equações algébricas com solução estável inde-

pendente do intervalo de integração definido, adequada ao cálculo de soluções de regime permanente, transientes longos ou transientes curtos.

Por conveniência é utilizada malha defasada para discretização das equações de conservação, levando a uma menor necessidade de uso da interpolação espacial e permitindo o uso de nós intermediários propostos para o escoamento em malha. O passo a passo da alteração de variáveis e discretização das equações de conservação pode ser encontrado no Apêndice B.

A estratégia de solução destas equações é baseada em método direto, onde grandes matrizes e vetores são construídos para o cálculo de novas variáveis do escoamento, onde estas matrizes são invertidas e o problema linear é resolvido através de método LU.

3.6.1 Alteração de variáveis

As equações de conservação são baseadas em variáveis como velocidade v e massa específica ρ, que não são convenientes para a gestão de escoamento em gasodutos. Propriedades mais convenientes são a pressão P e a vazão volumétrica Q, que tem medição direta e disponível de campo, além de serem consideradas na legislação vigente.

A partir da equação dos gases reais é possível se trabalhar de forma a conseguir uma alteração de variáveis conveniente. Neste caso a alteração de variáveis pode ser conseguida como:

$$\rho = \frac{P\,M_w}{z\,R\,T} \tag{3.24}$$

A segunda transformação diz respeito a variável de fluxo. Como a velocidade depende de uma série de parâmetros locais para definição, uma vazão é mais fácil de ser trabalhada. Uma variável relacionada a vazão em condições padrão, conveniente de ser utilizada, é a vazão molar. Esta transformação é dada abaixo:

$$\dot{n} = \frac{\rho\,v\,A}{M_w} \tag{3.25}$$

A temperatura é uma variável utilizada nos cálculos do escoamento, mas já pode ser utilizada diretamente sem problemas. Por outro lado, a entalpia do gás não é linear com relação a temperatura, e para cálculo é necessária sua linearização. Isto pode ser conseguido com a utilização de derivadas parciais no ponto de cálculo:

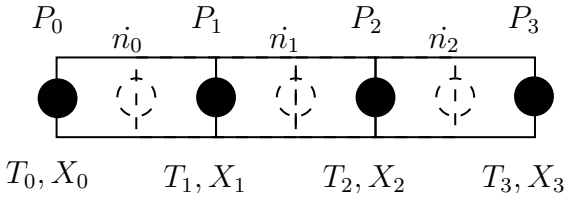


Figura 3.3: Disposição das variáveis na geometria de escoamento.

$$dh = \frac{\partial h}{\partial P}\, dP + \frac{\partial h}{\partial T}\, dT \tag{3.26}$$

Estas derivadas parciais podem ser calculadas a partir da composição, pressão e temperatura do gás, conforme descrito em Pedersen, Christensen e Shaikh (2014).

3.6.2 Alocação das variáveis

Com a alteração de variáveis proposta, ainda é necessário definir onde serão alocadas as variáveis a serem calculadas. Para isto se faz necessário o uso de alguma informação quanto a geometria de escoamento, como diâmetro, comprimento, angulo, rugosidade interna, troca térmica e temperatura no exterior.

Além disso, pelo uso de malha defasada, a alocação das variáveis de fluxo é intermediaria as demais, fazendo com que sejam necessárias uma menor quantidade de avaliações de variáveis fora do seu ponto de cálculo. A posição e índice destas variáveis pode ser encontrada na Fig. 3.3.

É importante notar que um trecho de escoamento se inicia e termina numa variável de pressão.

3.6.3 Conservação de massa

A conservação de massa é a primeira equação a ser trabalhada. Neste caso, após mudança de variáveis e aplicação do MVF, ela se torna:

$$\frac{1}{\Delta t}\left(\frac{P_i^{t+1}}{z_i^{t+1}\, R\, T_i^{t+1}} - \frac{P_i^{t}}{z_i^{t}\, R\, T_i^{t}}\right) + \frac{\dot{n}_{i+1}^{t+1} - \dot{n}_i^{t+1}}{A_i\, L_i/2 + A_{i+1}\, L_{i+1}/2} = 0 \tag{3.27}$$

3.6.4 Conservação da quantidade de movimento

Para a conservação da quantidade de movimento o VC se desloca e agora as variáveis de fluxo se encontram no centro deste. Nestas condições a equação algébrica se torna:

$$\frac{L_i}{\Delta t}\left(\dot{n}_i^{t+1}-\dot{n}_i^{t}\right)+\widehat{u}_i\,\left(\dot{n}_{I+1}-\dot{n}_I\right)+\frac{A}{M_{W_i}^{t+1}}\left(P_{i+1}^{t+1}-P_i^{t+1}\right)=-L_i\widehat{f}_i^{t+1}\,\frac{\left|\widehat{u}_i^{t+1}\right|}{2\,D_i}\,\dot{n}_i^{t+1} \\ -\frac{A_i\,P_I^{t+1}}{z_I^{t+1}\,R\,T_I^{t+1}}\,g\,\Delta y_i \tag{3.28}$$

3.6.5 Conservação da energia

De forma similar as anteriores, a conservação de energia pode ser transformada em algébrica e ter suas variáveis alteradas. Neste caso ela se torna:

$$A_i\frac{L_i+L_{i+1}}{2}\left[\frac{\widehat{\rho}_i^{t+1}}{\Delta t}\,\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\bigg|_i^{t+1}\left(T_i^{t+1}-T_i^{t}\right)-\frac{1}{\Delta t}\frac{P_i^{t+1}}{M_{W_i}^{t+1}}\right]+ \\ \widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\bigg|_i^{t+1}\left(\widehat{\dot{n}}_{I+1}^{t+1}\,T_{I+1}^{t+1}-\widehat{\dot{n}}_I^{t+1}T_I^{t+1}\right)=\left(T_{amb}-T_i^{t+1}\right)U\,A_{sup}+\dot{n}_I^{t+1}\Delta y \tag{3.29}$$

3.6.6 Conservação de espécies

Uma vez que o problema é composicional, se faz necessário o acompanhamento da composição do gás natural. Na forma algébrica ela tem a forma:

$$\frac{1}{\Delta t}\left(\widehat{\rho}_i^{t+1}X_i^{t+1}-\rho_i^{t}X_i^{t}\right)+\frac{2}{A_i\left(L_i+L_{i+1}\right)}\left(\widehat{\dot{n}}_{I+1}^{t+1}\,X_{i+1}^{t+1}-\widehat{\dot{n}}_I^{t+1}\,X_i^{t+1}\right)=0 \tag{3.30}$$

3.6.7 Nós intermediários

Para o esquema de cálculo proposto, temos:

$$\frac{Vol_i}{\Delta\,t}\left(\frac{P_i^{t+1}}{z_i^{t+1}\,R\,T_i^{t+1}}-\frac{P_i^{t}}{z_i^{t}\,R\,T_i^{t}}\right)+\sum\dot{n}_{in}^{t+1}-\sum\dot{n}_{out}^{t+1}=0 \tag{3.31}$$

e

$$P_1 = P_2 = \cdots = P_n \tag{3.32}$$

3.6.8 Condições de contorno

Para as condições de contorno temos equacionamento bastante simples. No caso de uma extremidade onde a pressão é definida:

$$P_i^{t+1} = P_0 \tag{3.33}$$

e para vazão como condição definida:

$$\dot{n}_i^{t+1} = Q_i/0{,}4902 \tag{3.34}$$

É importante notar que esta abordagem considera valores fixos para todo o Δt, o que pode ser considerada uma simplificação da realidade em alguns casos.

3.7 Equações na forma matricial

O número de equações depende da quantidade de variáveis a ser calculada, que por sua vez é uma função da discretização de escoamento proposta. Para a solução das equações é necessário algum método numérico. Métodos ponto-por-ponto são mais simples de serem programados, porém tem uma velocidade de processamento mais baixa.

Métodos linha-por-linha tem uma complexidade maior, e por se tratar de um problema unidimensional, possuem solução direta, e assim serão utilizados para a resolução do sistema de equações obtido anteriormente. Para isso, é necessário montar uma matriz com as equações desenvolvidas acima.

3.8 Método numérico

Para a solução das equações na sua forma matricial é necessária a inversão da matriz obtida na montagem do problema. Esta matriz tem por característica a presença de uma grande quantidade de zeros, com benefícios na consideração de matriz esparsa.

A consideração de matriz esparsa leva a se colocar a matriz não mais como uma estrutura rígida de dados, mas como um apontamento de quais elementos não são nulos e qual o seu valor. Isso leva a um menor gasto de memória e, principalmente, numa maior velocidade de processamento na inversão da matriz. Maiores informações a respeito do método utilizado podem ser encontradas em Li (2005) e Demmel (1999).

3.9 Eficiência e precisão do modelo proposto

Como forma de averiguação do modelo de escoamento proposto foram realizados testes comparativos a outros *softwares* e comportamento de gasodutos *offshore* reais. Os resultados são apresentados no Capítulo 5. Os resultados mostram uma velocidade de processamento alta e precisão compatível a *softwares* alternativos.

4 ESTIMAÇÃO DE ESTADO

Nesta seção são mostrados os desenvolvimentos e teoria envolvida na estimação de estado aplicada ao escoamento em malhas de gás natural. Conforme mostrado na Seção 2, algumas técnicas já existem para estimação de estado em malhas de gasodutos. Entretanto, estas técnicas, não consideram a evolução temporal do sistema, sendo simples aproximações baseadas em erros esperados.

As técnicas propostas para estimação através de filtro de Kalman utilizam informações referentes ao histórico das diferenças entre medições e variáveis calculadas, visando minimizar o erro quadrático nas estimativas do estado.

4.1 Estimação

Teoria da estimação é o ramo da estatística que se dedica a estimar valores, parâmetros ou estados baseando-se em dados com erro aleatório. Estes valores, parâmetros ou estados descrevem configurações físicas do problema de interesse. Um estimador busca aproximar os parâmetros desconhecidos do seu valor real através de medidas sujeitas a erros aleatórios com variância por hipótese, conhecida.

Nesta teoria, os dados são assumidos como aleatórios, compostos também por ruído, onde se busca encontrar um valor para variáveis mais adequado que o valor medido, já que este segundo tem erro aleatório embutido. Em se considerando um histórico de medições, e não apenas a medição mais atual, é possível, de alguma forma, separar do valor medido o seu ruído.

Quando a evolução temporal do sistema, isto é, sua dinâmica, é incluída, o processo de estimação denomina-se estocástico. Um estimador estocástico bastante utilizado é o filtro de Kalman, em suas diversas versões. De forma geral, o filtro de *Kalman* estima um estado a partir de medições e de um modelo assumido para a dinâmica do sistema, além de hipóteses acerca da estatística dos erros presentes nas medidas e no modelo assumido para a planta (sistema). Este filtro tem sido aplicado com sucesso em diversas áreas do conhecimento, como posicionamento

ou localização. O equacionamento básico para aplicação deste filtro é dado na Sec. 4.2.

Na bibliografia apresentada, podem ser encontrados dois modos tradicionais de estimação de estado aplicados a malhas de escoamento de gás natural não processado. Estes métodos são o método de erros similares e de máxima verossimilhança, sendo que não consideram o comportamento dinâmico do problema, apenas a situação atual, para alocação dos erros.

4.2 Fundamentação

Com o advento do método dos mínimos quadrados, tem-se o início do desenvolvimento da estimação de estado. Sorenson (1970) apresenta a evolução da estimação a partir deste método, até a concepção do filtro de Kalman. Este trabalho apresenta aspectos anteriores a estruturação da teoria de estimação, em astronomia.

A abordagem de Kalman (1960) para a solução do problema de estimação estocástica do estado leva em consideração as incertezas tanto no modelo do estado (sistema, planta ou processo) quanto das observações (medidas), ambos considerados ruídos brancos, gaussianos e de médias nulas. O estimador (filtro de Kalman) minimiza a covariância do erro entre o estado resultante da propagação das equações da dinâmica do modelo e aquele que efetivamente gera os resultados observados. Para modelos lineares e incertezas com a estatística mencionada, este estimador quadrático é ótimo.

A seguir estão apresentadas as equações básicas para utilização do filtro de Kalman em sua forma original, aplicável a sistemas lineares. O estado a ser estimado é tratado por $\mathbf{x}$ e evolve todas as variáveis necessárias para descrever o sistema, sendo o modelo dinâmico descrito por F que indica como o estado evolui no tempo e o modelo de observação descrito por H, que faz a correlação entre observação e estado. Também é utilizado um vetor de controle $\mathbf{u}$ que aponta constantes necessárias para a evolução do estado e uma matriz de controle B que indica a relação entre o estado e o controle, para a predição de estado. Maiores detalhamento para o filtro de Kalman podem ser encontrados no Apêndice A.

Predição do estado

$$\mathbf{x}_{t+1|t} = F_{t+1}\mathbf{x}_{t|t} + B_{t+1}\mathbf{u}_{t+1} \tag{4.1}$$

Para a predição da covariância são usadas também a matriz de covariância P, que indica a incerteza no estado estimado e a matriz de ruído do modelo Q, que indica a imprecisão no modelo da dinâmica do sistema.

Predição da covariância

$$P_{t+1|t} = F_{t+1}P_{t|t}F_{t+1}^T + Q_{t+1} \tag{4.2}$$

Na etapa de resíduo de medição são usados os conceitos do vetor de resíduo de medição $\mathbf{y}$ que indica a diferença entre o estado e a medida, de observação $\mathbf{z}$ que é o vetor dado pelas medidas e da matriz de observação H.

Resíduo da medição

$$\tilde{\mathbf{y}}_{t+1} = \mathbf{z}_{t+1} - H_{t+1}\mathbf{x}_{t+1|t} \tag{4.3}$$

Para o resíduo da covariância é usada a matriz de resíduo da covariância S, uma matriz intermediária para o cálculo da covariância, e a matriz do ruído das medidas R, que indica a imprecisão dos sensores utilizados.

Resíduo da covariância

$$S_{t+1} = H_{t+1}P_{t+1|t}H_{t+1}^T + R_{t+1} \tag{4.4}$$

Chegando à matriz do ganho de Kalman K, que indica quanto o filtro confia nas medidas e no modelo da dinâmica do sistema.

Ganho de Kalman

$$K_{t+1} = P_{t+1|t}H_{t+1}^T S_{t+1}^{-1} \tag{4.5}$$

Estado atualizado (estimativa a posteriori)

$$\mathbf{x}_{t+1|t+1} = \mathbf{x}_{t+1|t} + K_{t+1}\tilde{\mathbf{y}}_{t+1} \tag{4.6}$$

Covariância estimada (estimativa a posteriori)

$$P_{t+1|t+1} = (I - K_{t+1}H_{t+1})P_{t+1|t}(I - K_{t+1}H_{t+1})^T + K_{t+1}RK_{t+1}^T \tag{4.7}$$

As hipóteses de linearidade do modelo e estatística gaussiana para o ruído certamente não são verdadeiras para o escoamento de gás natural não processado em malhas de gasoduto. Desta forma, são necessárias modificações para a utilização do filtro de *Kalman* no problema de interesse deste trabalho. O filtro não linear utilizado neste trabalho é o Filtro Estendido de Kalman, FEK, com manutenção dos conceitos básicos descritos acima.

4.3 Filtro estendido de Kalman

Os problemas de engenharia encontrados atualmente são, quase que na sua totalidade, não lineares; porém a formulação anteriormente apresentada restringe-se a sistemas lineares. Algumas são as abordagens propostas para sua utilização em sistemas não lineares, sendo adotado para este trabalho o filtro de Kalman estendido, que lineariza as equações de predição de estado e o modelo de observação localmente através de series de Taylor, com a obtenção de equacionamento localmente linear para o filtro (SIMON, 2006). O modelo não linear para o estado e para as medições é dado por:

$$\mathbf{x}_{t+1} = f(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_{t+1} + w_{t+1}) \tag{4.8}$$

$$\mathbf{z}_{t+1} = h(\mathbf{x}_{t+1}, v_{t+1}) \tag{4.9}$$

Assim, as equações para predição de estado e covariância se tornam:

Predição:

$$\mathbf{x}_{t+1|t} = f(\mathbf{x}_{t|t}, \mathbf{u}_{t+1}) \tag{4.10}$$

$$P_{t+1|t} = F_t \, P_{t|t} \, F_t^T + Q_{t+1} \tag{4.11}$$

Enquanto que a correção toma a forma abaixo:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{t+1} = \mathbf{z}_{t+1} - h(\mathbf{x}_{t+1|t}) \tag{4.12}$$

$$S_{t+1} = H_{t+1} P_{t+1|t} H_{t+1}^T + R_{t+1} \tag{4.13}$$

$$K_{t+1} = P_{t+1|t} H_{t+1}^T S_{t+1}^{-1} \tag{4.14}$$

$$\mathbf{x}_{t+1|t+1} = \mathbf{x}_{t+1|t} + K_{t+1} \tilde{\mathbf{y}}_{t+1} \tag{4.15}$$

$$P_{t+1|t+1} = (I - K_{t+1}H_{t+1})P_{t+1|t} \tag{4.16}$$

Nas expressões acima, a matriz F representa a linearização do modelo de evolução do sistema, calculado com base na última estimativa do estado antes do recebimento das novas medidas, ao passo que a matriz H denota a linearização do modelo de observação, calculado com base na última estimativa do estado imediatamente após a chegada das novas medidas. Matematicamente, são jacobianos obtidos de acordo com as equações abaixo:

$$F_t = \left.\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}\right|_{\mathbf{x}_{t|t}, u_{t+1}} \tag{4.17}$$

$$H_{t+1} = \left.\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}}\right|_{\mathbf{x}_{t+1|t}} \tag{4.18}$$

4.4 Algoritmo de estimação

Para aplicação do filtro e estimação do estado na malha de escoamento temos uma sequência de cálculos a serem efetuados a cada intervalo de tempo. Em termos gerais o procedimento proposto se ajusta bem a cálculo numérico, conforme características descritas para o filtro de Kalman. O fluxograma presente na Fig. 4.1 apresenta uma representação gráfica para o método aplicado.

O procedimento se inicia com a definição das condições iniciais para caracterização do escoamento. Estas condições são utilizadas para o modelo de escoamento, com valores de variáveis em cada elemento de malha da discretização. Entretanto, o conjunto de dados para aplicação no filtro e estimação é reduzido, sendo utilizado para este apenas alguns dos dados calculados. A matriz de covariância também deve ter seus valores iniciais atribuídos.

Com base na condição inicial, são geradas as matrizes jacobianas de F e H. Estas matrizes são calculadas a partir do modelo de escoamento proposto, no qual as derivadas locais para as variáveis de interesse são obtidas numericamente. Este procedimento tem um alto custo computacional, por necessitar de um novo caso simulado para cada variável de interesse.

Com base no modelo não linear e nas condições de contorno, são calculadas predições para o novo estado do escoamento e nova matriz de covariância. Esta estimativa ainda não é o estado estimado, mas auxilia nesta estimação. Neste momento é aguardado o retorno das medições. Esta etapa determina o intervalo de tempo entre as etapas de estimação de estado.

Com estas medições de campo, comparando-as com a predição de estado, são atualizados o vetor de estado e a matriz covariância.

Este estado estimado possui, então, comportamento previsto pelo modelo não linear proposto ajustado pelas medições de campo. A aderência das estimativas do estado ao modelo de evolução do escoamento (sistema ou planta) ou ao modelo de medidas de campo é função das matrizes de erro no sistema Q, e nas medidas R, cujas incertezas afetam diretamente a dinâmica matriz de covariância do erro de estimação P.

Com o procedimento descrito acima, o modelo de escoamento apresenta valores de variáveis para todas as posições do escoamento, a depender da discretização da geometria utilizada. Entretanto, muito embora todos estes valores estejam disponíveis pelo cálculo, para estimação do estado são considerados apenas as variáveis em pontos com medição real e parâmetros a serem estimados.

Isto faz com que o filtro em si fique mais simples e computacionalmente viável. Este processo é realizado sempre que houver novo intervalo de tempo para a estimação de estado, ou seja, ele se repete indefinidamente enquanto for interessante o acompanhamento do escoamento no duto.

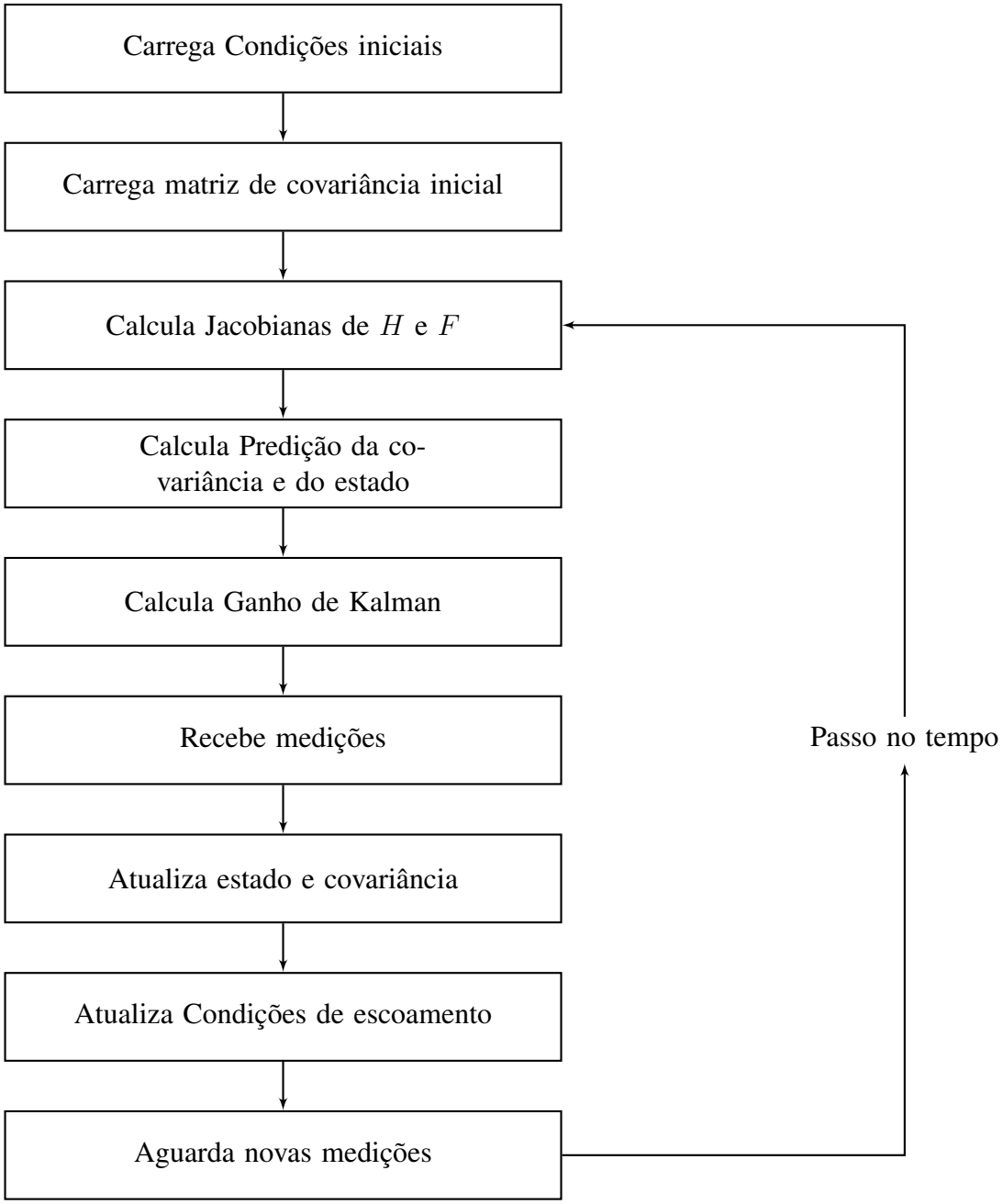


Figura 4.1: Fluxograma para a estimação de estado.

5 RESULTADOS

Neste capítulo inicialmente são discutidos aspectos básicos do escoamento de gás natural em gasodutos *onshore* e *offshore*, com os resultados obtidos pelo modelo de escoamento proposto comparado a diferentes trabalhos disponíveis na literatura e para duas malhas de gasodutos. Tal comparação tem por objetivo demonstrar o funcionamento e precisão do modelo proposto para posterior aplicação como modelo de dinâmica do sistema na estimação de estado.

Então um vetor de estado representativo da dinâmica do escoamento é proposto e estimado em conjunto com parâmetros de escoamento por meio do filtro estendido de Kalman, caracterizando o chamado filtro de Schmidt-Kalman (MAYBECK, 1990). Os resultados dessa estimação são comparados aos ganhos obtidos com a utilização da equação de conservação de energia, de modo a estimar também o parâmetro relacionado à troca térmica. Os parâmetros tem, por premissa, o comportamento de passeio aleatório.

O estado é, então, estimado, inicialmente efetuando-se a comparação com resultados disponíveis na literatura e, posteriormente, para verificação de comportamento e melhoria dos resultados de perfis de pressão e temperatura gerados para gasoduto *offshore* e malha de gasodutos *offshore*, descrevendo as melhorias obtidas com a utilização de cada proposta.

Uma etapa para comparação do comportamento obtido de dutos *onshore* e *offshore* é realizada com o objetivo de justificar a necessidade de maiores refinamentos no modelo e no estado quando o problema envolve grande LDA, e é mostrado o porquê disto não ser necessário para gasodutos *onshore*.

Por fim, a abordagem será aplicada a dados de campo para verificação do comportamento em sistema real, verificando-se o comportamento do resíduo obtido e parâmetros estimados, sem conhecimento prévio das incertezas envolvidas, a ser realizada em malha em operação desde 2011, onde existem informações de campo para o seu comportamento com medidas disponibilizadas de forma consistente.

O procedimento proposto será avaliado em diferentes etapas:

- Adequação qualitativa dos resultados;
- Comportamento do filtro e exatidão dos parâmetros estimados.

A etapa de avaliação qualitativa dos resultados tem por objetivo verificar, de forma geral, o comportamento dos parâmetros estimados pelo filtro de Kalman quando em uso com dados simulados gerados em *software* comercial OLGA, enquanto que a etapa para avaliação com dados reais tem o objetivo de verificar o comportamento da proposta com a presença de ruídos e incertezas presentes nos instrumentos de campo.

Os resultados obtidos pelo filtro são confrontados a dados simulados e dados de campo quando estes estão disponíveis, para a verificação da eficácia do método e coerência dos resultados obtidos para o estado e parâmetros estimados, além de verificar qual o comportamento dos parâmetros estimados para diferentes eventos.

Como panorama geral é apresentado na Tab. 5.1 um resumo sobre quais casos são modelados, premissas utilizadas e informações relevantes para se obter as conclusões gerais do trabalho. Salienta-se que essas etapas não são necessárias para que seja atingido o objetivo final; no entanto, elas serão mantidas com o intuito de descrever todo o processo de investigação.

Como suporte seguem algumas considerações gerais a respeito do escoamento em gasodutos em LDA profunda e como essa característica pode alterar a condição de escoamento.

5.1 Considerações gerais sobre o modelo de escoamento com cálculo térmico

Grande parte dos trabalhos disponíveis utiliza como premissa para a modelagem de escoamento em dutos o escoamento isotérmico. Apesar de esta ser uma premissa válida para dutos *onshore* com troca térmica significativa, não necessariamente se aplica de forma satisfatório a gasodutos *offshore*, onde existe grande variação de cota do escoamento e da temperatura exterior ao duto.

Como forma de comparação, para uma aplicação típica *onshore* temos um perfil térmico dado na Fig. 5.1. A imagem mostra uma diferença perceptível a depender da abordagem utilizada. Apesar deste comportamento, ainda é possível trabalhar com modelos isotérmicos com baixo erro associado.

Associado a estes perfis térmicos temos um perfil de pressões dado na Fig. 5.2. Pode-se notar que, apesar de a temperatura variar com o comprimento do escoamento, os perfis de

Tabela 5.1: Casos modelados

N°	Onde	Modelo	Dados	Malha	Estimação	Parâmetros	Medidas
1	5.2.1	Isotérmico	Literatura	5.6	Não	-	P e Q
2	5.2.2	Térmico	Literatura	5.12	Não	-	P e Q
3	5.2.3	Isotérmico	Literatura	5.17	Não	-	P e Q
4	5.3.1	Térmico	Campo	5.18	Não	-	P, Q e T
5	5.3.2	Térmico	Campo	5.23	Não	-	P, Q e T
6	5.4.1	Térmico	Simulados	5.27	Sim	ε_i, ϕ_i	P, Q e T
7	5.4.2	Isotérmico	Literatura	5.6	Sim	ε, ϕ	P e Q
8	5.5.1.1	Isotérmico	Simulados	5.32	Não	-	P e Q
9	5.5.1.2	Térmico	Simulados	5.32	Não	-	P, Q e T
10	5.5.1.3	Isotérmico	Simulados	5.32	Sim	-	P e Q
11	5.5.1.4	Térmico	Simulados	5.32	Sim	-	P, Q e T
12	5.5.1.5	Isotérmico	Simulados	5.32	Sim	ε	P e Q
13	5.5.1.6	Térmico	Simulados	5.32	Sim	ε	P, Q e T
14	5.5.1.7	Térmico	Simulados	5.32	Sim	ε, U	P, Q e T
15	5.5.1.8	Térmico	Simulados	5.32	Sim	ε, U	P, Q e T
16	5.5.1.9	Térmico	Simulados	5.32	Sim	ε, U	P, Q e T
17	5.5.1.10	Térmico	Simulados	5.63	Sim	ε, U	P, Q e T
18	5.5.2.1	Térmico	Simulados	5.63	Sim	ε	P, Q e T
19	5.5.2.2	Térmico	Simulados	5.63	Sim	ε, U	P, Q e T
20	5.5.3	Térmico	Simulados	N.A.	Sim	ε, U	P, Q e T
21	5.5.4	Térmico	Campo	5.82	Sim	ε_i, U_i	P, Q e T

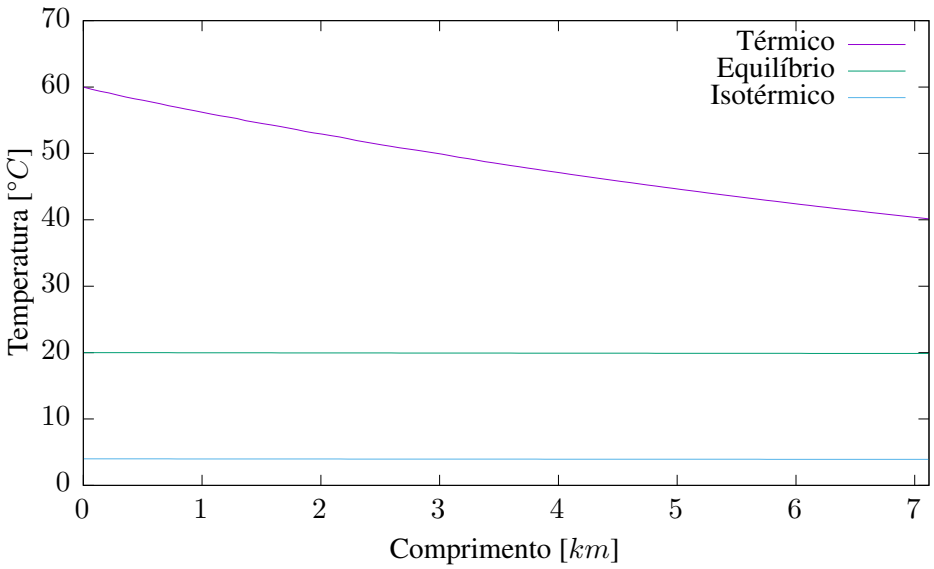


Figura 5.1: Comparativo do perfil de temperatura num gasoduto *onshore* típico a depender do modelo térmico adotado.

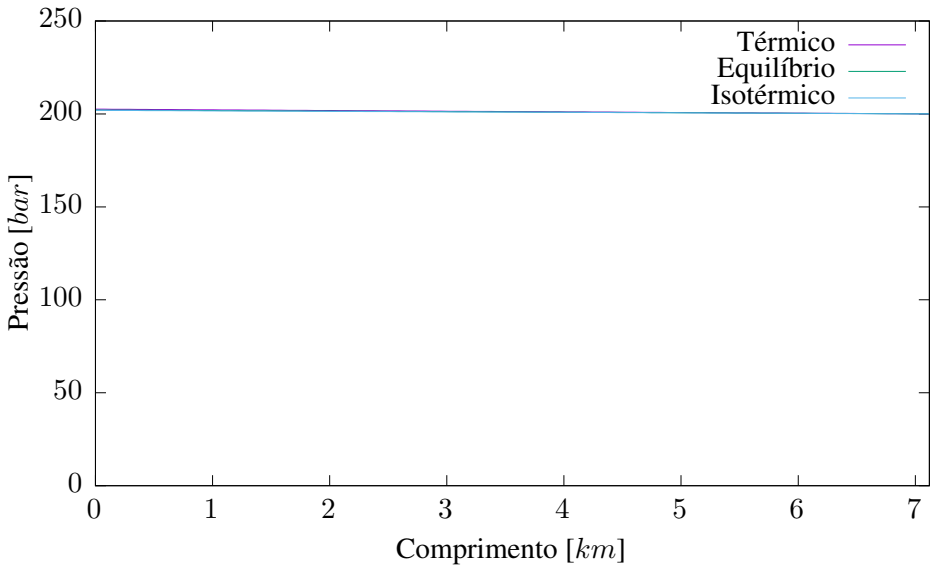


Figura 5.2: Comparativo do perfil de pressões num gasoduto *onshore* típico a depender do modelo térmico adotado.

pressão associados têm baixa variação. Este exemplo usa um gasoduto horizontal de aproximadamente $7\,km$ de comprimento e diâmetro interno de $9^1/_8\,in$, um duto não muito longo.

Este comportamento, comum para aplicações *onshore*, mostra que não existe grande variação dos perfis de pressão calculados para gasodutos com estas características. Dessa forma, informações como pressão necessária para realizar o escoamento ou inventário presente no duto não são influenciadas pelo cálculo térmico de forma significativa.

Já para aplicações *offshore* a variação maior da temperatura se dá no início do escoamento, e acaba por impactar de forma significativa a variação de pressão por efeitos gravitacionais pela variação da massa específica do gás. Uma geometria típica de gasoduto em LDA profunda é dada na Fig. 5.5.

Um cenário típico para estes gasodutos para exemplificar a influência da variação de temperatura é o *riser* de exportação destas unidades de produção. Neste cenário o gás se encontra quente, e com isso sua massa específica é mais baixa. A Fig. 5.3 mostra perfis típicos de temperatura num *riser* de exportação.

Como consequência destes diferentes perfis de temperatura, em condições de operação típicas existe uma variação de mais de $20\,bar$ dos resultados conseguidos com modelagem térmica e com a consideração de escoamento isotérmico, como pode ser observado na Fig. 5.4.

Essa avaliação utiliza dados típicos de vazão para gasodutos *offshore* com geometria representativa apresentada na Fig. 5.5, onde a LDA é de $2\,180\,m$ e o diâmetro do duto é de $9\,^1/_8\,in$, com um comprimento de aproximadamente $7km$, numa vazão de exportação de $2\,MM\,Nm^3/d$

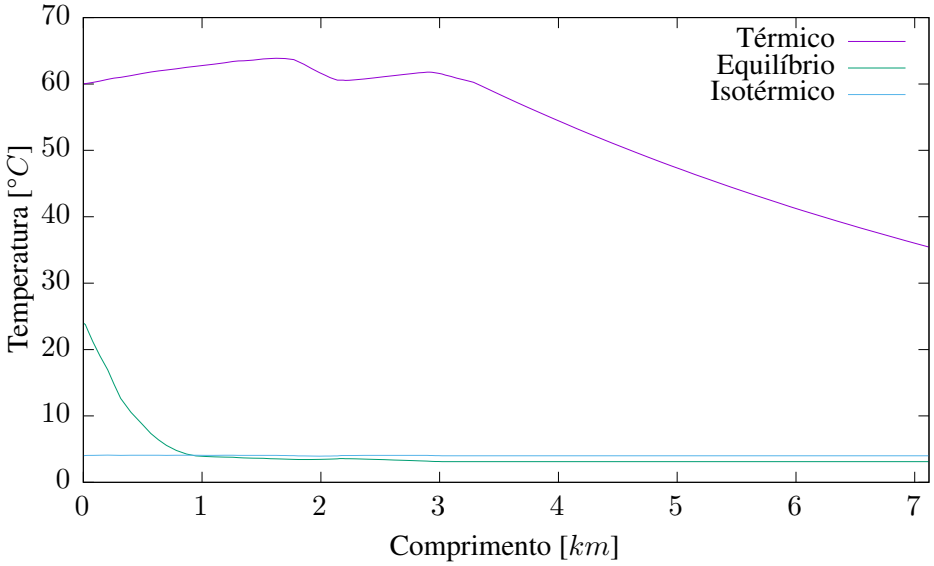


Figura 5.3: Comparativo do perfil de temperaturas num *riser* típico a depender do modelo térmico adotado.

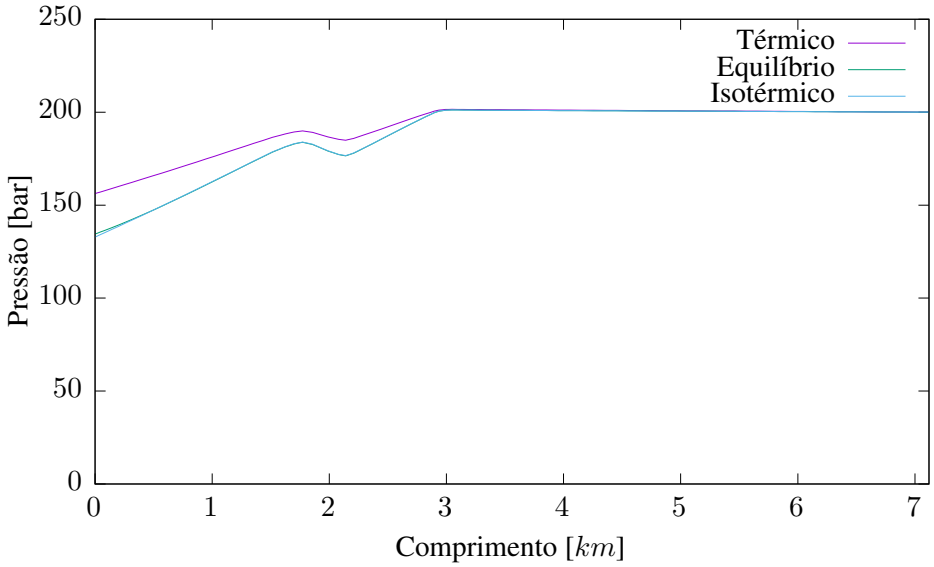


Figura 5.4: Comparativo do perfil de pressões num *riser* típico a depender do modelo térmico adotado.

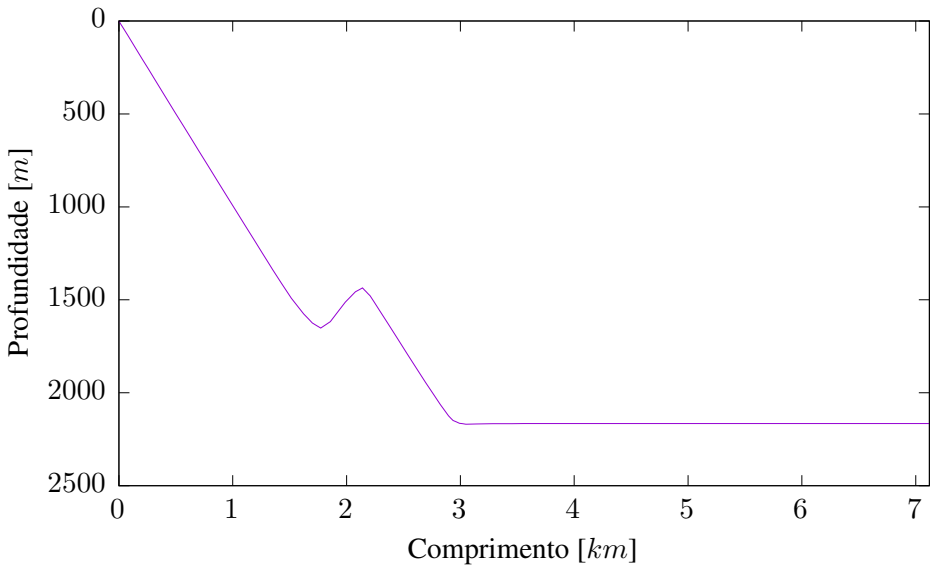


Figura 5.5: Geometria típica de um *riser* de exportação *offshore* em LDA profunda.

e um TEC de $10\,W/m^2K$.

Esta variação no perfil de pressões pode levar a uma estimativa de parâmetro relacionada a perda de carga errada, uma vez que este é baseado nas medidas disponíveis nas extremidades do gasoduto, o que pode influenciar de forma significativa o comportamento previsto no escoamento, além de gerar erro no cálculo do inventário presente no gasoduto.

Este comparativo evidencia que, apesar de pouco influente na determinação dos perfis de pressão para problemas em gasodutos *onshore* (topografia aproximadamente horizontal), o perfil de temperatura tem relevância também na determinação dos perfis de pressão para gasodutos *offshore*, sendo um ganho a resolução da equação da conservação de energia em conjunto com as de conservação de massa e quantidade de movimento.

5.2 Modelo de escoamento

Inicialmente será apresentado o comportamento do modelo proposto. Uma vez que o filtro depende de um modelo da dinâmica do sistema adequado, esta etapa se faz necessária para uma garantia da funcionalidade do filtro.

Para isto serão utilizados dados da literatura e casos transientes em malhas reais de referência.

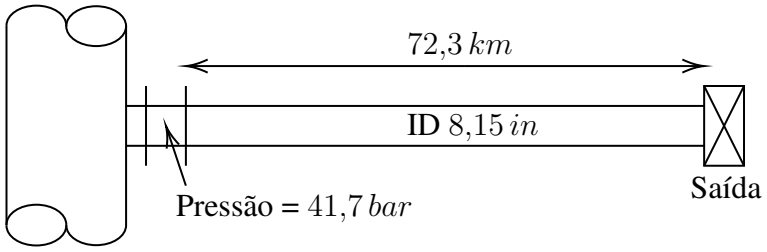


Figura 5.6: Gasoduto em estudo por Zhou e Adewumi (2000).

5.2.1 Zhou e Adewumi(2000)

O trabalho desenvolvido por Zhou e Adewumi (2000) envolve a derivação de um modelo de escoamento isotérmico. É utilizado o método das características para solução das equações obtidas, sendo avaliados diferentes cenários, com transientes rápidos e lentos.

O cenário de interesse para este trabalho é o chamado de caso 3, onde são estudados efeitos transientes lentos, característicos de gasoduto. Neste trabalho é considerado um gasoduto com pressão definida em sua extremidade de entrada e vazão definida para a extremidade de saída, com variação no tempo, numa aproximação adequada de um ramal de baixo consumo conectado a um gasoduto tronco com grande capacidade de fornecer gás natural, conforme Fig. 5.6.

Neste problema são consideradas condições de contorno para o problema a pressão na entrada do gasoduto, que é tomada como constante, e o fluxo mássico na saída do duto, que oscila conforme Fig. 5.7, o que gera variação de pressão e velocidade em todos os pontos do escoamento.

A composição apresentada na Fig. 5.8 mostra comparativo no comportamento de pressões e fluxos mássicos obtidos com o modelo descrito neste trabalho, em trabalho de referência e em *software* comercial OLGA, com coerência entre os resultados. Vale observar que, em análise superficial, os resultados obtidos em Zhou e Adewumi (2000) parecem não partir de solução de regime.

Existem diferenças entre as tendências obtidas, apesar de todos terem um mesmo comportamento geral. Isso pode ser explicado pela diferente abordagem de solução numérica das equações, mas também pela recuperação visual das informações dos gráficos, que por si só já tem variações.

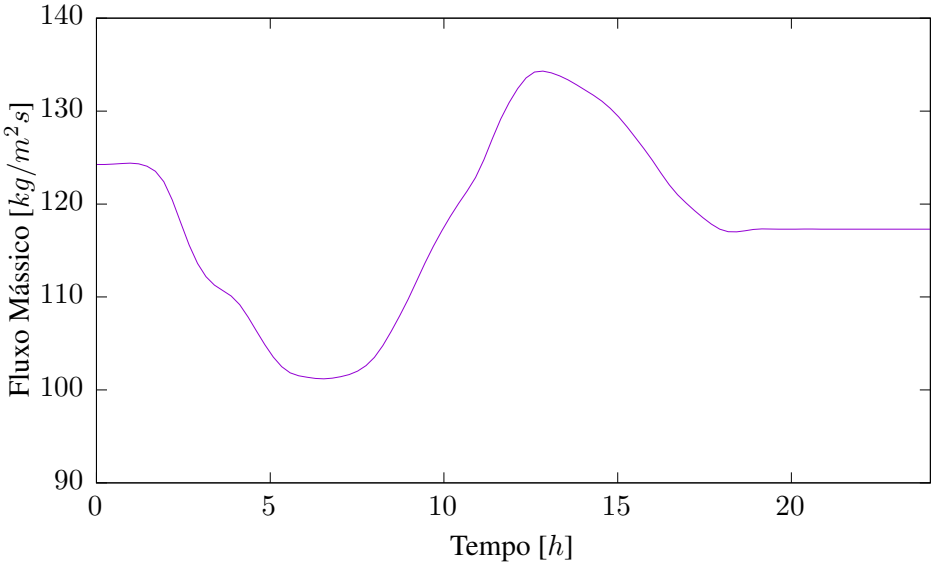
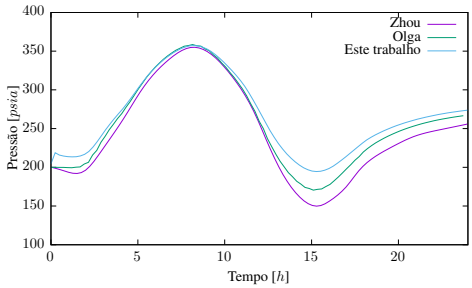
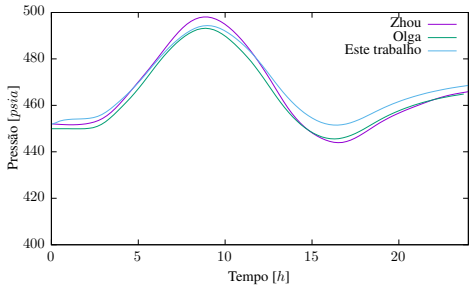


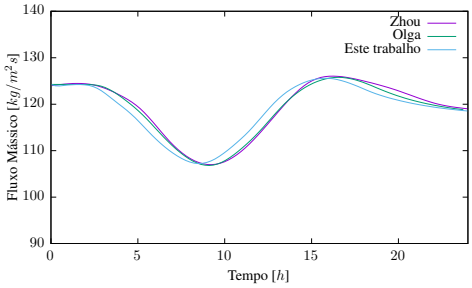
Figura 5.7: Fluxo mássico na saída do gasoduto por Zhou e Adewumi (2000).



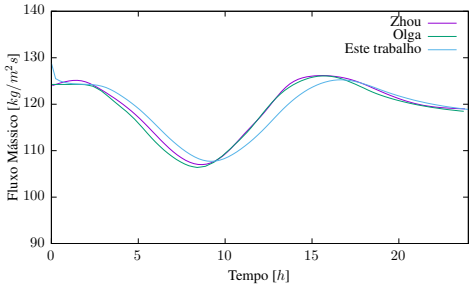
(a) Pressão estimada na saída.



(b) Pressão intermediária estimada.



(c) Fluxo mássico estimado na entrada.



(d) Fluxo intermediário estimado.

Figura 5.8: Resultados do modelo para problema em Zhou e Adewumi (2000).

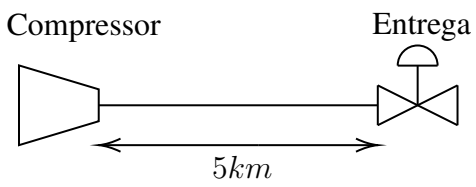


Figura 5.9: Malha de gasoduto em estudo por Chaczykowski (2010).

5.2.2 Chaczykowski (2010)

Um segundo trabalho utilizado na validação do modelo de escoamento é apresentado por Chaczykowski (2010). Neste trabalho é desenvolvido modelo de escoamento com consideração de efeitos térmicos para gasoduto com transientes rápidos como fechamento e abertura de válvula.

A geometria de escoamento utilizada é dada na Fig. 5.9, composta de um compressor com objetivo de manter a pressão constante, um duto para o escoamento e uma válvula próxima a saída do duto, com abertura e fechamento instantâneos, que quando aberta permite um fluxo fixo.

Este trabalho trata as condições de contorno de maneira similar ao anterior, onde a modelagem considera a pressão na extremidade de entrada do gás como definida, a temperatura na entrada como uma função do tempo e a vazão de saída do gás na outra extremidade segue uma função temporal com o objetivo de modelar uma válvula se abrindo e fechando.

A pressão de entrada no duto é colocada como $5\,MPa$, a temperatura de entrada é dada por uma função temporal descrita na Fig. 5.10, subindo quando a válvula é aberta, enquanto que a vazão de saída é dada na Fig. 5.11, numa configuração onde a válvula abre e vinte minutos depois fecha instantaneamente.

Os resultados apresentados na Fig. 5.12 mostram o comportamento geral da temperatura do gás na saída do duto, mostrando que existem efeitos convectivos envolvidos na solução, também captados pelo modelo apresentado neste trabalho. Outro resultado obtido pelo trabalho é o tempo característico envolvido em efeitos térmicos no duto.

Um aspecto interessante é que o pico encontrado próximo ao minuto trinta é encontrado também em Abbaspour e Chapman (2008), com explicação dada pelo rápido fechamento da válvula o que leva a uma variação rápida na velocidade. Com isso o termo convectivo é alterado significativamente e a pressão e temperatura sobem. Este efeito é normalmente denominado "golpe de aríete", e é mais intenso em escoamento de líquidos.

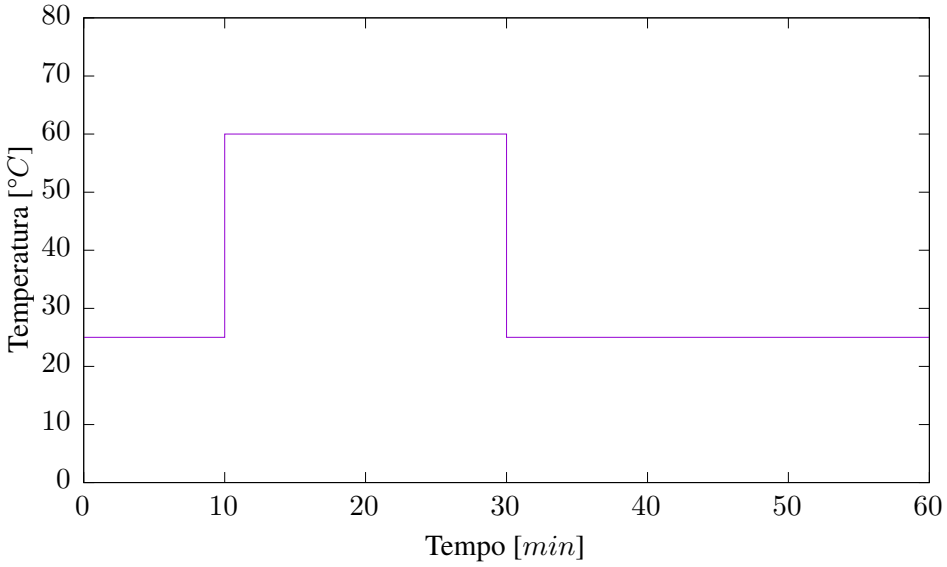


Figura 5.10: Temperatura de entrada para problema proposto por Chaczykowski (2010).

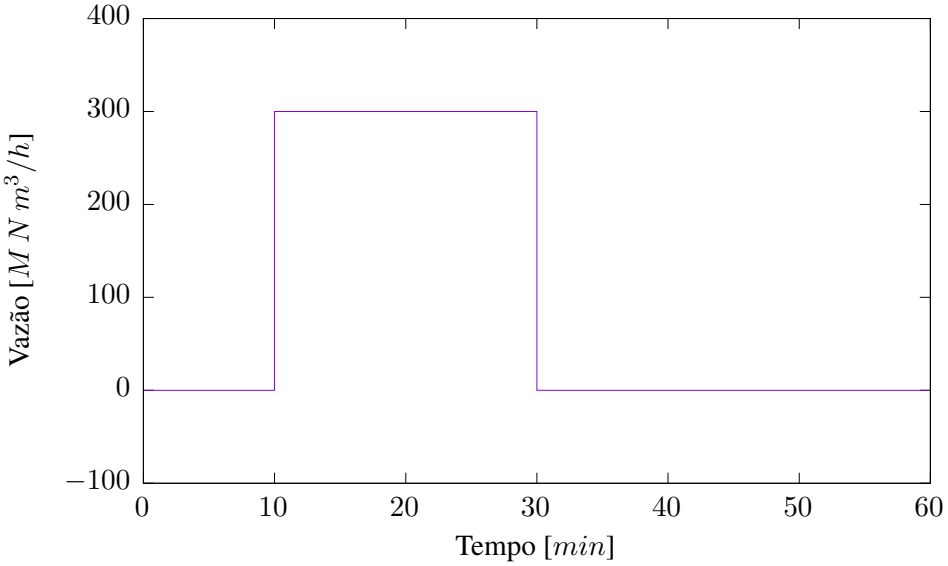


Figura 5.11: Vazão de saída para problema proposto por Chaczykowski (2010).

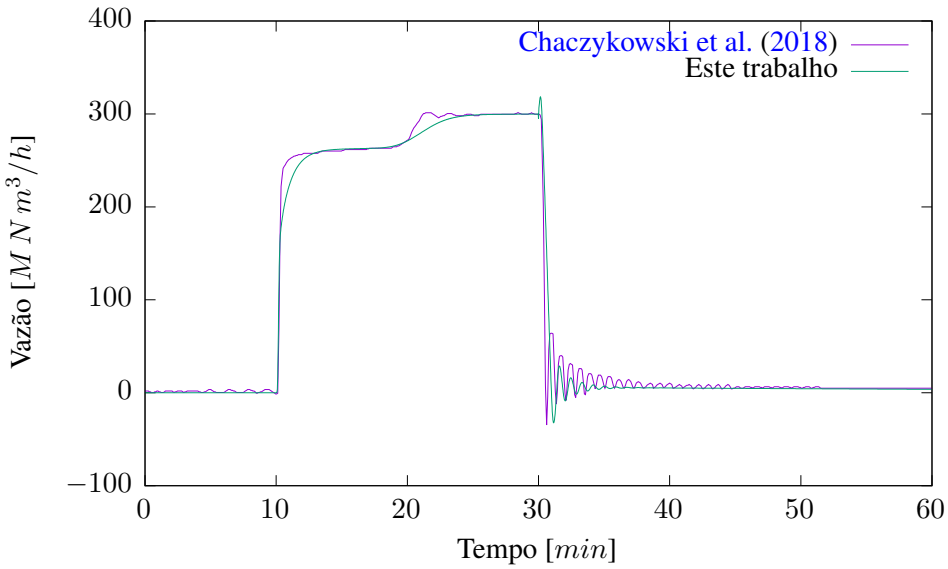


Figura 5.12: Tendência de vazão comparada a Chaczykowski (2010).

Numa continuidade do trabalho foi realizada avaliação considerando capacidade térmica do duto, com uma variação perceptível de alguns minutos nas tendências de temperatura ao longo do gasoduto para transientes de vazão, onde a modelagem da capacidade térmica do duto torna menor variações da temperatura. Num longo prazo estes efeitos parecem ser de menor importância.

Na Fig. 5.13 é possível visualizar o efeito da inércia térmica no comportamento de um escoamento de gás natural. O efeito da adição da capacidade térmica do duto é sentido por apenas 10 minutos, tempo relativamente curto quando se tem em vista os transientes em malha de gasoduto (PAMBOUR; BOLADO-LAVIN; DIJKEMA, 2016). Após este período inicial, não são percebidas diferenças com este maior detalhamento da física do problema, apesar de trazer consigo a necessidade de mais variáveis de estado e isso aumentar a complexidade do modelo. Desta maneira, não serão considerados estes efeitos nas demais avaliações e o modelo proposto desconsidera a inércia térmica no problema.

5.2.3 Pambour (2016)

Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016) apresentam trabalho direcionado para a modelagem de malhas de escoamento de gás compostas por diferentes gasodutos, fazendo tratamento de nós intermediários e com escoamento divergente. O modelo proposto é transiente e isotérmico, com simplificação dos efeitos convectivos, o que é bastante razoável para malhas sem variação brusca das condições de escoamento.

A geometria de escoamento é apresentada na Fig. 5.14, composta por três gasodutos

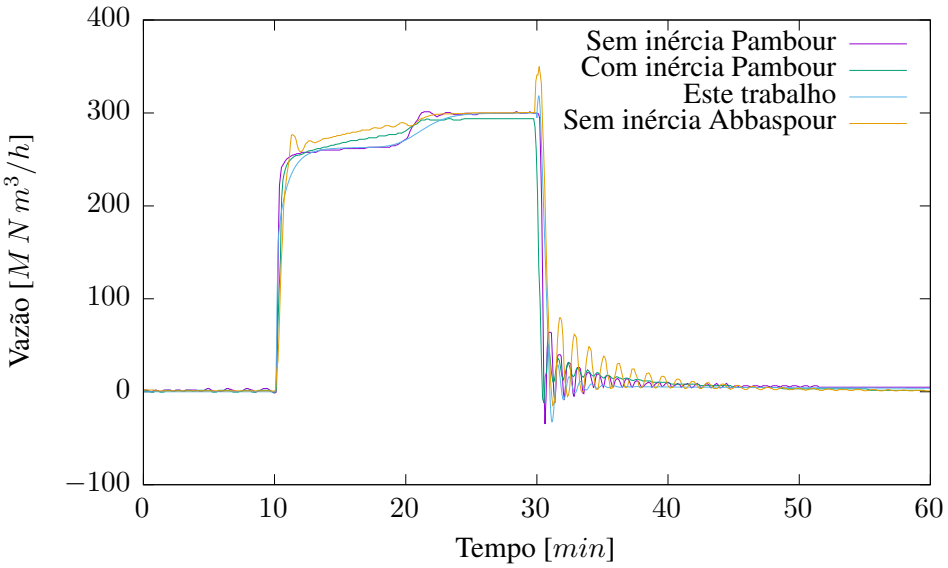


Figura 5.13: Tendência de vazão comparada a Chaczykowski (2010) e Abbaspour e Chapman (2008).

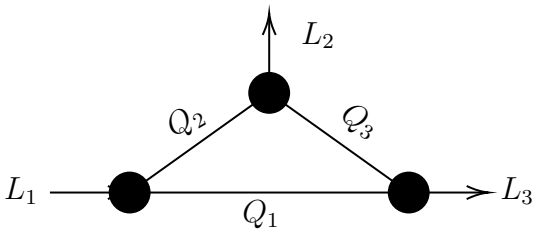


Figura 5.14: Gasoduto em estudo por Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016).

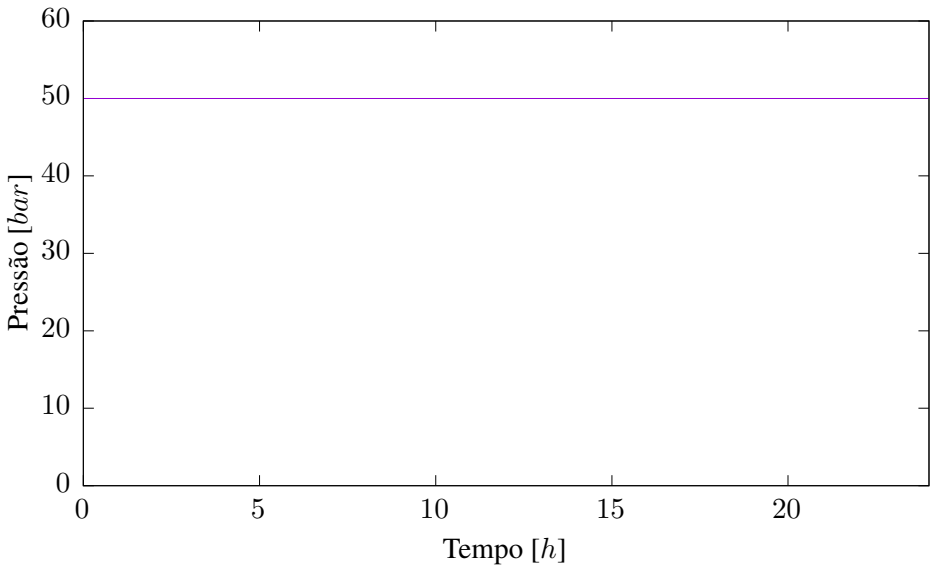


Figura 5.15: Pressão definida no nó 1 para problema proposto por Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016).

em formato de triangulo, onde um dos vértices alimenta a malha com gás e aos demais nós funcionam como saídas de gás. Como condições de contorno temos a pressão no ponto 1 e as vazões de saída nos nós 2 e 3, onde o valor trabalhado para cada condição de pressão é mostrado na Fig. 5.15.

Com o objetivo de realizar um escoamento transiente no modelo proposto, as vazões de entrada de gás nos nós 2 e 3 são apresentadas na Fig. 5.16, apresentado uma variação cíclica simples.

Assim, com a variação das retiradas de gás nos nós 2 e 3 é esperada uma variação dos perfis de pressões e vazões em todo o domínio de escoamento, e uma vez que estas vazões se alteram no tempo, é esperada uma variação das propriedades de escoamento em todos os gasodutos.

Outra informação avaliada é o volume total de gás encontrado no interior da malha. Essa informação é dependente dos perfis de pressão e temperatura, de informações geométricas da malha de gasodutos, calculados pelo modelo de escoamento, e da composição do fluido, considerada constante, sendo estas informações posteriormente integradas.

A composição apresentada na Fig. 5.17 mostra comparações dos resultados obtidos com diferentes curvas da literatura. Pode ser observado que os resultados se assemelham com os obtidos pelo *SIMONE*, de uso comercial e aplicações na Europa, e tem variação perceptível com o perfil de pressão obtido em Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016) como mostrado na Fig. 5.17b.

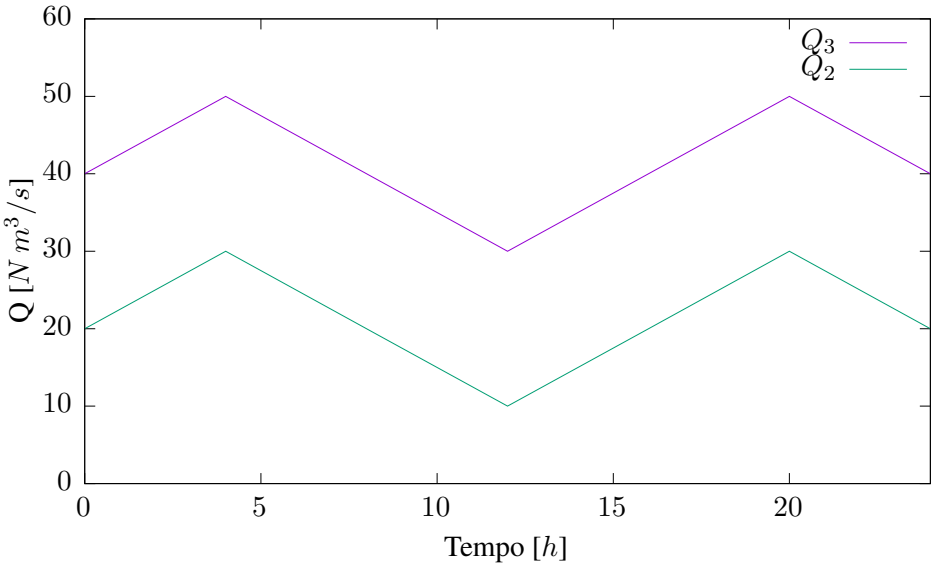
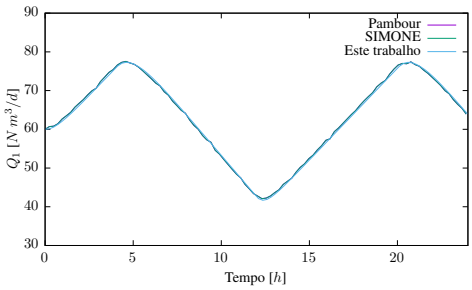
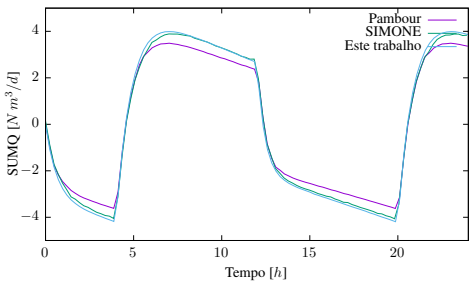


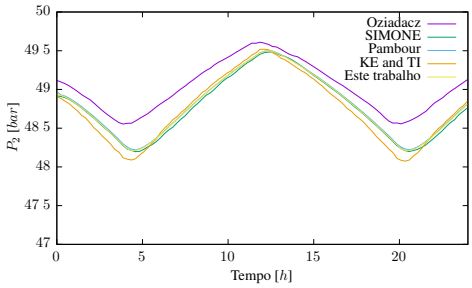
Figura 5.16: Vazões definidas nos nós 2 e 3 para problema proposto por Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016).



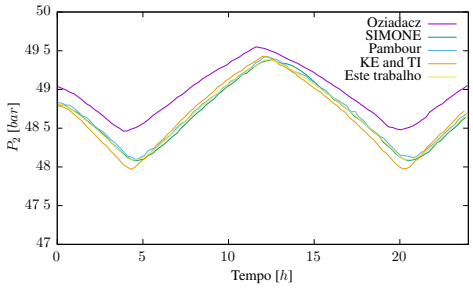
(a) Vazão de entrada no nó 1.



(b) Balanco de vazões na malha proposta.



(c) Pressões no nó 2.



(d) Pressões no nó 3.

Figura 5.17: Resultados do modelo para problema apresentado em Pambour, Bolado-Lavin e Dijkema (2016).

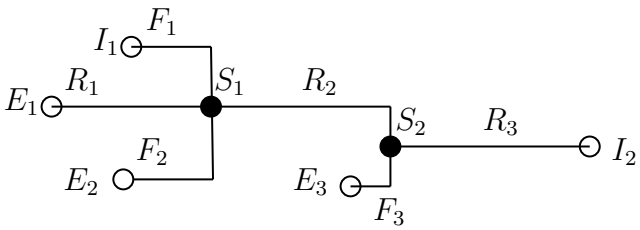


Figura 5.18: Desenho esquemático dos gasodutos que compõem a malha 1.

5.3 Malhas físicas

Pelos resultados obtidos a partir de dados da literatura, passou-se, então, para avaliação do comportamento do modelo proposto com o uso de dados de malha real como segunda validação, agora para efeitos transientes lentos. Esta abordagem traz consigo uma menor quantidade de dados para comparação, sendo estes disponíveis apenas em pontos pré-determinados, e sem valores originais dos parâmetros a serem estimados para comparação.

5.3.1 Malha 1

A primeira malha de gasodutos *offshore* é construída com a participação de três unidades produtoras e duas importadoras. Esta malha opera desde o ano de 2011 na Bacia de Santos, no Brasil. Em condições normais de operação a malha chega a um equilíbrio onde as vazões de exportação são equivalentes às de importação. Quando isso não acontece temos a variação das pressões no sistema.

Um caso simples avaliado neste trabalho será o fechamento da principal importadora de gás, por motivos operacionais, o que leva ao aumento de pressão em todo o sistema de escoamento. Este é um cenário importante para a operação dos gasodutos, pois limites devem ser respeitados, e os tempos envolvidos são utilizados na decisão de modificação das demais condições de contorno. A Fig. 5.18 mostra um desenho esquemático da malha, enquanto que a Fig. 5.19 mostra a geometria dos dutos.

Com o perfil da temperatura externa mostrado na Fig. 5.20 é que acontece a troca térmica com o ambiente. Uma vez que o problema é térmico, este perfil, cruzado com a geometria da linha, entra como condição de contorno e pode esfriar ou aquecer o gás a depender da região de escoamento.

A Tab. 5.2 apresenta a composição da malha 1, onde os *risers* das unidades de exportação e da importadora 1 são compostos por linhas flexíveis de menor diâmetro, enquanto que o restante do gasoduto é composto por dutos rígidos de maior diâmetro, com um menor

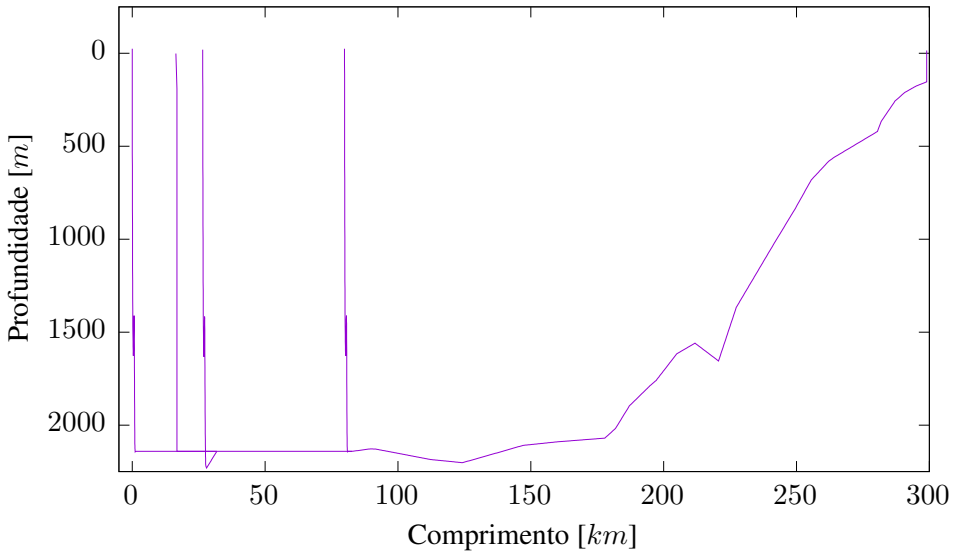


Figura 5.19: Geometria dos gasodutos que compõem a malha 1.

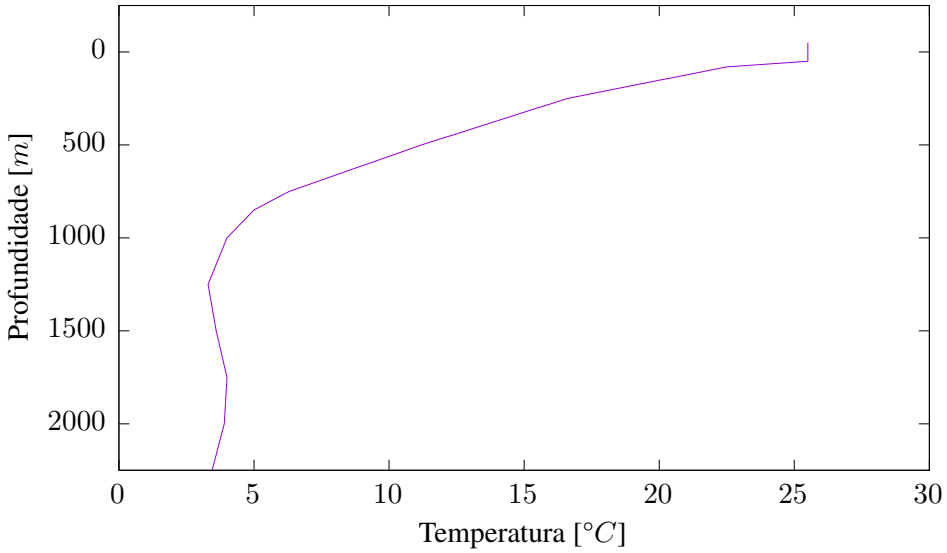


Figura 5.20: Perfil de temperatura no mar em função da profundidade.

Tabela 5.2: Propriedades da malha 1 de gasodutos.

Gasoduto	Tipo	Diâmetro Interno $[in]$	Comprimento $[m]$	ε esperado $[mm]$	U esperado $[W/m^2K]$
F1	Flexível	9 ⅛	34 000	1,0	5
F2	Flexível	9 ⅛	7 200	1,0	5
F3	Flexível	9 ⅛	4 800	1,0	5
R1	Rígido	16	17 400	0,183	50
R2	Rígido	16	51 000	0,183	50
R3	Rígido	15,5	216 000	0,183	50

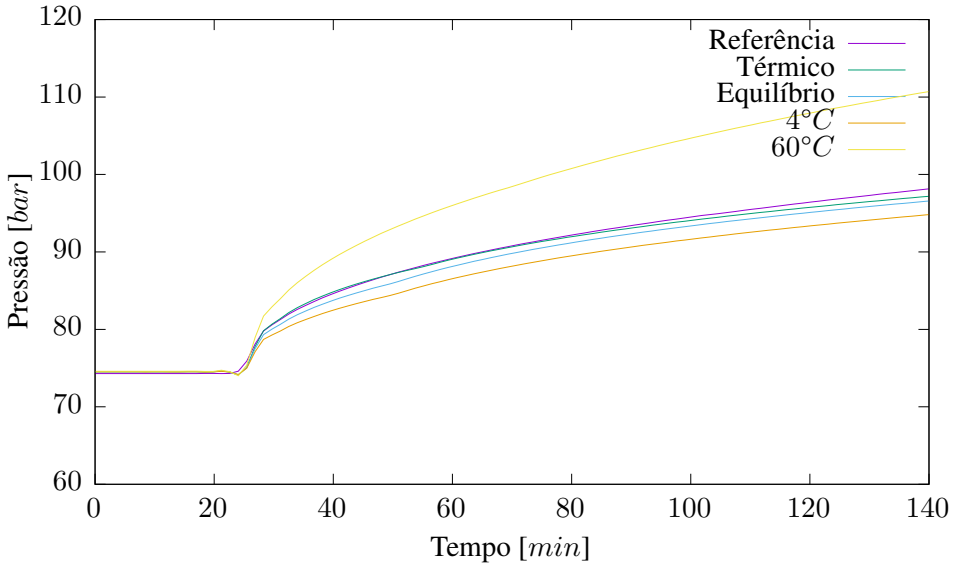


Figura 5.21: Comparativo da tendência de pressão para o modelo de malha 1.

isolamento térmico característico de sua construção.

Para as condições de contorno para o período temos vazões praticadas constantes a não ser em I_2, que tem a vazão zerada a partir do instante dos vinte e cinco minutos. Uma vez que o escoamento de saída do gás cessa, é esperada uma pressurização neste ponto. Inicialmente esta pressurização é maior pela diminuição da perda de carga viscosa com nivelamento do perfil de pressão e posteriormente esta pressurização é regida pelo empacotamento da malha.

A Fig. 5.21 apresenta o comportamento de pressão na unidade importadora I_2 quando do fechamento. Nesta situação a vazão das demais unidades não foi alterada, permanecendo as exportações como $E_1 = 0\,MM\,Nm^3/d$, $E_2 = 2{,}00\,MM\,Nm^3/d$ e $E_3 = 3{,}20\,MM\,Nm^3/d$, e a importação como $I_1 = 0{,}3\,MM\,Nm^3/d$, sendo que a pressão que se encontrava no ponto de I_2 no início do evento era de $74{,}3\,bar$.

Após o fechamento da importadora I_2 por evento relacionado a planta de processamento, é possível ver a diferença entre a pressão obtida no evento real e a obtida através de

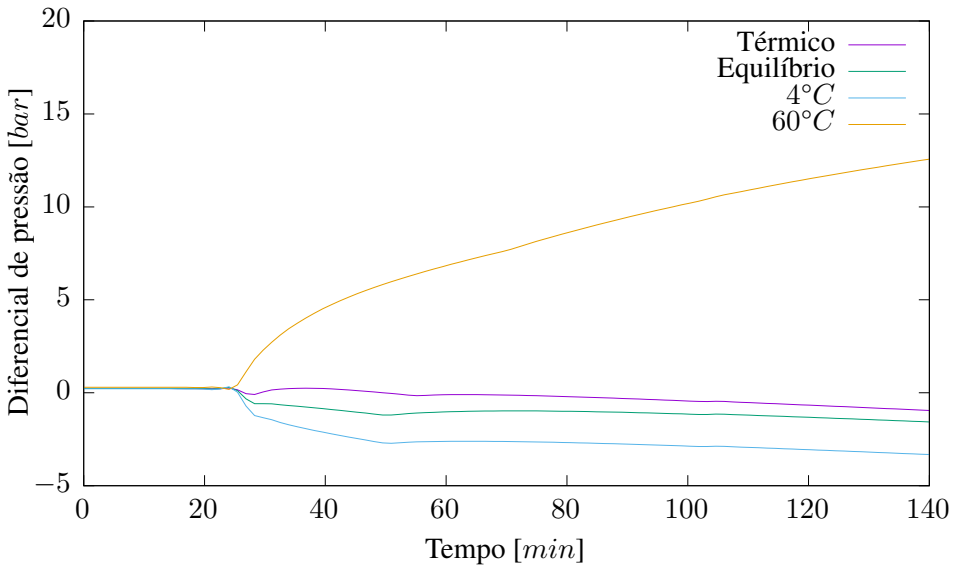


Figura 5.22: Comparativo da diferença entre a pressão prevista e a medida com diferentes abordagens térmicas para o modelo de malha 1.

modelagem de escoamento na Fig. 5.22.

O comportamento obtido na malha real é apresentado como referência. A curva Térmico mostra o comportamento previsto com a solução da equação de energia, abordagem mais precisa. A curva Equilíbrio mostra o comportamento previsto em se forçando o gás a entrar em equilíbrio com o mar, numa configuração similar a grandes trocas térmicas, enquanto que as curvas de $4\,°C$ e $60\,°C$ consideram escoamento isotérmico.

Além da variação esperada na temperatura de importação do gás, a abordagem utilizada na modelagem térmica do escoamento também tem influência nos transientes de pressão. É possível ver que abordagens isotérmicas tendem a superestimar ou subestimar o transiente de pressão a depender do valor de temperatura utilizado.

A utilização de modelo simplificado que considera escoamento em equilíbrio com o mar já apresenta um ganho perceptível, enquanto que a utilização de equacionamento para a conservação de energia apresenta resultados ainda melhores para transientes lentos em malhas de gasodutos, mesmo que ainda exista diferença entre o comportamento previsto e o realizado.

5.3.2 Malha 2

Para outra avaliação com dados reais foi utilizada uma segunda malha *offshore* também em operação na Bacia de Santos. Esta malha tem maiores dimensões que a anterior e um maior número de UEPs envolvidas. Um desenho esquemático da composição da malha 2 é

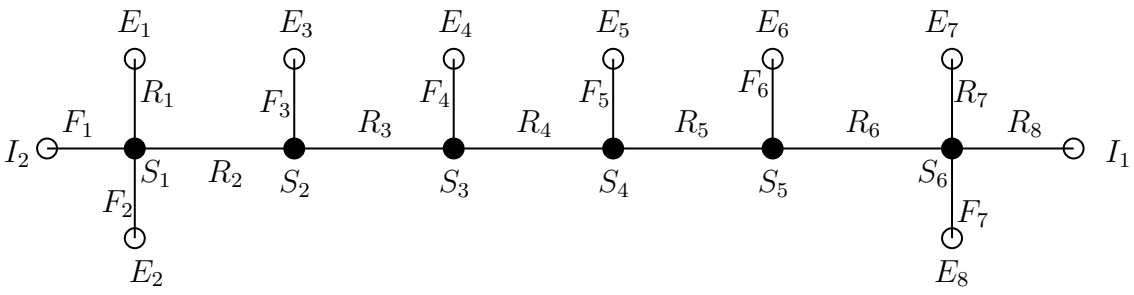


Figura 5.23: Desenho esquemático dos gasodutos que compõem a malha 2.

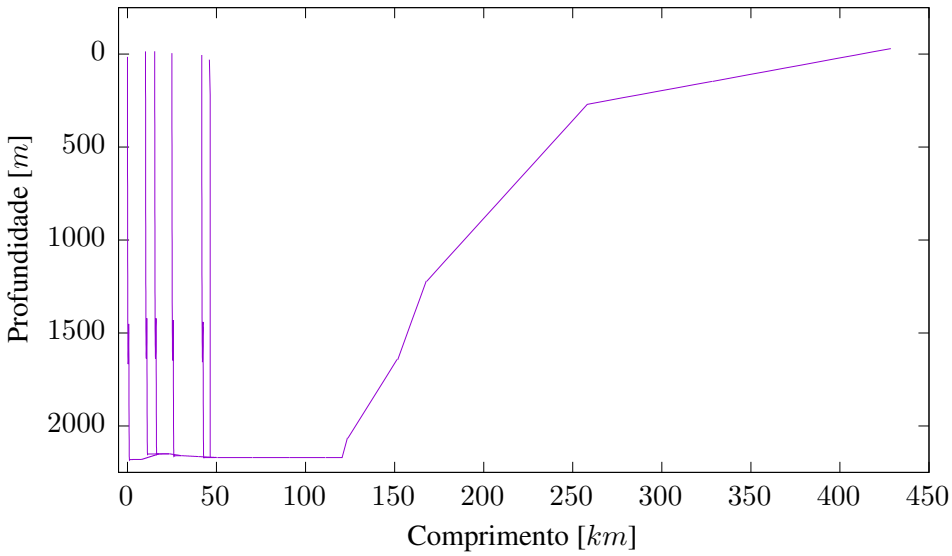


Figura 5.24: Geometria dos gasodutos que compõem a malha 2.

apresentado na Fig. 5.23, sendo considerados nove interfaces na composição da malha como um todo e mais de $500\,km$ de comprimento de dutos submarinos.

Os atores envolvidos nesta malha 2 são 8 unidades exportadoras E_i, com diferentes correntes de gás, uma unidade importadora de gás I_2, que utiliza uma baixa vazão para geração elétrica e uma unidade de tratamento de gás I_1 que recebe uma vazão alta e destina os produtos gerados. São utilizados 8 trechos rígidos de gasoduto, 7 de duto flexível e 6 equipamentos submarinos para interligação dos trechos.

A esta organização de gasodutos está associada a geometria apresentada na Fig. 5.24, onde pode se notar uma série de características similares às encontradas na malha 1, com alguns *risers* de exportação ligados a um gasoduto tronco de grande comprimento.

O caso avaliado é novamente a queda na vazão do processamento, agora na unidade de tratamento de gás. Mas neste caso houve variação significativa da pressão com consequente solicitação de alteração na vazão de exportação das UEPs, o que leva a uma variação diferente

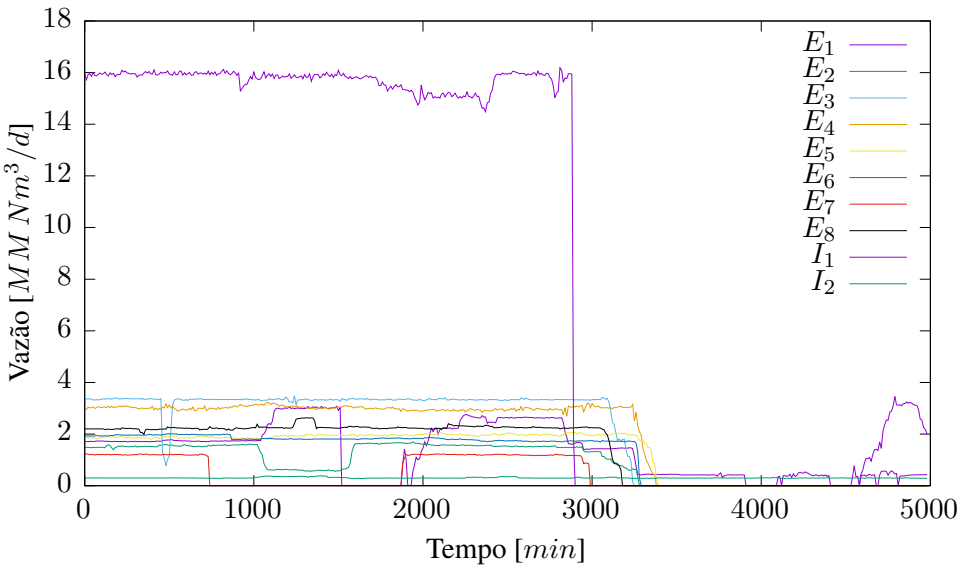


Figura 5.25: Vazão de exportação nas diferentes UEPs para malha 2.

da tendência de pressão na malha. O comportamento da vazão exportada em cada unidade de produção é dado na Fig. 5.25.

Outro ponto a ser observado é a restrição efetuada na exportação das 8 UEPs quando da subida da pressão na UTG. Este comportamento é proposital para permitir uma maior velocidade de retorno ao processamento na UTG. Um dos objetivos da utilização destes modelos é auxiliar na determinação de um momento mais adequado para estas ações.

Para este comportamento de vazão exportada foi realizada simulação de escoamento transiente com parada de processamento da UTG, com efeito imediato na pressurização da malha. A Fig. 5.26 mostra o comportamento encontrado na pressão percebida na UTG comparada com a pressão estimada pelo modelo.

O modelo conta com condições de contorno de vazão para as unidades exportadoras e a importadora 2, e condição de pressão na UTG, ou importadora 1. Isso permite o cálculo de uma condição inicial próxima a real, com uma melhoria dos perfis até o momento da parada de processamento na UTG.

Instantes antes da parada do processamento na UTG esta condição de contorno de pressão é alterada para vazão, de forma a possibilitar uma comparação entre a tendência de pressões geradas. A partir de então as curvas de pressão estimada e real se separam, e é possível perceber que existe uma subida mais rápida no início da restrição prevista pelo modelo, com um posterior ajuste.

Este comportamento pode estar associado a diversos fatores como discretização da

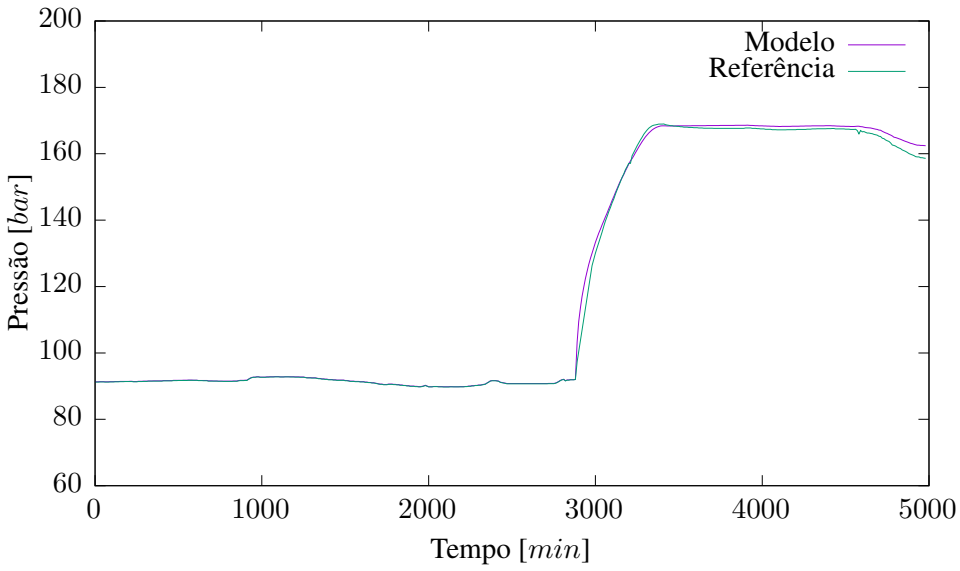


Figura 5.26: Comparativo da tendencia de pressão na Malha 2.

malha, erros existentes nas informações alimentadas no modelo ou imprecisão nas equações de fechamento utilizadas. O momento de maior diferença entre a pressão simulada e real é encontrado no final do gráfico, após $4\,500\,min$, e está associada a um aumento da vazão processada na UTG, que traz consigo um erro de medição maior, aproximadamente $4\,bar$, sendo que esta diferença até as $4\,000\,min$ fica abaixo de $1\,bar$.

Os resultados obtidos para esta malha mais complexa mostram coerência no comportamento obtido pelo modelo com relação à realidade, sendo observada precisão quanto ao comportamento transiente do perfil de pressão gerado na malha de escoamento de gás natural, mesmo com grande complexidade e quantidade de atores envolvidos.

5.4 Estimação de estado na literatura

O modelo de escoamento proposto apresenta boa coerência com os demais resultados da literatura para o escoamento de gás natural com efeitos transientes rápidos ou lentos, além de ter boa precisão quando utilizado para prever o comportamento de transientes lentos em malhas de gasodutos real.

O modelo proposto é suficientemente detalhado para modelar o escoamento em malha de gasodutos *offshore* em LDA profunda, e pode ser utilizado para prever comportamento de malhas como modelo da dinâmica do sistema para o filtro de Kalman. Desta forma é possível verificar a funcionalidade do filtro de Kalman para estimação de estado e parâmetros em malhas de gasodutos.

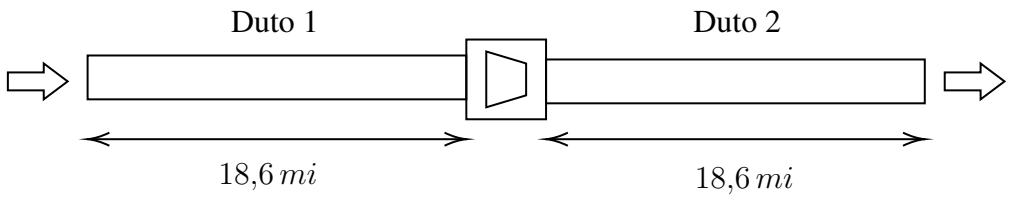


Figura 5.27: Desenho do gasoduto em estudo por Modisette et al. (2013).

Como principal objetivo a ser perseguido neste trabalho temos a viabilização de estimação de estado em malhas de gasodutos, e avaliação das influências das diferentes abordagens possíveis de serem aplicadas. São poucos os trabalhos disponíveis na literatura que abordam o problema, sendo ainda mais incomuns os que utilizam o filtro de Kalman para estimação de parâmetros do escoamento.

Dois casos encontrados lidam, com diferentes propósitos, da estimação de estado por filtro de Kalman envolvendo escoamento de gás natural em gasodutos ou malha. Estes casos são avaliados com a perspectiva do presente trabalho em seguida, sendo um primeiro caso típico de gasoduto onshore com compressão intermediária e um segundo caso de trecho de gasoduto derivado de um tronco, com demanda de gás oscilando.

5.4.1 Modisette et al. (2013)

Um primeiro estudo envolvendo a estimação de parâmetros num escoamento de gás natural foi realizado por Modisette et al. (2013), num gasoduto *onshore* fictício de aproximadamente $60\,km$ de comprimento com compressão intermediária. Foram realizadas estimações para rugosidade e *offset* de medição de forma independente ou simultânea nos diferentes trechos. A Fig. 5.27 apresenta a geometria de escoamento proposta no estudo.

Foram feitas avaliações permanentes e transientes para escoamento de líquido e gás. São avaliados resultados quanto ao parâmetro estimado qualitativamente e quantitativamente. Os resultados mostraram boa precisão quando da utilização de abordagem estática nas condições de contorno e dificuldade de estimação de dois parâmetros simultaneamente quando da existência de transientes e erro sistemático na medição de vazão em caso transiente.

Não é possível a reprodução dos resultados pela indisponibilidade de informações das medidas de pressão e vazão no duto 2. Por este motivo, foram gerados dados simulados em OLGA 7.3.2 para uso como medidas. A geometria criada para gerar as informações tem 94 elementos discretizados. Para melhorar o realismo da proposta, foi adicionado ruído as informações, sendo $1\,bar$ para as pressões e $0{,}1\,MM\,Nm^3/d$ para as vazões, além de um erro

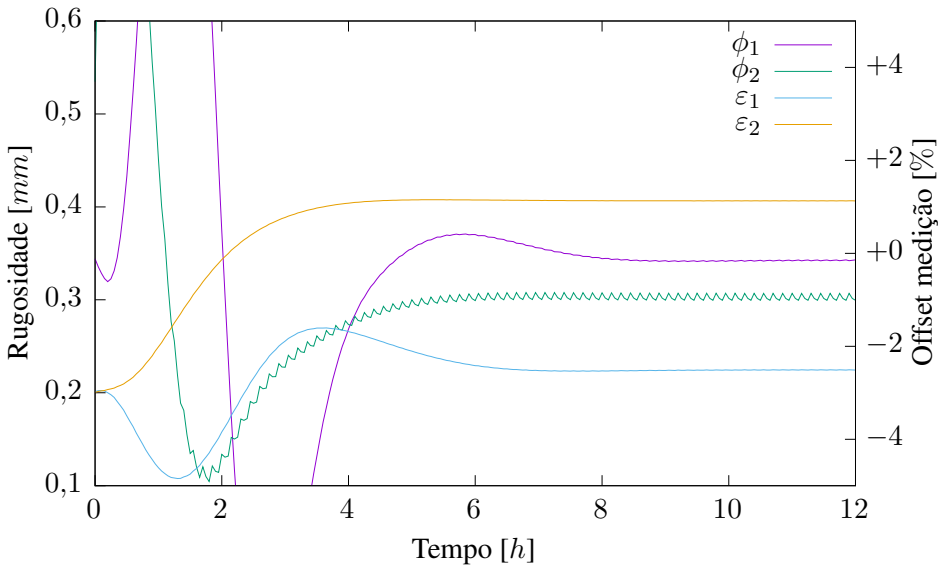


Figura 5.28: Tendências do estado estimado para caso similar a Modisette et al. (2013).

sistemático de -1% na vazão. Tais valores foram arbitrados por serem similares aos encontrados em sensores de campo. O caso utilizado é descrito como sendo o escoamento de gás transiente.

Os parâmetros a serem estimados são as rugosidades dos dutos 1 e 2, ε_1 e ε_2, assim como o *offset* de medição da vazão no compressor e na saída do duto 2, ϕ_1 e ϕ_2. O offset de medição pode ser definido como erro sistemático na medida proporcional ao valor medido. Foi construída geometria de escoamento com 25 elementos e utilizado o modelo de escoamento proposto neste trabalho como modelo de dinâmica do sistema.

Os resultados mostrados na Fig. 5.28 são coerentes com os valores utilizados na geração das informações. O resíduo apresentado na Fig. 5.29 mostra que, após algumas horas de aprendizado do filtro, o resíduo normalizado estabiliza em torno de valor nulo. Este resíduo normalizado pode ser definido como:

$$r_v = \frac{1}{l}\sum_{j=1}^{l}\left[v_k\left(t\right) - \hat{v}_k\left(t\right)\right] / \sigma_v,\ k = 1{,}2, \ldots \tag{5.1}$$

Onde $\hat{v}_k$ é o valor estimado pelo filtro e v_k é o valor original calculado sinteticamente, relacionado a informação medida, mas sem a modificação por ruído, e σ_v é a incerteza associada a medida.

O comportamento obtido mostra que é possível realizar a estimação de estado e parâmetros simultaneamente, com a utilização do filtro de Kalman, com resultados similares aos valores utilizados na geração dos dados simulados.

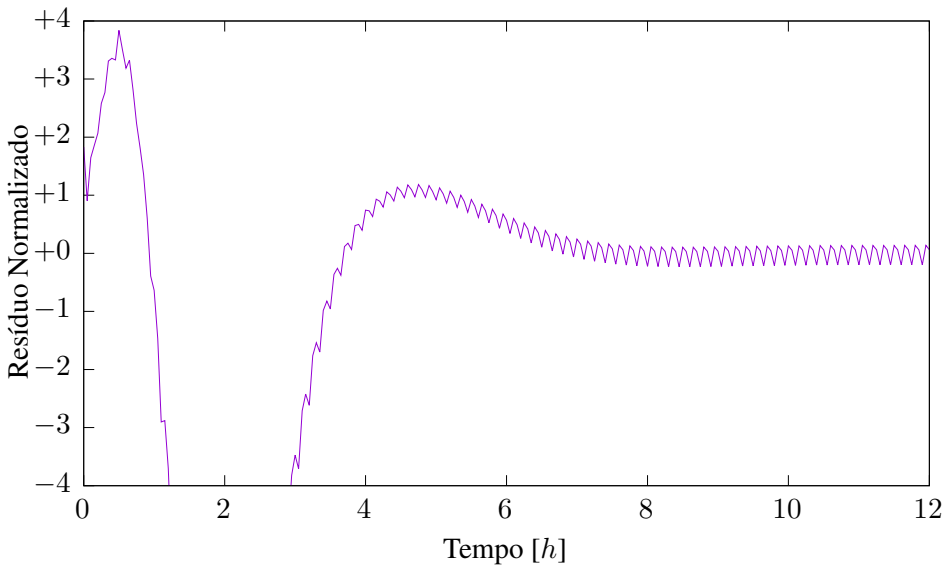


Figura 5.29: Resíduo normalizado para caso similar a Modisette et al. (2013).

Entretanto, estes resultados são particularmente sensíveis a incertezas de medição. Com o conhecimento adequado desta incerteza foi possível estimar valores adequados para os parâmetros, mas para casos reais, onde esta incerteza na medida não é conhecida adequadamente, isto pode trazer imprecisão aos valores estimados.

5.4.2 Durgut e Leblebicioğlu (2016)

Durgut e Leblebicioğlu (2016) apresentam uma estratégia de estimação de estado com a utilização de filtros independentes para a estimação de dois parâmetros independentes, com melhora na estabilidade da solução quando comparadas a estimação simultânea por um filtro apenas. Este trabalho não tem relação com o Modisette et al. (2013).

O problema estudado é o proposto por Zhou e Adewumi (2000), mostrado na figura 5.6, com resultados apresentados como tendências de pressão e escoamento mássico em diferentes pontos do escoamento. É possível visualizar o início de aprendizado do filtro e, após algumas horas, estabilização dos valores de rugosidade interna.

Um resultado obtido em Durgut e Leblebicioğlu (2016) é a instabilidade da solução quando da estimação de dois parâmetros de forma simultânea. Essa instabilidade na solução com um filtro de Kalman levou a proposta de trabalho com dois estimadores simultâneos, com resultados adequados.

São disponíveis informações de pressão e vazão mássica no início, final e secção intermediária do escoamento, que para uso são modificadas de ruído branco gaussiano com desvio

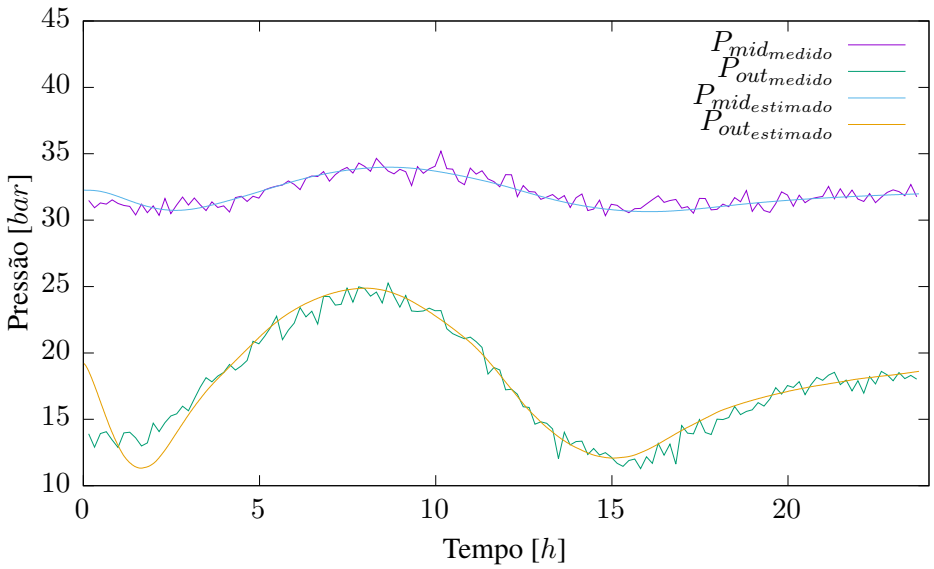


Figura 5.30: Tendências de pressão medidas e estimadas para caso similar a Durgut e Leblebicioğlu (2016).

de $1\,bar$ para pressões e $0{,}1\,MM\,Nm^3/d$ nas vazões.

Com o uso de FEK e demais premissas do trabalho original, as tendências de pressão estimada e medida são apresentadas na Fig. 5.30.

Nas tendências medidas é possível ver o efeito dos erros de medição, por um comportamento menos suave que nas curvas de pressão estimada. Entretanto, não foi identificada a dificuldade de estimação de dois parâmetros simultaneamente pelo mesmo filtro, e não foi feita analise de observabilidade neste problema por sua complexidade e não linearidade.

5.5 Gasodutos e malhas *offshore*

Como não são disponíveis casos similares aos em foco neste trabalho, ou seja, envolvendo gasodutos *offshore* em LDA profunda, foram propostos dois casos para avaliação da proposta e entendimento de melhores estratégias para colocação de matrizes de covariância ou definição do estado e parâmetros a serem estimados.

Inicialmente o sistema de escoamento descrito a seguir é modelado em OLGA 7.2.3, são propostas condições de contorno compatíveis com a operação de um sistema similar real e, com estas condições são gerados perfis de pressão, temperatura e vazão, que posteriormente são modificados com a ruído gaussiano de desvio padrão conhecido para simular uma imprecisão do instrumento, e então são utilizados como medidas de campo para o filtro de Kalman.

A proposta de escoamento utilizada na geração dos dados é similar à utilizada no filtro,

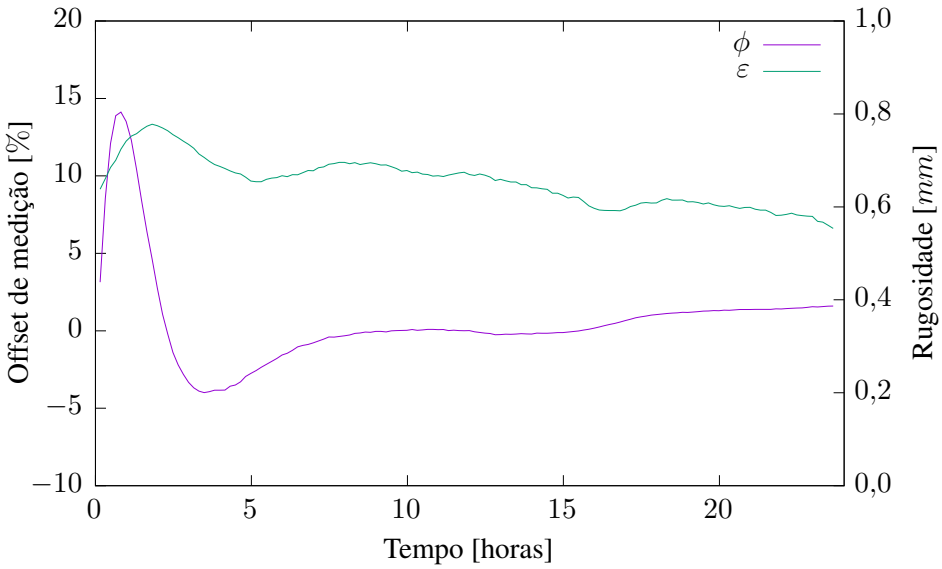


Figura 5.31: Tendências dos parâmetros estimados para caso similar a Durgut e Leblebicioğlu (2016).

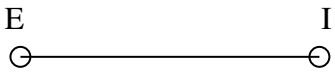


Figura 5.32: Desenho do gasoduto simples para avaliações.

mas com discretização mais fina (806 elementos) que a utilizada no filtro (32 elementos) na geometria, enquanto que o modelo de escoamento proposto neste trabalho, apesar de similar, também é diferente do aplicado na geração dos dados simulados.

É importante notar que para a literatura para dutos *onshore* ou em baixa LDA mostra que os efeitos térmicos não são tão pronunciados, e as observações mostram que a utilização de modelos isotérmicos não apresenta grandes variações com relação aos modelos que consideram a equação da conservação da energia para este cenário. Este assunto será abordado na Subseção 5.5.3

5.5.1 Gasoduto em águas profundas

Para um primeiro caso foi utilizado um gasoduto em LDA de $2\,100\,m$ de profundidade, com apenas uma entrada e uma saída de gás, de aproximadamente $200\,km$ de comprimento. A Fig. 5.32 mostra a geometria do gasoduto proposto. Este cenário é diferente do encontrado em gasoduto *onshore* pela grande variação de cota no escoamento aliada a uma grande variação da temperatura ambiente no escoamento.

O sistema de escoamento em avaliação é bastante simples e tem seu desenho esquemático dado na Fig. 5.33, modelado como um *riser* descendente vertical e um *flowline* com

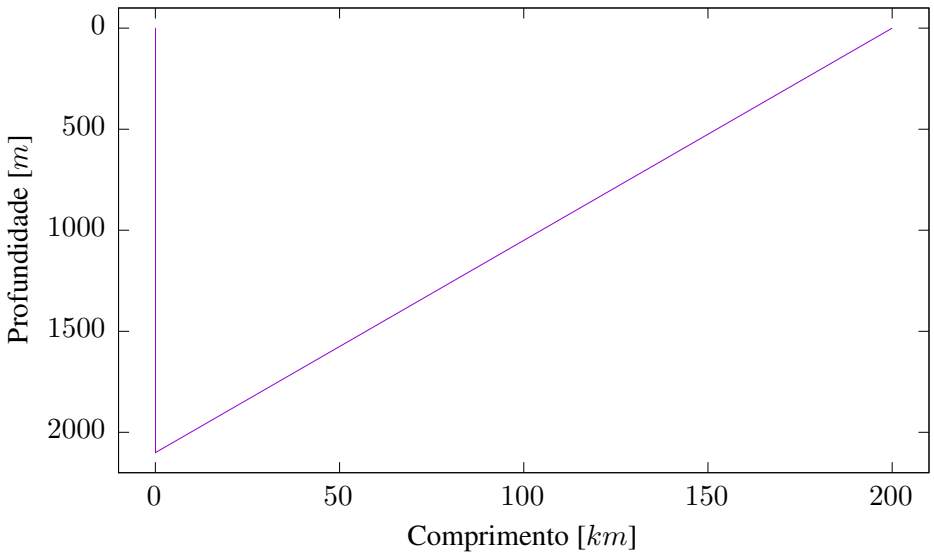


Figura 5.33: Geometria do gasoduto simples.

diminuição da profundidade constante. Sendo composto por apenas um ponto de entrada de gás e um ponto de saída de gás, ele é simples de ser modelado, porém apresenta similaridades com sistemas reais.

A temperatura externa neste caso é dada por $25{,}5\,°C$ na superfície, $4\,°C$ a partir de $800\,m$ de LDA até $2\,100\,m$ de profundidade e uma interpolação linear destes valores na profundidade entre 0 e $800\,m$. Esta é uma simplificação que evita a utilização de modelos não-lineares para descrever a variação de temperatura da água com a profundidade e que não fazem parte do escopo proposto.

São utilizadas como condições de contorno vazão e temperatura na entrada e pressão na saída. Na entrada é colocada a temperatura de $60\,°C$ e vazão de $2\,MM\,Nm^3/d$, enquanto que na saída é colocada a pressão de $50\,bar$. Esta proposta não é coerente com a realidade de operação de tais gasodutos, mas permite avaliações mais facilmente.

Os parâmetros utilizados foram um coeficiente global de troca térmica de $10\,W/m^2K$ e uma rugosidade interna de $0{,}183\,mm$. Nestas condições, a pressão de entrada é de $65\,bar$ e a temperatura de saída é de $25{,}1\,°C$, sendo demais condições dadas como condições de contorno para o modelo de escoamento.

Uma vez gerada a solução de escoamento em regime permanente no OLGA 7.2.3, foram registrados valores de pressão, temperatura e vazão na entrada e saída deste gasoduto, com o objetivo de serem usados como medidas na estimação de estado proposta. Após isso, foi necessário modificar os dados com ruído de desvio padrão conhecido para simular a incerteza de medição como forma de tornar a abordagem mais realista.

Para o ruído, considerando aspectos reais, foi adotada o desvio padrão de $1\,bar$ para pressão na entrada do duto, $1\,bar$ na saída do duto, $1\,°C$ para temperatura de entrada e saída no duto e $0{,}1\,MM\,Nm^3/d$ para vazões de entrada e saída. Estes valores também são utilizados na matriz de covariância, que se apresenta como diagonal.

O estado a ser estimado é, conforme proposto por Lorentzen, Nævdal e Lage (2003), definido por uma composição entre as variáveis de escoamento colocadas nos elementos discretizados e os parâmetros a serem estimados, conforme equacionamento:

$$x = [\,v\,p\,]^T \tag{5.2}$$

Onde v é dado pelo vetor das propriedades de escoamento como pressão, vazão e temperatura a depender de o modelo considerar ou não a equação de conservação de energia, em cada um dos nós de discretização, e p é composto pelos parâmetros a serem estimados, a depender dos efeitos que se deseja detectar.

O vetor v é automaticamente colocado com a discretização da geometria de escoamento, e tem dimensão dependente do refinamento utilizado. Aqui existe uma relação entre a precisão desejada no modelo de escoamento e na quantidade de variáveis computadas, que tendem a aumentar o custo computacional. Para a presente avaliação são utilizadas cerca de 98 variáveis de escoamento entre pressão, temperatura e vazão.

O vetor p depende da abordagem adotada para o filtro, e pode ser definido conforme conveniência para a avaliação de diferentes comportamentos. Nesta avaliação pode ser composto por parâmetro relacionado a perda de carga no escoamento, a rugosidade interna do duto, ou pela característica de troca térmica no duto, como o coeficiente global de troca térmica, que influencia o perfil térmico no escoamento, o que por sua vez influencia na perda de carga, ou mesmo por parâmetro nenhum em casos mais simples.

A seguir serão realizados diferentes estudos com o objetivo de avaliar os efeitos obtidos no resultado para o estado com o uso ou não da equação da conservação de energia, estimação de parâmetro de rugosidade e coeficiente global de troca térmica.

5.5.1.1 Sem estimação isotérmico

Uma primeira análise foi feita com o uso de abordagem encontrada na literatura para a avaliação de perfis de temperatura e pressão em gasodutos terrestres. Nela são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, mas não a de energia. A

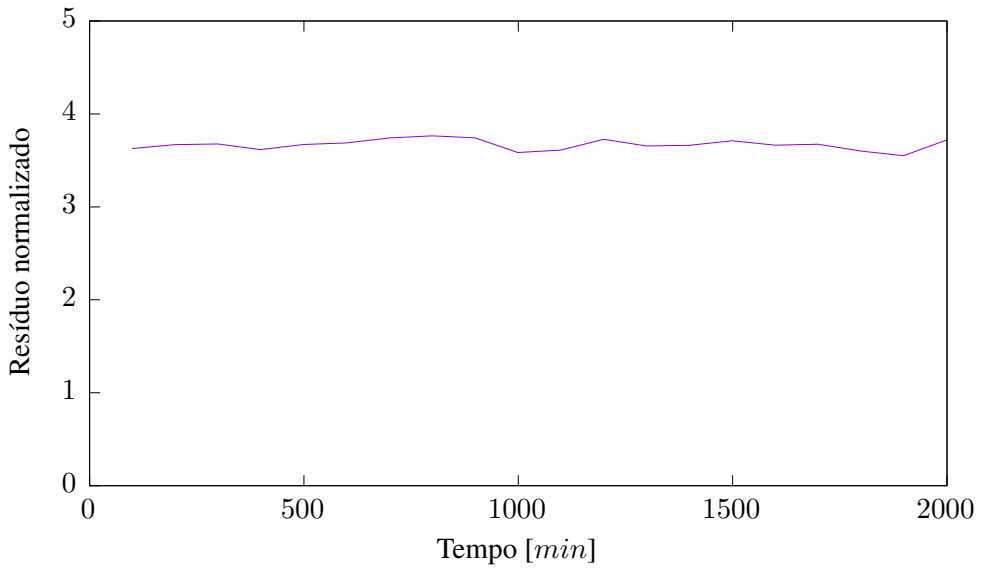


Figura 5.34: Tendência de resíduo para simulação sem estimação em modelo isotérmico.

aproximação utilizada é uma temperatura constante com valor de $4\,°C$, similar à temperatura do ambiente na maior parte do escoamento.

Não existem parâmetros a serem estimados ou utilização de filtro de Kalman. Este mesmo conceito é utilizado na modelagem dos demais problemas isotérmicos. Esta abordagem simplifica a modelagem dos gasodutos e a solução das equações de escoamento, sendo que apenas são calculados perfis de vazão e pressão, não sendo necessário definir temperatura exterior ao duto, já que a temperatura do gás é fixada em $4\,°C$.

O objetivo aqui é demonstrar o comportamento conseguido com a aplicação de um modelo de escoamento apenas, sem tratamento das medidas disponíveis antes de sua utilização como condições de contorno, e sem considerar variações de temperatura.

As variáveis medidas são utilizadas diretamente, sendo colocadas nas condições de contorno conforme descrito, e as medidas complementares são desconsideradas. Parâmetros são arbitrados baseados nestas medidas complementares e o modelo numérico é utilizado então para cálculo dos perfis de temperatura e pressão.

Para esta configuração foram rodados dois mil minutos de dados e o resultado para o resíduo ou somatório das diferenças entre os resultados de variáveis simulados e os medidos são dados na Fig. 5.34. Considera-se que houve convergência no procedimento de estimação se este valor permanecer entre $\pm\,3$ desvios-padrão do erro na medida e possuir média nula. Ao longo do trabalho estas avaliações são realizadas com o objetivo de verificar a convergência da estimação de estado, quando esta é utilizada.

Como pode ser observado na Fig. 5.34, o resíduo oscila em torno de um valor não nulo, em razão de não se utilizar valor adequado de rugosidade para o caso proposto. Com uma avaliação mais profunda das variáveis complementares seria possível se propor um melhor valor para os parâmetros de forma a minimizar o resíduo, mas esta tarefa deve ser realizada de forma independente das simulações.

Outras avaliações são possíveis de serem realizadas com esta abordagem, levando a conclusões similares de que, para dutos de escoamento o uso direto de medidas de campo é insuficiente para uma melhor estimativa da real condição de escoamento e se faz necessário de alguma forma estimar valores de propriedades para o modelo de escoamento que tragam um melhor ajuste entre as medidas de campo e os valores gerados pelo modelo.

Esta abordagem é insuficiente para a modelagem de problemas de escoamento onde a variação da temperatura seja significativa e influencie o perfil de pressão significativamente, como é o caso de gasodutos *offshore* em LDA profunda. Ela também é insuficiente para avaliações em dutos *onshore*, sendo necessário alguma avaliação estatística para propor valores mais adequados de parâmetros do modelo de escoamento.

Uma interpretação possível é que a premissa de temperatura usada traz consigo um grande erro de cálculo na região do *riser*, onde o gradiente de temperatura externo é alto. Como as perdas de carga hidrostática no escoamento dependem da massa específica do gás, este termo na conservação da quantidade de movimento é mal avaliado com a abordagem isotérmica.

São apresentadas melhorias nos itens a seguir, englobando o uso de equacionamento para descrever o comportamento térmico do escoamento além de estimação de valores para parâmetros do escoamento como rugosidade interna e coeficiente global de troca térmica.

5.5.1.2 Sem estimação

Para um cenário agora com solução da equação da energia, podem ser realizadas simulações para acompanhamento sem a estimação de parâmetros, apenas se utilizando variáveis medidas nas condições de contorno, e se obtendo uma serie de perfis de pressão, temperatura e vazão, de maneira bastante similar ao descrito anteriormente.

Neste caso, as variáveis a serem calculadas são também a pressão e a vazão, e agora incluem também a temperatura. Essa abordagem é utilizada para demais casos com cálculo térmico. Agora o modelo é capaz de detectar variações de temperatura ambiente e do gás natural, característica desejável a problemas de escoamento em LDA profundas.

Com um período de dois mil minutos, a tendência do resíduo obtido é dada na Fig.

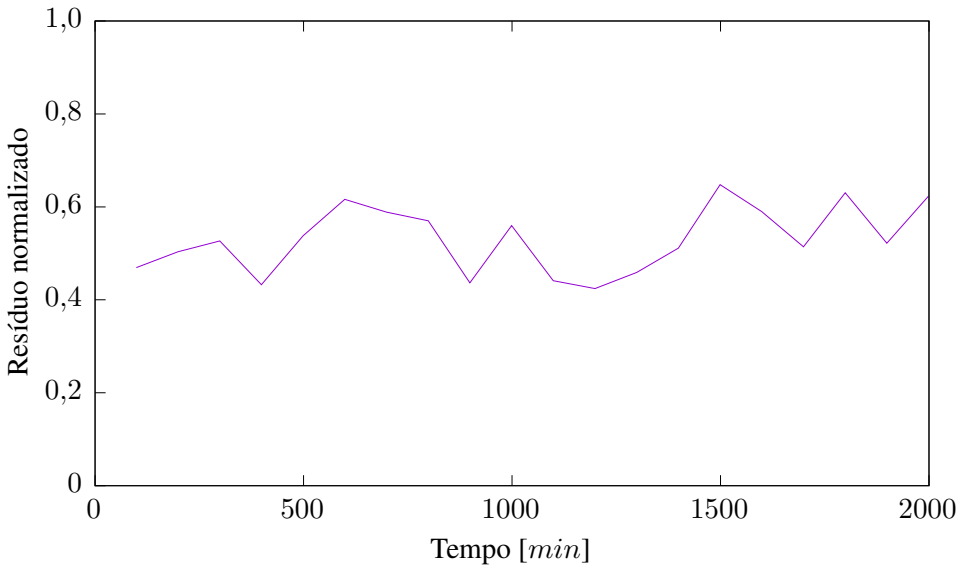


Figura 5.35: Resíduo para modelo térmico sem estimação para caso de gasoduto.

5.35. Ela é bastante estável, por não existir nenhum tipo de estimação envolvida ou alteração de parâmetros, sendo que as variações encontradas são oriundas do ruído nas medidas, que são usadas diretamente como condições de contorno no modelo de escoamento.

É possível notar que ainda existe diferença sistemática entre as variáveis estimadas e medidas, resultando numa tendência de resíduo que não é zero (0,52). Este comportamento pode ser melhorado com a utilização de avaliações estatísticas para proposição de valores mais adequados para propriedades como a rugosidade interna do duto ou coeficiente global de troca térmica.

Apesar destas características, esta é a forma atualmente utilizada em soluções comerciais de PMS (D'ANDREA et al., 2015). Estas soluções costumam empregar modelos de escoamento comerciais complexos com utilização de abordagem composicional e resolução da equação da conservação da energia.

Esta abordagem permite o cálculo de perfis de pressão, temperatura, vazão, composição e mais variáveis de interesse para os dutos, além de permitir uma avaliação de comportamento futuro para cenários de condições de contorno pré-definidas, já sendo uma ferramenta poderosa de auxílio a gestão do escoamento.

Aqui a avaliação é similar a realizada no caso isotérmico. A utilização de medidas diretamente nos modelos de escoamento é incapaz de lidar com possíveis ruídos existentes, além de não existir uma utilização das medidas complementares, apenas das utilizadas nas condições de contorno. São necessárias, então, formas de se trabalhar estas características.

5.5.1.3 Estimação de estado com modelo isotérmico

Uma forma possível de ajustar as medidas antes da colocação no modelo de escoamento é a estimação de estado com o uso do filtro de Kalman. O filtro de Kalman corrige as estimativas do estado de forma a minimizar a covariância do erro de estimação, tendo como base a diferença entre o resultado produzido pelo modelo e o efetivamente observado pelos sensores (medidas).

Isso é possível pois tanto o processo (dinâmica da planta ou sistema) quanto as observações são considerados sujeitos a incertezas que são incorporadas ao modelo, conforme descrito em seção anterior. Neste cenário, temos uma primeira aplicação da estimação de estado simples. Aqui o estado pode ser dado pelas propriedades de escoamento:

$$x = [\, \ldots \; P_i \; \dot{m}_i \; \ldots \,] \tag{5.3}$$

Esta parte do vetor de estado é composta por todas as variáveis calculadas pelo modelo de escoamento, incluindo neste caso a pressão e a vazão. Apesar de se tratar de uma grande quantidade de variáveis, 66 neste caso, seu tratamento no filtro de Kalman é possível.

Como o problema de escoamento é não linear, é utilizado o filtro de Kalman estendido com linearização das matrizes de evolução e de observação a cada instante de tempo. Esta linearização é realizada numericamente, a partir do modelo de escoamento proposto.

Para aplicação do filtro de Kalman é necessário, ainda, um vetor de observação, para a etapa de atualização do filtro. Neste caso o vetor de observação é dado pelas medidas das variáveis de pressão e vazão na entrada e saída do gasoduto, visto que se trata de um problema isotérmico. Estas informações são os resultados do modelo simulado modificados com ruído.

$$z = [\, P_E \; \dot{m}_E \; P_I \; \dot{m}_I \,]^T \tag{5.4}$$

As matrizes de covariância são definidas conforme descrito em Lorentzen, Nævdal e Lage (2003). Como premissa inicial para a construção desta matriz, é considerado que não existe correlação entre o erro nos parâmetros e nas variáveis. Nesta condição, a matriz de covariância do ruído do processo pode ser descrita conforme abaixo:

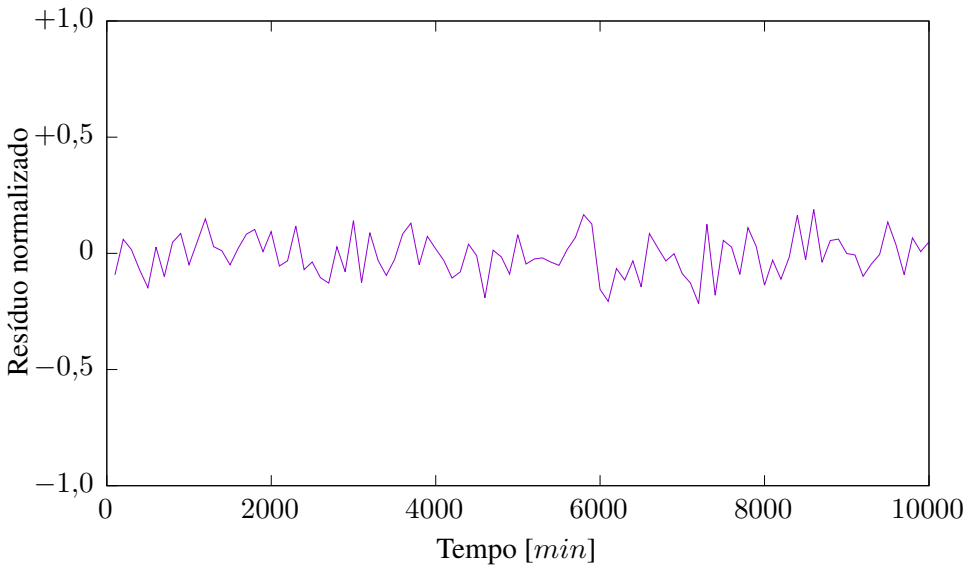


Figura 5.36: Resíduo para modelo isotérmico com estimação de estado para caso de gasoduto.

$$[Q]_{ij} = \begin{cases} 10^{-17}, & \text{se } i = j \leq m \\ \left(\sigma_i^Q\right)^2, & \text{se } i = j > m \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases} \tag{5.5}$$

Onde os valores são colocados de forma a tornar a matriz positiva definida. M é o número de variáveis a serem calculadas no modelo de escoamento, e são definidos valores σ_i^Q referentes aos parâmetros quando for o caso de parâmetros a serem estimados e N é a quantidade de parâmetros a serem estimados, que para este trabalho pode ser um ou dois parâmetros, a rugosidade interna e o coeficiente global de troca térmica. O objetivo de usar valores pequenos, e não o zero, na diagonal da matriz até o termo M é tornar a matriz positiva definida.

A matriz de erro das medidas é simples de ser colocada nos casos envolvendo dados simulados. Os valores de desvio padrão utilizados na modificação com ruído dos valores de referência são utilizados diretamente na matriz. Para o caso atual temos que para variáveis de pressão $\sigma_i^Q = 1\,bar$, para temperatura $\sigma_i^Q = 1\,°C$ e para vazão $\sigma_i^Q = 0{,}1\,MM\,Nm^3/d$, de forma similar a utilizada para modelar erros nas medidas. Dessa forma a matriz é necessariamente positiva definida.

Como não existe parâmetro a ser estimado, este caso tem uma simples implementação. Com a utilização das informações obtidas sinteticamente, o resíduo se comporta conforme Fig. 5.36. Com base nesta figura, já é possível verificar que o resíduo tem média próxima a zero ($-0{,}0027$) após algum tempo de atuação do filtro.

É possível ver que o filtro modifica as condições de escoamento de forma a zerar o

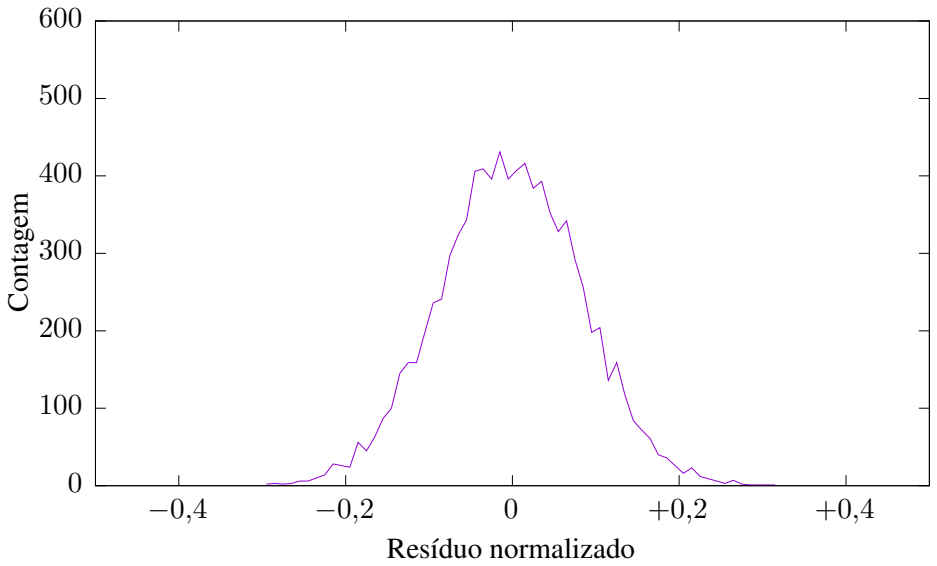


Figura 5.37: Histograma do resíduo para caso de gasoduto com estimação e cálculo isotérmico.

resíduo. Este comportamento é adequado à modelagem do escoamento em gasodutos, pois minimiza a variação dos resultados e medidas, o que traz consigo uma maior representatividade dos perfis estimados.

Uma segunda avaliação para a funcionalidade do filtro de Kalman é a observação do histograma do resíduo. Pelas hipóteses adotadas na construção do problema e das medidas, é esperado que este tenha formato de uma curva normal-padrão com média nula.

O histograma para o caso de estimação de estado com modelo isotérmico é dado na Fig. 5.37, onde pode ser visto novamente a média próxima a zero do resíduo, porém com um grande desvio padrão, associado ao ruído nas medidas.

Nesta construção do histograma são considerados apenas os pontos obtidos após os dois mil minutos, momento em que o resíduo já parece ter estabilizado e o filtro realizado ajustes nas condições de contorno de forma adequada.

Este comportamento mostra como tendência geral a convergência do filtro após algum tempo, com indicativo de implementação adequada das equações utilizadas para a estimação através do filtro de Kalman, pelos critérios de convergência propostos.

Podem ser realizadas avaliações mais aprofundadas no comportamento do filtro em si, com o uso das medidas e resultado da estimação ou com informações do modelo simulado. Tais avaliações são realizadas nos próximos casos, uma vez que possuem comportamento similar entre si.

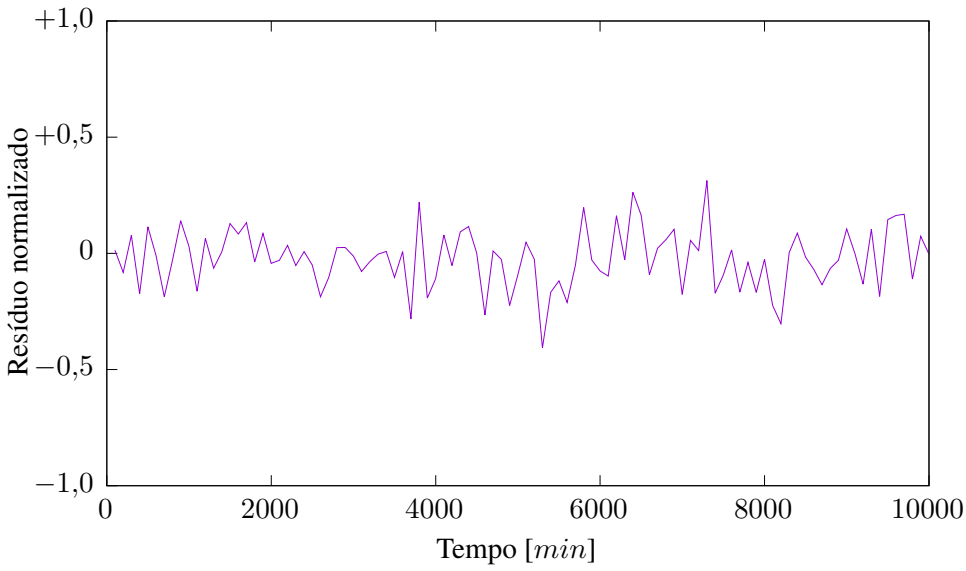


Figura 5.38: Resíduo para modelo térmico com estimação de estado para caso de gasoduto.

5.5.1.4 Estimação de estado com cálculo térmico

Para o caso com estimação de estado com solução da equação da conservação de energia, as variáveis a serem calculadas são definidas como os perfis de temperatura, pressão e vazão no escoamento, que pela discretização da malha resultam no vetor de estado abaixo:

$$x = [\ldots\ P_i\ T_i\ \dot{m}_i\ \ldots] \tag{5.6}$$

O vetor de observação é dado pelas medidas das variáveis de pressão, temperatura e vazão na entrada e saída do gasoduto. Estas informações são disponíveis a partir dos dados simulados gerados em OLGA. Ele pode ser descrito como:

$$z = [\,P_E\,T_E\,\dot{m}_E\,P_I\,T_I\,\dot{m}_I\,]^T \tag{5.7}$$

Visto que a estimação de estado com modelo isotérmico apresentou ajuste do resíduo, o próximo caso de avaliação é a estimação de estado com a utilização da equação de conservação da energia. Neste caso o resíduo é dado na Fig. 5.38.

É possível constatar que, após a atuação do filtro proposto, a média do resíduo se aproxima de zero ($-0{,}0032$). Este comportamento é similar ao obtido com a utilização de estimação de estado no modelo isotérmico, não sendo possível verificar uma melhoria a partir do resíduo calculado.

O comportamento geral dos resultados mostra que o uso da equação da conservação

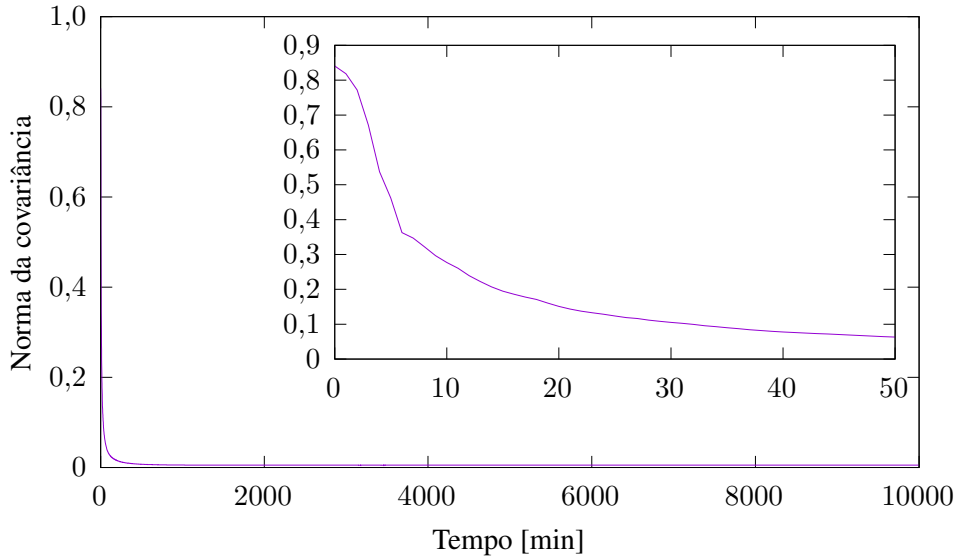


Figura 5.39: Norma da matriz de covariância para o caso de gasoduto com estimação de estado.

da energia não traz diferença significativa entre os casos de estimação de estado quando é comparado o resíduo apenas. Apesar de correta, esta avaliação pode ser considerada incompleta. São necessárias outras formas de avaliação para verificar o ganho obtido, conforme mostrado adiante.

Como os problemas reais de escoamento em dutos em LDA profunda sofrem uma grande variação térmica, é coerente afirmar que a utilização da equação de conservação de energia traz ganhos à modelagem do problema, por permitir o uso de rugosidade e troca térmicas próximos aos reais.

O comportamento geral do filtro pode ser visto através das matrizes de ganho de Kalman e de covariância. Para apresentação são dadas as normas euclidianas destas matrizes. Em alguns minutos o ganho de Kalman e a covariância atingem um valor baixo e estável, onde o filtro atinge convergência.

Na Fig. 5.39 é apresentada a norma euclidiana da covariância. Esta norma é conseguida com a soma quadrática dos elementos na diagonal da matriz. Quanto mais baixo seu valor, mais o filtro entende que as incertezas no modelo de escoamento são baixas em comparação com as medidas disponíveis, e com isso o ajuste entre medidas e resultados calculados tende mais para os resultados calculados.

Este não é, por si só, um comportamento desejável, pois pode indicar uma divergência, ou seja, o filtro aprender certo o modelo errado e não mais dá importância às medidas. Para isso é necessário verificar também o resíduo e, periodicamente, perturba-se deliberadamente a matriz de covariância do erro de estimação para aumentar os valores da matriz de covariância,

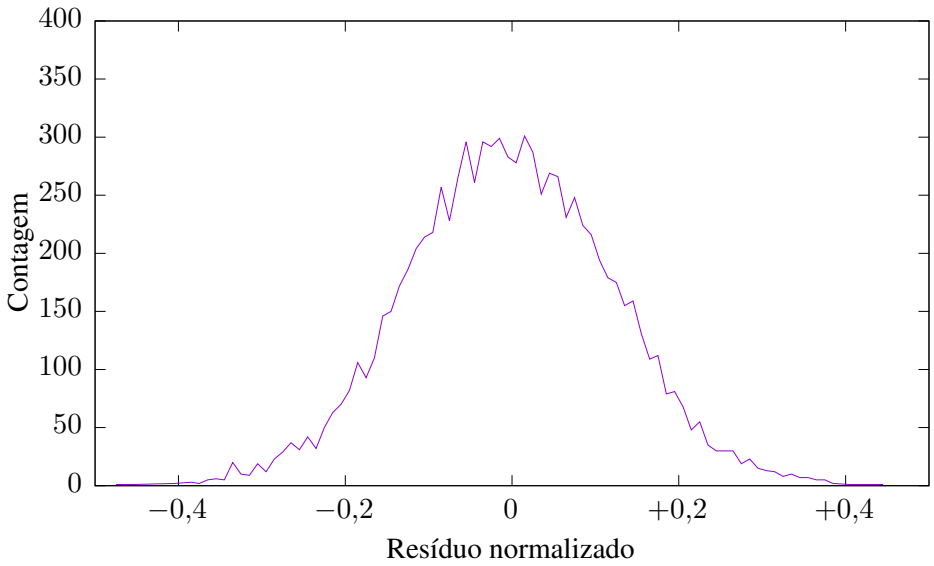


Figura 5.40: Histograma do resíduo para caso de gasoduto com estimação de estado para modelo térmico.

fazendo com que a novas medidas sejam consideradas pelo filtro e verificar se ele consegue rastrear eventuais mudanças. Esta avaliação será realizada na seção 5.5.1.10.

É possível verificar que a matriz covariância é inicialmente alta, com queda à medida em que novas informações vão sendo processadas. Isso se dá pela forma com que a matriz de covariância foi inicializada, e esta matriz influencia no ganho de Kalman, onde inicialmente o ganho é alto, pelos altos valores da matriz de covariância, e após algumas iterações seu valor cai, pela diminuição dos valores na matriz de covariância. Comportamento similar é encontrado nos demais itens das diferentes abordagens para a estimação de estado, a seguir.

O histograma do resíduo pode ser visto na Fig. 5.40, com um valor de desvio padrão baixo e uma média próxima a zero ($-0{,}0032$). Seu formato assemelha-se ao de uma curva de distribuição normal, consistente portanto com as hipóteses de ruído utilizadas no modelo.

5.5.1.5 Estimação de estado e parâmetro com modelo isotérmico

Uma próxima melhoria proposta consiste da estimação não apenas do estado no escoamento, mas também de um parâmetro que influencie o seu perfil de pressão.

Conforme Modisette et al. (2013), a rugosidade interna do duto é um bom ponto de partida para estimação, visto que tem influência relevante no perfil de pressão a que o escoamento está submetido.

Neste caso, a rugosidade interna do duto é o parâmetro a ser estimado. Para tanto, ele

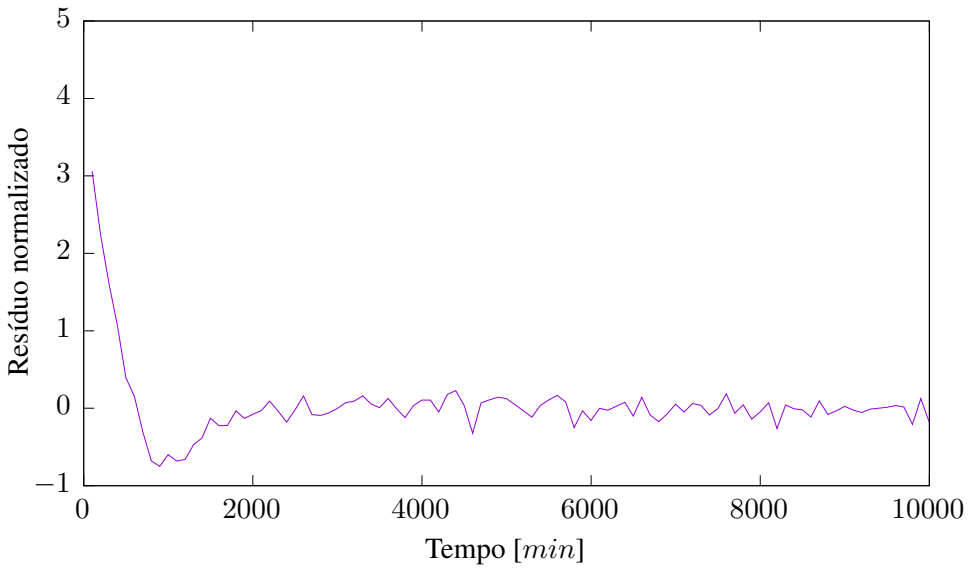


Figura 5.41: Resíduo para modelo isotérmico com estimação de um parâmetro para caso de gasoduto.

será incluído no vetor de estado, que passa a ser dado por:

$$x = [\ldots\ P_i\ \dot{m}_i\ \ldots\ \varepsilon\ ] \tag{5.8}$$

O que permite a estimação conjunta das variáveis de escoamento e do parâmetro de rugosidade interna.

Assim como resultado obtido para o caso com estimação de um parâmetro, temos o resíduo dado na Fig. 5.41. O comportamento geral é similar ao do caso de estimação de estado, sem um ganho perceptível com a estimação de parâmetro relacionado à perda de carga.

Nos primeiros minutos de estimação é visível uma queda significativa do resíduo. Isso se dá pela estimação da rugosidade interna. Nos casos onde o valor inicial é similar ao valor estimado, este efeito não é percebido como aqui.

O histograma do resíduo obtido é dado na Fig. 5.42. O comportamento geral é similar ao do caso com estimação de estado apenas. Isso não significa, necessariamente, que o estado estimado não possui maior precisão. Significa que o filtro tem uma atuação similar atingindo convergência com valores adequados dos parâmetros.

O parâmetro de rugosidade interna estimado é dado na Fig. 5.43. É possível verificar um comportamento onde inicialmente as variações são grandes, e depois variam com menores taxas. Isso se deve, também, pela diminuição das matrizes de ganho e covariância.

Uma melhoria observada com a estimação de parâmetro de rugosidade interna é uma

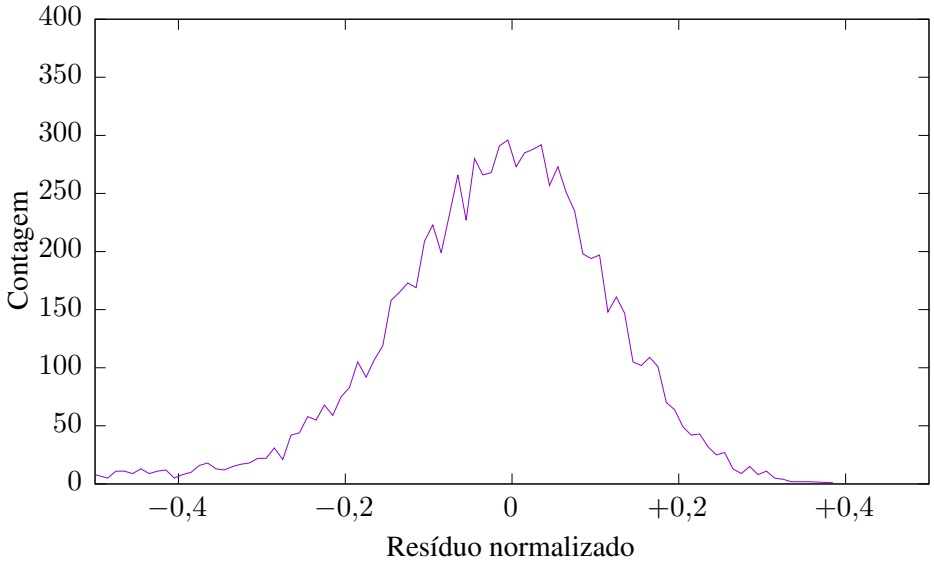


Figura 5.42: Histograma do resíduo para caso de gasoduto para modelo isotérmico com estimação de um parâmetro.

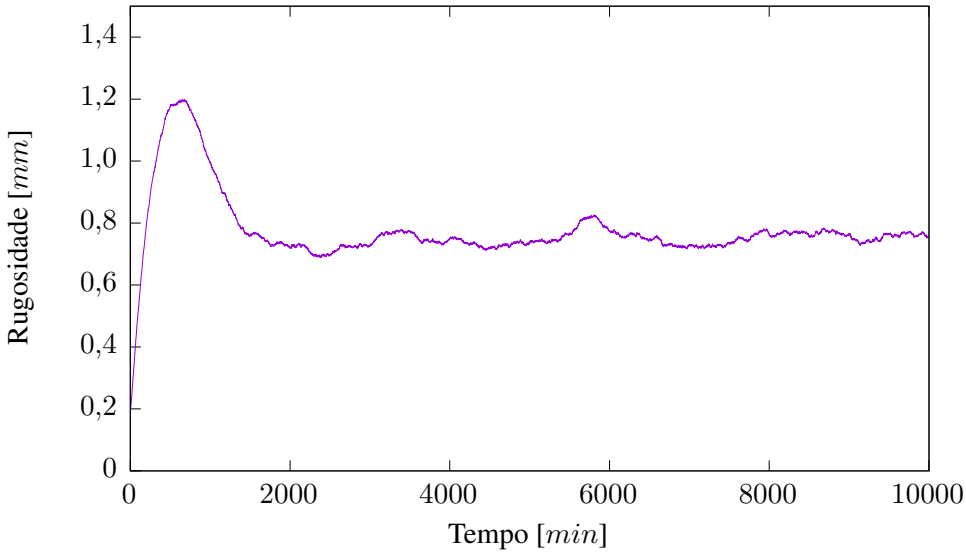


Figura 5.43: Rugosidade estimada para caso de gasoduto com modelo isotérmico.

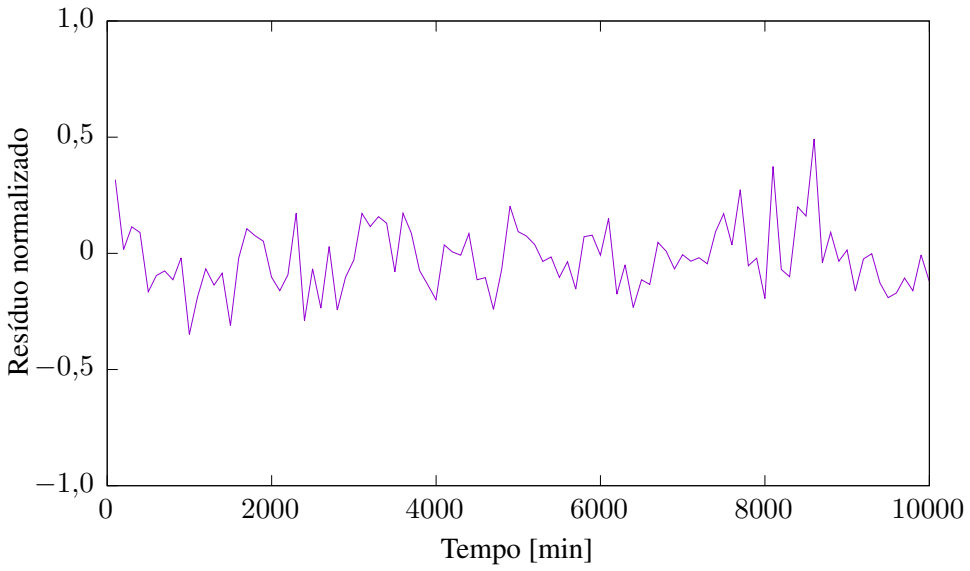


Figura 5.44: Resíduo para caso com estimação de parâmetro térmico para caso de gasoduto.

aproximação do perfil de pressão estimado com relação ao original obtido sinteticamente. Este comportamento será discutido na próxima subsecção, com o uso de diferença quadrática entre os valores estimados e os simulados.

5.5.1.6 Estimação de estado e um parâmetro com cálculo térmico

Uma vez que é interessante a utilização da equação de conservação de energia na estimação de estado para gasodutos em LDA profunda, avalia-se agora a influência da inclusão do cálculo térmico na estimação conjunta do estado e do parâmetro rugosidade.

$$x = [\ldots\ P_i\ T_i\ \dot{m}_i\ \ldots\ \varepsilon\,] \tag{5.9}$$

Com este cenário montado, foram realizadas estimações com o modelo proposto, para um período de dez mil minutos. Neste período o filtro estima valores das propriedades de escoamento, compara com medidas oriundas do modelo em OLGA 7.2.3 e modificados com ruído, e assim estima o estado e o parâmetro de rugosidade do duto.

Mais uma vez é possível ver, com o resíduo dado na Fig. 5.44, que o resíduo possui média nula, com comportamento semelhante ao caso anterior, no qual apenas o estado foi estimado. Por estas avaliações não é possível, ainda, dizer que se trata de um ganho a estimação deste parâmetro.

Na Fig. 5.45 é apresentado o histograma do resíduo para o caso onde é realizada a estimação de um parâmetro. Uma comparação simples com o resultado obtido para estimação de

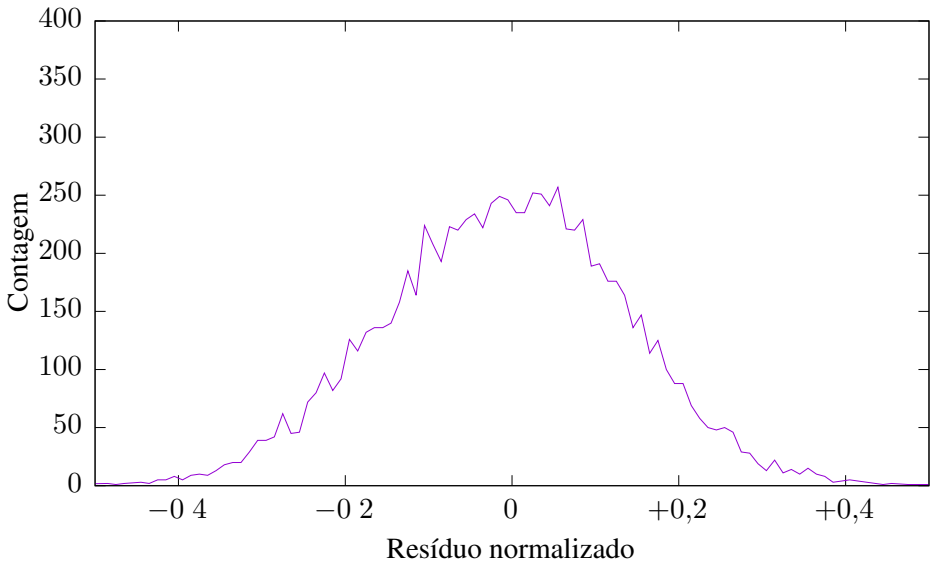


Figura 5.45: Histograma do resíduo para caso de gasoduto com cálculo térmico e estimação de um parâmetro.

estado anterior mostra que não houve variação significativa do histograma como consequência da melhoria introduzida no modelo. Isso pode ser explicado, em parte, pela utilização de valores razoáveis para rugosidade e coeficiente global de troca térmica, e será fruto de avaliações mais profundas em subsecção específica.

Como neste caso foi estimado valor do parâmetro de rugosidade interna ele é apresentado na Fig. 5.46. Os valores oscilam com o passar do tempo, mas com uma baixa amplitude, e atingem o valor médio de $0{,}23\,mm$, um pouco superior ao utilizado na geração dos dados simulados. Isso significa uma diferença de aproximadamente 4% no fator de fricção associado.

Como a rugosidade estimada é muito similar à utilizada nos casos anteriores, isso pode ser um dos fatores que levaram a um resultado similar aos casos anteriores mais simples. É importante notar que, para casos reais, os valores de rugosidade e troca térmica não são conhecidos realmente, sendo apenas conhecidos intervalos aceitáveis a depender do material e técnicas de construção do duto.

Apesar de não apresentar ganhos quando comparada à avaliações anteriores, a possibilidade de estimação da rugosidade de forma acoplada à estimação de estado é interessante pois torna o processo independente de avaliações periódicas ou da necessidade de um bom valor inicial arbitrado, muito embora existam outros parâmetros que podem ser utilizados além deste.

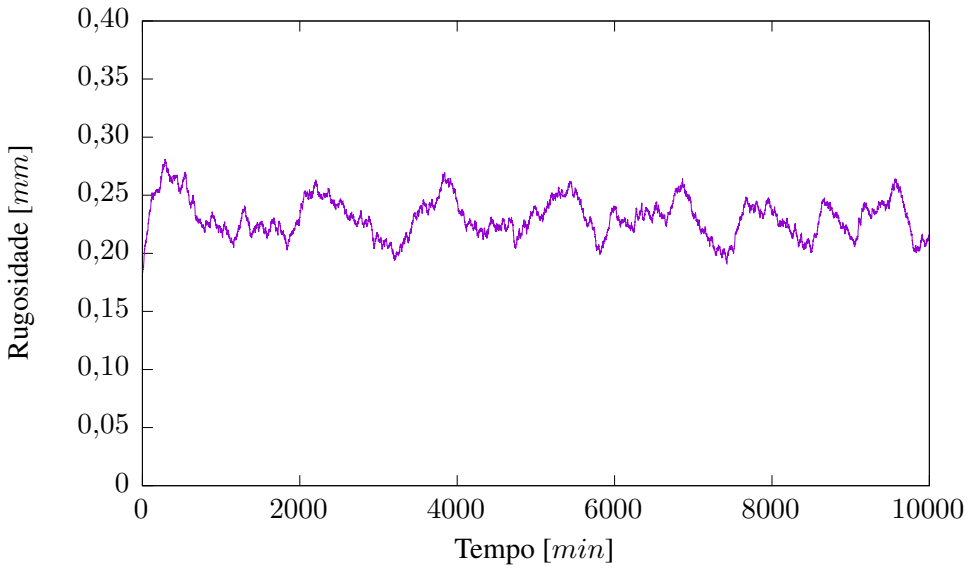


Figura 5.46: Rugosidade estimada para caso de gasoduto para caso com estimação de um parâmetro.

5.5.1.7 Estimação de estado e dois parâmetros independentes

Da mesma forma que a rugosidade, a troca térmica não é bem conhecida em dutos, e depende dos materiais e técnicas de fabricação, não sendo um parâmetro controlado diretamente durante a fabricação dos tubos. Assim, é interessante trabalhar também com este parâmetro de forma integrada ao filtro.

Então, com a proposta de melhoria do estado proposto, é considerado também a possibilidade de estimação de parâmetro relacionado a troca térmica no gasoduto. Assim, o vetor de estado é aumentado com a inclusão dos dois parâmetros a serem estimados conjuntamente; o vetor de estado passa a ser:

$$x = [\ldots\ P_i\ T_i\ \dot{m}_i\ \ldots\ \varepsilon\ U\ ] \tag{5.10}$$

Com isso, além de uma avaliação dos perfis de pressão e de temperatura, temos também a estimação de informações a respeito de perda de carga no escoamento e de troca térmica, obtidas de forma concomitante. A Fig. 5.47 mostra o resíduo para este caso. Os resultados do filtro continuam similares aos casos anteriores.

Isso mostra que, mesmo com a convergência do filtro para os diferentes parâmetros estimados, ainda é possível avançar na qualidade dos resultados obtidos na estimação de estado, com uma colocação mais conveniente dos parâmetros a serem estimados.

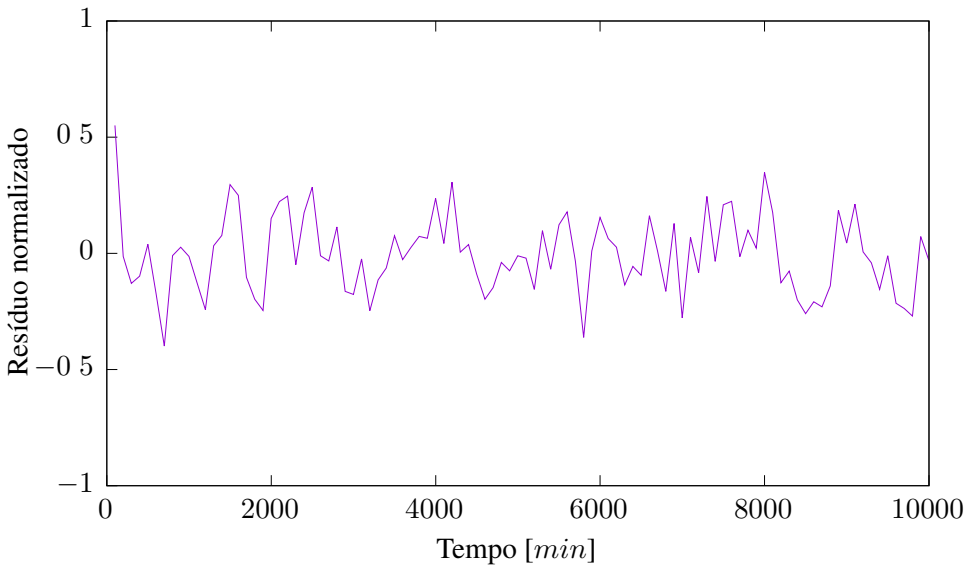


Figura 5.47: Resíduo para modelo térmico com estimação de dois parâmetros.

O comportamento geral obtido é similar aos casos anteriores, sem uma aparente melhoria mesmo com uma maior complexidade e liberdade do filtro. Mais uma vez, isso pode ter sido causado pelos bons valores utilizados nos casos anteriores, e será objeto de avaliação mais adiante. A Fig. 5.48 mostra o histograma do resíduo para este caso, também muito similar aos casos anteriores.

A evolução temporal das estimativas para a rugosidade interna e para o coeficiente global de troca térmica são apresentados nas Fig. 5.49 e Fig. 5.50 respectivamente.

Assim, como nos demais casos avaliados, o desvio padrão é de $0{,}1\,bar$, relacionado ao ruído inserido nas medições. Esse valor é significativamente inferior ao valor do ruído utilizado nas medidas devido à simplicidade do problema avaliado, sem efeitos transientes ou outras variações.

A rugosidade estimada mostrada na Fig. 5.49 oscila em torno de um valor médio no decorrer do tempo, após uma etapa inicial de ajuste. Este comportamento não é esperado num caso real, mas pode ser explicado pela baixa influência desta variação nas perdas viscosas do escoamento, da ordem de 2%. É importante notar que esta rugosidade não depende do valor inicial arbitrado, evoluindo no tempo para valores similares independentemente da condição inicial adotada.

O segundo parâmetro estimado é o coeficiente global de troca térmica, mostrado na Fig. 5.50. Neste caso o comportamento foi mais similar ao da rugosidade, com baixa variação do valor. O parâmetro converge para valor similar ao utilizado na geração dos dados simulados, para $9\,W/m^2K$.

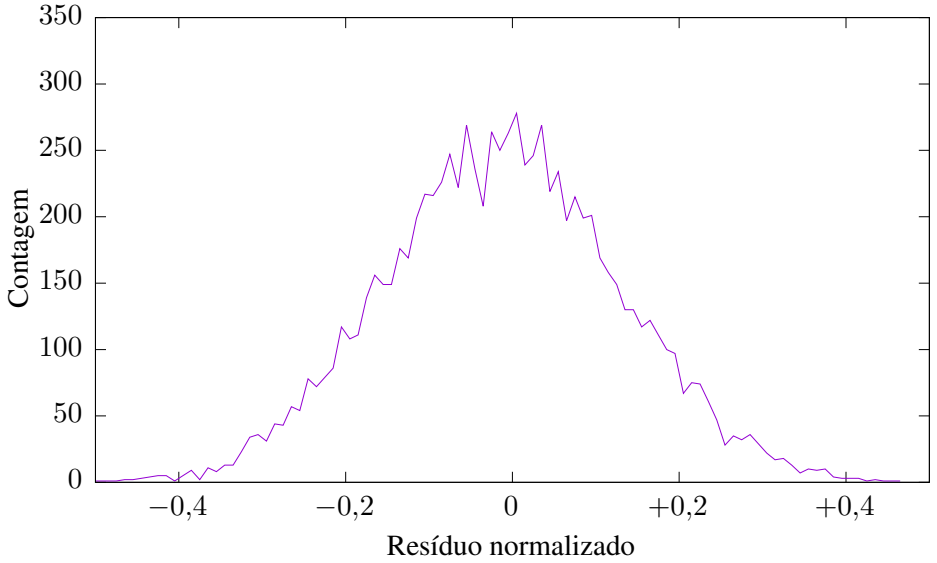


Figura 5.48: Histograma do resíduo para caso de gasoduto com modelo térmico e estimação de dois parâmetros.

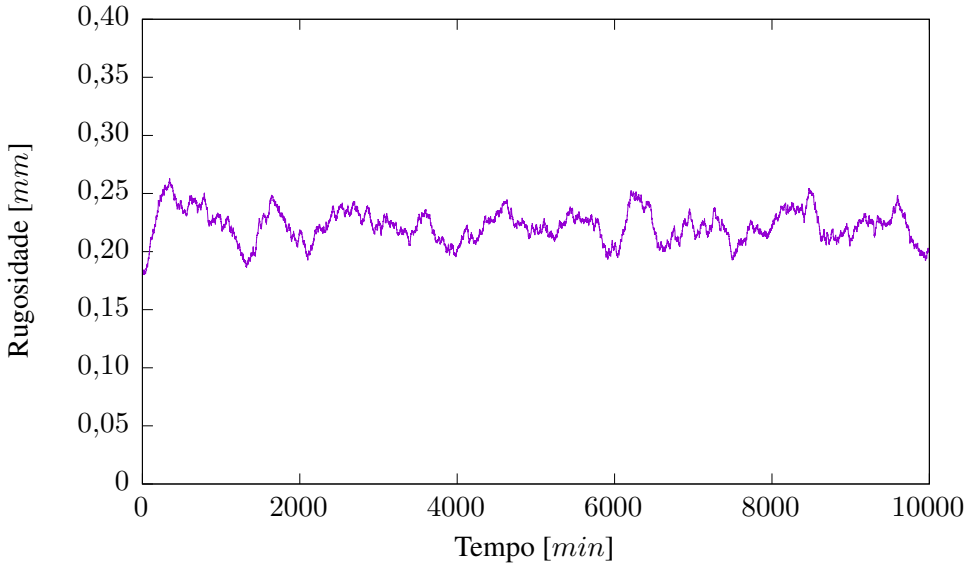


Figura 5.49: Rugosidade estimada para caso com estimação de dois parâmetros para caso de gasoduto.

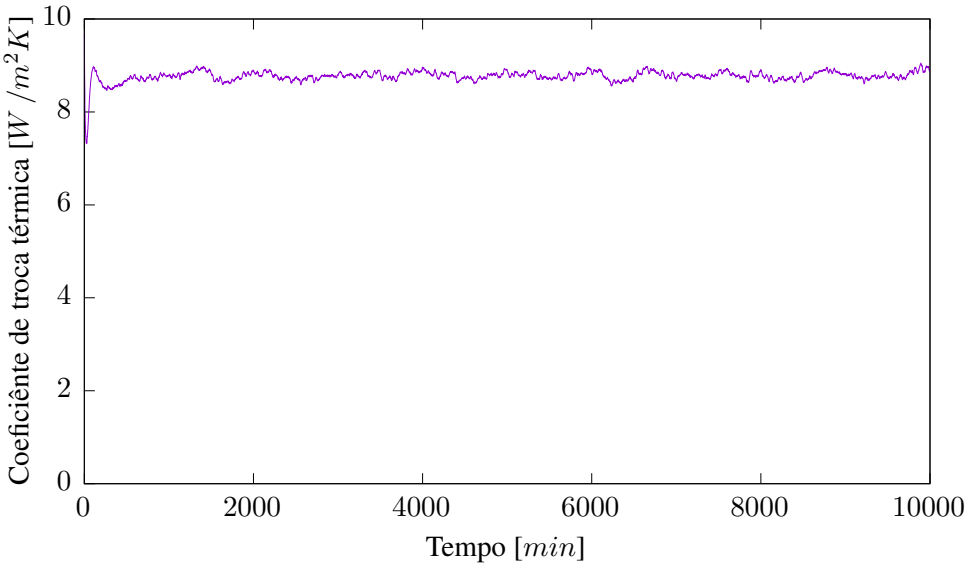


Figura 5.50: Troca térmica estimada para caso com estimação de dois parâmetros para caso de gasoduto.

Estas diferenças entre valores estimados de rugosidade interna e coeficiente global de troca térmica com relação ao dado de origem pode ser explicada pelas diferenças nos modelos de escoamento, na discretização da geometria de escoamento, colocação dos pontos das medidas, na equação de estado do gás e no perfil de temperaturas ambientes.

Na Fig. 5.51 é apresentada a norma euclidiana da matriz de covariância. Neste caso também é visível um início maior, dependente dos valores inseridos no filtro, com uma diminuição nos primeiros instantes de estimação e posterior estabilização do valor num patamar mais baixo. O valor em que essa norma se estabiliza é mais alto que para os casos com menor quantidade de parâmetros estimados. Isso é esperado pela colocação de mais uma incerteza no processo.

O ganho de Kalman também tem comportamento similar, já que depende da matriz de covariância. Inicialmente tem uma valores maiores, o que indica que o filtro confia mais nas medidas, e posteriormente esse ganho cai, com o filtro confiando mais no modelo de escoamento.

Os resultados mostram que o filtro é capaz de estimar parâmetros de forma simultânea, apesar de uma variação do parâmetro de rugosidade interna e de coeficiente global de troca térmica, com uma convergência do filtro conforme o esperado. Apesar disso, os resultados obtidos no filtro não foram suficientes para mostrar melhorias que justifiquem a utilização de um modelo mais complexo.

Como forma de avaliação de uma possível melhora dos resultados pode ser utilizado

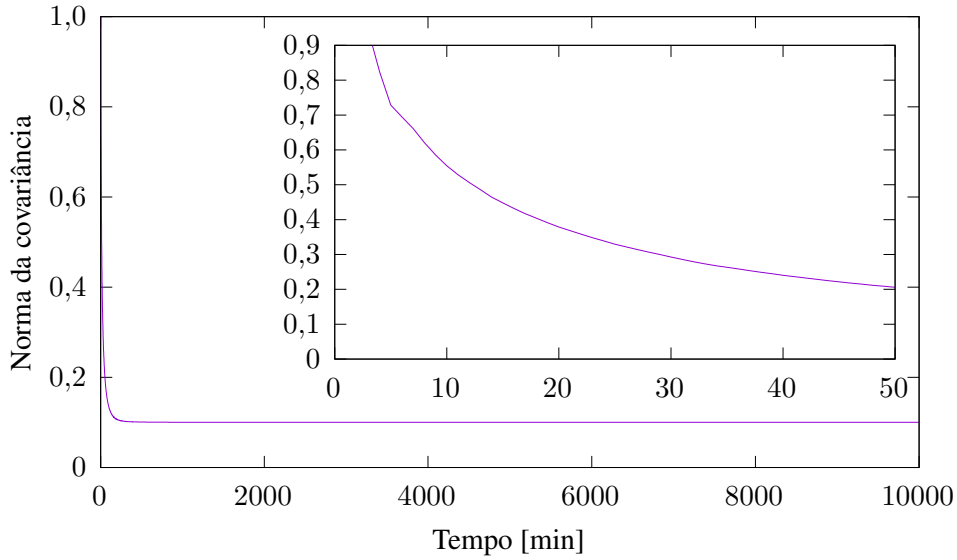


Figura 5.51: Norma da matriz de covariância para caso com estimação em gasoduto com dois parâmetros.

o desvio médio quadrático entre os valores estimados e medidos. Tal comparação é mostrada na Fig. 5.52. É possível verificar que a utilização de equacionamento para conservação de energia não diminui a diferença entre cada uma das medidas e seu valor encontrado pelo modelo. Apenas a estimação de parâmetros tem essa capacidade.

Com base nos resultados é possível concluir que a utilização de equação de conservação de energia traz melhoria para os resultados obtidos para gasodutos em LDA profunda. Isso se dá pela utilização de valores para rugosidade e troca térmica próximos aos valores utilizados na geração dos dados simulados. Mas a estimação de parâmetros parece ser ainda mais eficiente para se obter este comportamento.

5.5.1.8 Comparativo dos perfis estimados para os diferentes parâmetros propostos

Uma primeira avaliação pode ser feita quanto à importância no valor de rugosidade utilizado no modelo de escoamento. Com estes resultados é possível avaliar comparativamente os valores de rugosidade estimada para os três casos apresentados anteriormente, onde este parâmetro foi considerado para estimação.

Como pode ser visto na Fig. 5.53 a utilização da equação da conservação de energia é benéfica para a estimação de estado em gasodutos *offshore* em LDA profunda, pois o valor estimado para rugosidade interna é similar ao original utilizado na geração dos dados.

Porém, com base neste mesmo gráfico, a estimação do parâmetro referente à troca

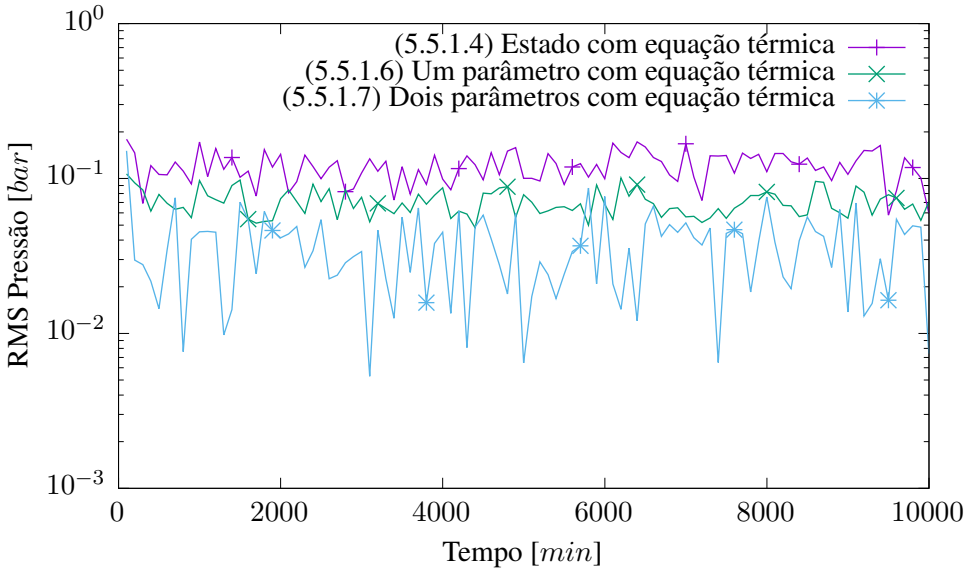


Figura 5.52: Comparativo do desvio médio quadrático entre modelo isotérmico e com cálculo térmico para caso de gasoduto.

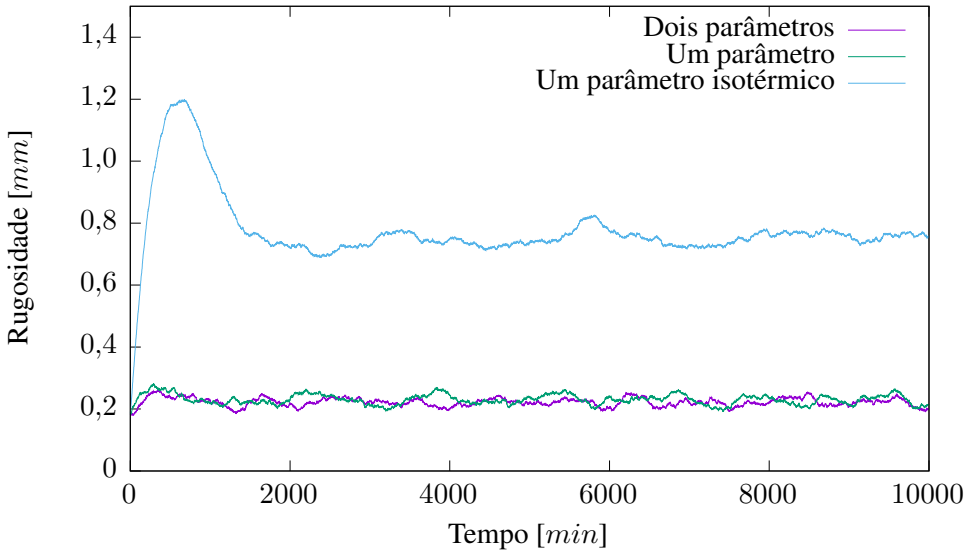


Figura 5.53: Comparativo da rugosidade estimada entre modelo isotérmico e com cálculo térmico para caso de gasoduto.

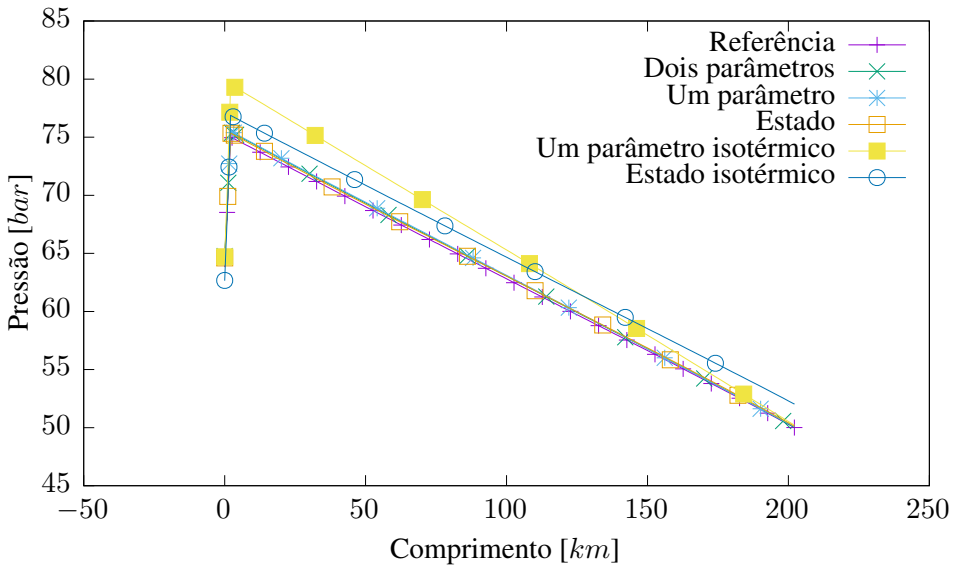


Figura 5.54: Comparativo de diferentes perfis de pressão para diferentes abordagens para caso de gasoduto.

térmica não parece influir no resultado final, uma vez que a rugosidade estimada com ou sem estimação do coeficiente global de troca térmica teve pouca diferença. Isso pode ser devido à utilização de um valor para a troca térmica semelhante ao obtido na simulação com dados simulados.

A Fig. 5.54 mostra os diferentes perfis de pressão calculados em função da abordagem utilizada. As curvas têm formato similar, mas é possível verificar variação principalmente para casos isotérmicos.

Na Fig. 5.55 temos o perfil de temperatura no escoamento a depender do modelo e estado propostos. Aqui as diferenças ficam mais perceptíveis para os casos de modelagem isotérmica, pela grande variação encontrada.

Por fim, com o objetivo de obter um número para esta comparação entre os perfis, foi calculada a diferença quadrática entre os perfis estimados e o original gerado sinteticamente, conceito conhecido na estatística como coeficiente de determinação, dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{5.11}$$

Onde y_i é o valor observado, $\bar{y}$ a média dos valores observados e $\hat{y}_i$ é o valor estimado, sendo que todos os pontos do perfil são considerados de 1 a n tanto para temperatura quanto para pressão. Quanto mais próximo à unidade, melhor a correlação obtida. O resultado é dado na Tab. 5.3.

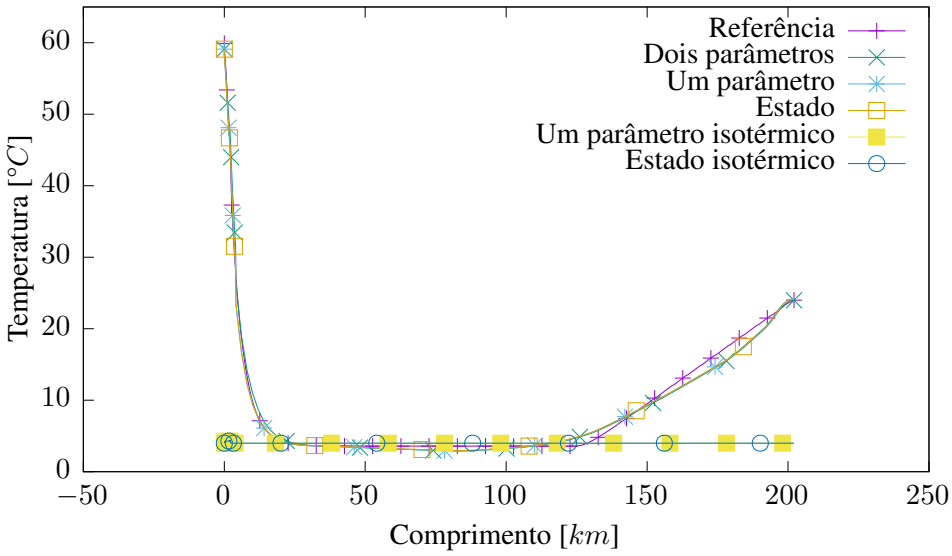


Figura 5.55: Comparativo de diferentes perfis de temperatura para diferentes abordagens para caso de gasoduto.

Tabela 5.3: Diferenças na estimativa dos perfis de pressão e temperatura, para diferentes abordagens na modelagem e estimação de parâmetros.

	R^2 Pressão	R^2 Temperatura
Dois Parâmetros	0,998	0,994
Um Parâmetro	0,997	0,993
Estado	0,996	0,994
Um parâmetro isotérmico	0,954	-
Estado isotérmico	0,854	-

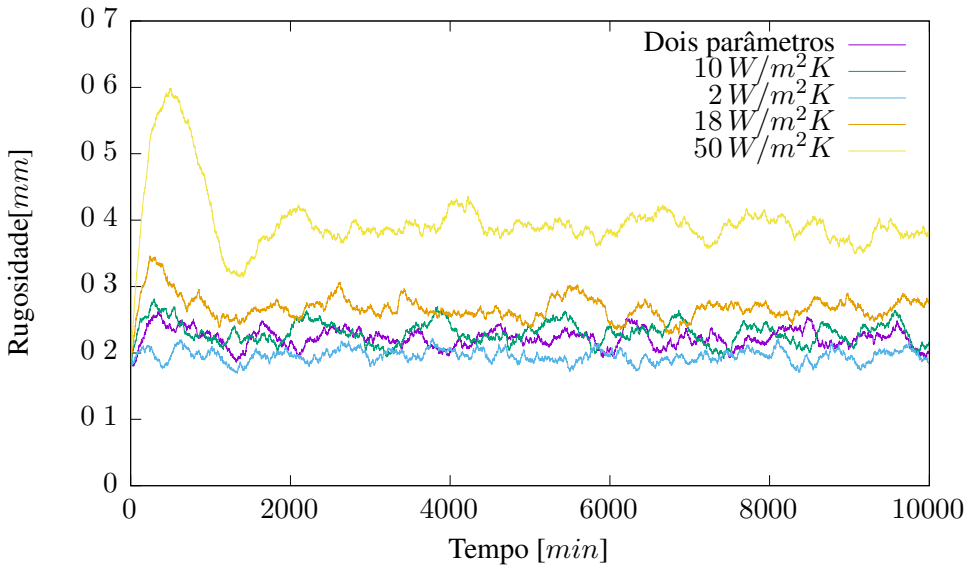


Figura 5.56: Rugosidade estimada para gasodutos a depender do coeficiente global de troca térmica para caso de gasoduto.

Uma conclusão possível é que a resolução de equacionamento térmico e estimação da rugosidade melhoram os resultados obtidos, tanto para pressão quanto para temperatura, mas que, pelos resultados encontrados, a estimação do coeficiente global de troca térmica não traz ganhos perceptíveis.

5.5.1.9 Comparativo para diferentes valores de coeficiente global de troca térmica

Como forma de verificação de um possível ganho da estimação de parâmetro para troca térmica, foram realizadas diferentes avaliações com a variação deste parâmetro, sendo estimado o estado e parâmetro de perda de carga para as mesmas medidas. O resultado dado na Fig. 5.56 mostra a tendência para a rugosidade estimada.

A curva de comparação é colocada como sendo a obtida com a estimação da rugosidade interna e do coeficiente global de troca térmica de forma concomitante. Ela é utilizada desta forma, pois apresenta o perfil de pressão e vazão calculados mais próximos aos dos valores simulados.

Conforme visto nesta Fig. 5.56, o parâmetro de rugosidade varia a depender do coeficiente de troca térmica utilizado, com diferença perceptível entre as diversas curvas. Isso mostra a influência deste parâmetro de troca térmica no perfil de pressão e, por consequência, na rugosidade interna estimada.

Como mais um critério de comparação, são apresentados os perfis de pressão e tempe-

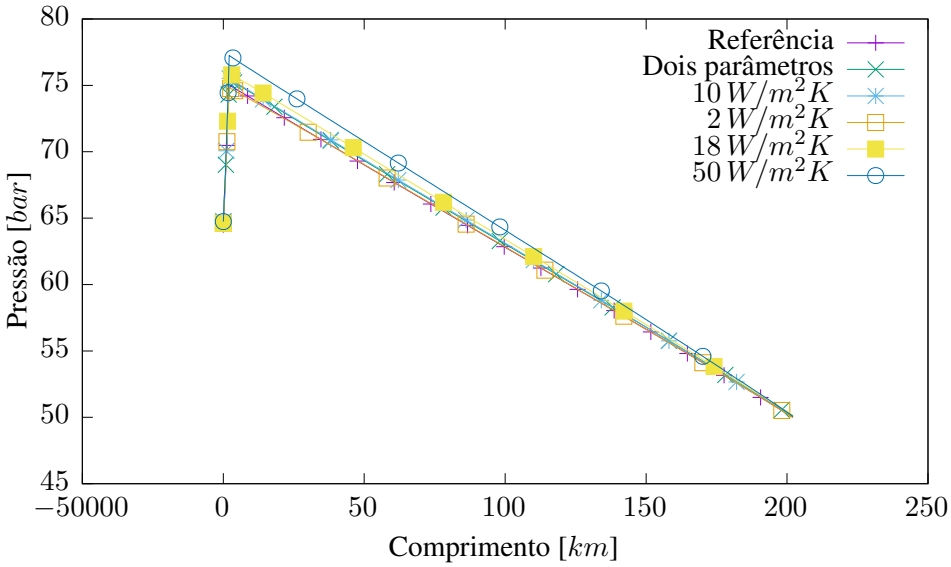


Figura 5.57: Comparativo de diferentes perfis de pressão para diferentes trocas térmicas para caso de gasoduto.

Tabela 5.4: Diferenças na estimativa do perfil de pressão e temperatura com relação a informação original, para diferentes trocas térmicas ou estimação deste parâmetro.

Coeficiente global de troca térmica	R^2 Pressão	R^2 Temperatura
2 $W/m^2\,K$	0,997	0,455
8,8 $W/m^2\,K$	0,998	0,994
10 $W/m^2\,K$	0,997	0,993
18 $W/m^2\,K$	0,993	0,885
50 $W/m^2\,K$	0,962	0,353

ratura obtidos para cada um dos coeficientes globais utilizados, sendo eles comparados ao perfil original gerado sinteticamente. Quanto mais próximo ao perfil original, melhor a estimação obtida.

A Fig. 5.57 mostra o perfil de pressões estimado para cada um dos valores utilizados para o coeficiente global de troca térmica e para o caso com estimação deste parâmetro. A diferença para casos mais extremos é perceptível, mas presente também os para demais casos.

Os perfis de temperatura estimados para cada um dos casos são apresentados na Fig. 5.58. O perfil térmico é, conforme esperado, mais sensível ao valor de troca térmica utilizado que o perfil de pressão, e apresenta grandes diferenças a depender da abordagem utilizada.

Os valores de diferença entre as curvas estimadas e a de origem são dados na Tab. 5.4. Com estes dados é possível verificar que os perfis gerados são melhores para o caso onde existe a estimação dos parâmetros associados a rugosidade e troca térmica.

Finalizando, para casos onde os valores de rugosidade interna e coeficiente global de

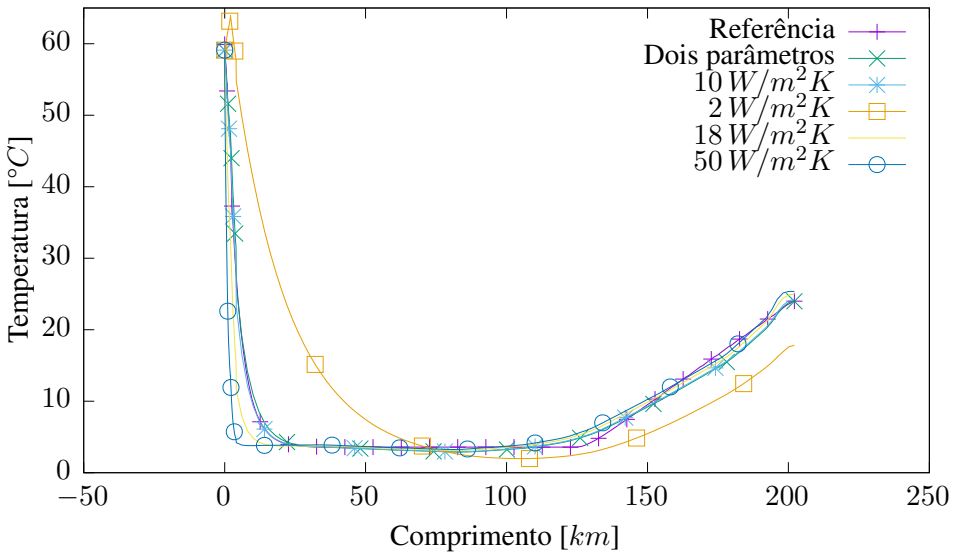


Figura 5.58: Comparativo de diferentes perfis de temperatura para diferentes trocas térmicas para caso de gasoduto.

troca térmica não sejam conhecidos com precisão, é um ganho se estimar estes parâmetros com a utilização do filtro de Kalman.

O parâmetro de rugosidade tem mais influência no resultado obtido para o perfil de pressão, onde uma alteração de 10% leva a um $R^2 = 0{,}9994$ no perfil de pressão e $R^2 = 1$ no perfil de temperatura, sendo que o coeficiente global de troca térmica com uma mesma alteração leva a um $R^2 = 0{,}999996$ no perfil de pressão e $R^2 = 0{,}997$ no perfil de temperatura.

Uma interpretação destes valores indica que a rugosidade interna é perceptível no perfil de pressão, mas não no de temperatura, enquanto que uma variação do coeficiente global de troca térmica é percebida no perfil de temperatura e também no de pressão, mas menos que a rugosidade interna.

Como num sistema real essas informações ou não são conhecidas por não se tratar de requisitos típicos de projeto, ou são conhecidas apenas do ponto de vista micro, não macro, esta estratégia para estimação de tais parâmetros tem aplicação com ganho na precisão dos perfis calculados.

5.5.1.10 Avaliação da covariância

A fim de se avaliar a robustez da proposta e uma eventual atuação imprecisa do filtro, foi proposta modificação periódica na matriz de covariância. Sabidamente, quando a matriz de covariância tem seus valores baixos, o filtro trabalha com grande confiança nos resultados do modelo de dinâmica do sistema. Desta forma, isso faz com que após um período inicial de

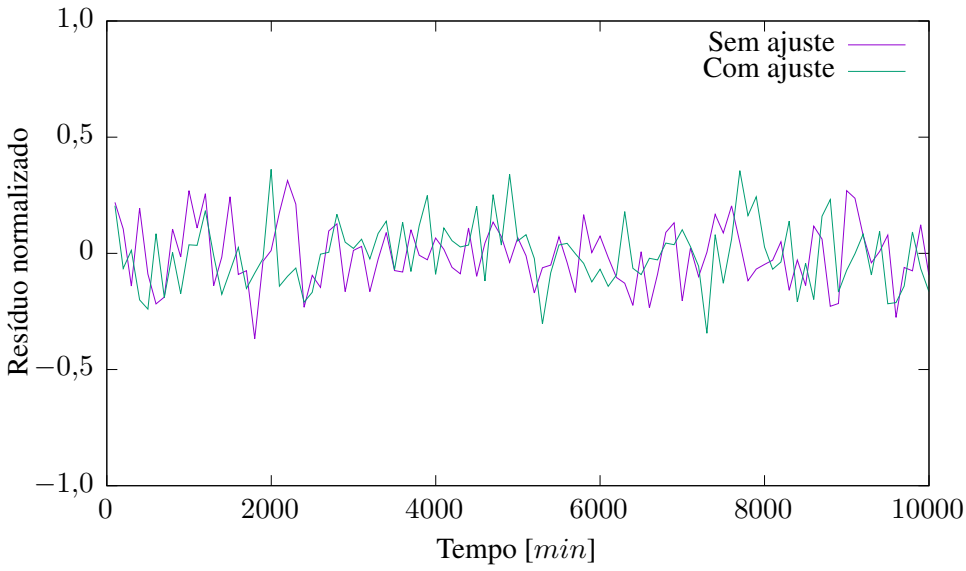


Figura 5.59: Resíduo normalizado para caso de gasoduto.

aprendizagem, o filtro passe a desconsiderar variações bruscas nas medidas, entendendo que se tratam de ruído e não informação correta.

O caso a ser avaliado é o de gasoduto *offshore*, com estimação de estado, rugosidade interna e coeficiente global de troca térmica, apresentado anteriormente. Após alguns minutos de atuação do filtro, a covariância tem uma queda como mostrado na Fig. 5.51. A proposta consiste em reinicializar a matriz para metade do valor inicial sempre que sua norma euclidiana da covariância se tornar menor que 10^{-6}.

O resíduo obtido com esta modificação pode ser visto na Fig. 5.59, e é comparado ao caso sem a modificação manual na matriz de covariância. Os resultados não mostram diferença perceptível com esta atuação externa no filtro.

A evolução temporal comparativa entre as normas das matrizes de covariância com e sem a perturbação exógena é mostrada na Fig. 5.60. Aqui é possível ver que o valor com que as matrizes são inicializadas é alto, e cai com o tempo de forma assintótica. No caso proposto, após este valor se tornar baixo, a matriz é inicializada novamente, com 50% do valor inicial, e a estimação continua.

Continuando, a rugosidade interna estimada é apresentada na Fig. 5.61, assim como a estimada sem a modificação na matriz de covariância. Os resultados são similares, não sendo possível apontar algum ganho com esta reinicialização.

O segundo parâmetro estimado, ou coeficiente global de troca térmica, é apresentado na Fig. 5.62, assim como este parâmetro estimado sem a modificação da matriz de covariância.

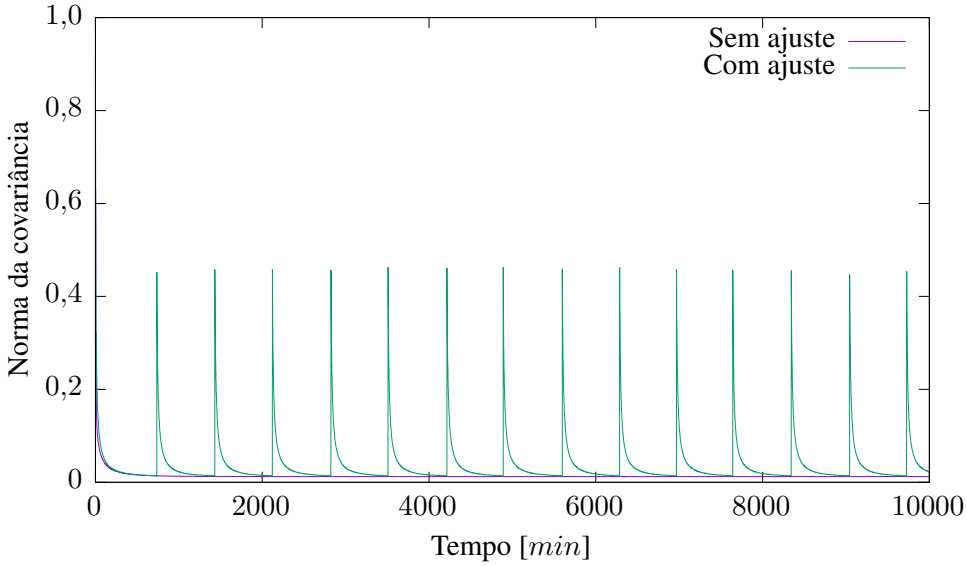


Figura 5.60: Norma euclidiana da matriz de covariância para caso de gasoduto e modificação da matriz de covariância.

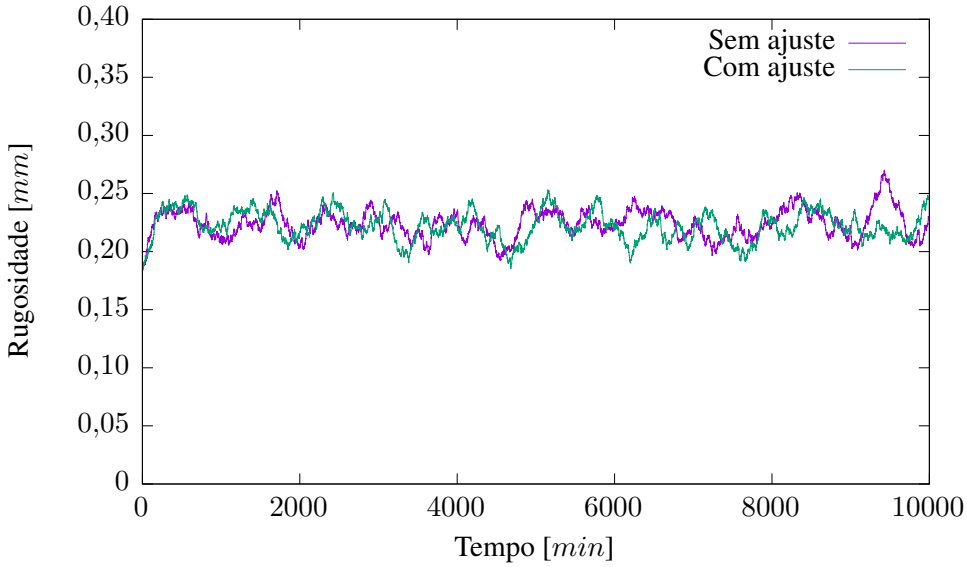


Figura 5.61: Rugosidades internas estimadas para diferentes abordagens na matriz de covariância.

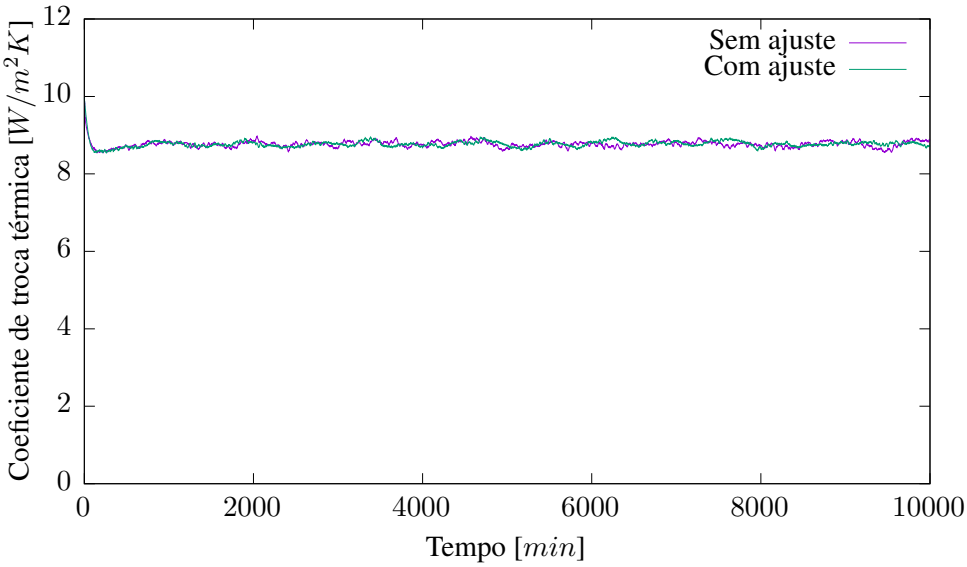


Figura 5.62: Coeficientes globais de troca térmica estimados para diferentes abordagens na matriz de covariância.

Neste caso também não é possível se verificar ganho com a proposta de reinicialização.

Após analisar estes resultados, é possível afirmar que não houve ganho na estimação com a modificação da matriz de covariância para o caso de gasoduto sem variação de vazão. Isso indica um funcionamento adequado do filtro de Kalman, mesmo com o aumento da confiança do modelo pelo filtro.

5.5.1.11 Conclusões para caso do gasoduto

Para os resultados apresentados, é possível verificar que a utilização da equação da conservação de energia traz uma maior precisão para a estimação de estado em problemas de escoamento de gás em gasoduto *offshore* profundo, quando comparada a abordagem tradicional baseada em modelos isotérmicos utilizada para escoamento *onshore*.

Para problemas em regime permanente os valores obtidos para pontos com medidas disponíveis para comparação apresentam precisão similar a abordagem isotérmica quando utilizada a estimação de estado com ou sem parâmetros também a serem estimados. Entretanto, a comparação dos perfis de pressão e temperatura obtidos com o perfil original mostram benefícios com a estimação dos parâmetros.

Desta forma, parece não ser possível verificar a precisão dos perfis de temperatura e pressão gerados através da estimação de estado quando o escoamento é estável e com a utilização do resíduo apenas, pois o filtro é capaz de tais ajustes independente da abordagem utilizada na estimação.

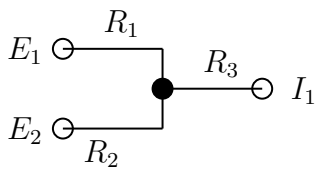


Figura 5.63: Desenho esquemático da malha em Y.

5.5.2 Malha em Y

Outra avaliação foi realizada com a utilização de malha de gasodutos fictícia construída com dados simulados. Neste modelo foi considerada também a variação das vazões de entrada, saída, composição das correntes de gás e uma eventual variação da pressão média na malha.

Neste caso a complexidade é significativamente maior que na subseção anterior, com construção similar a uma malha de gasodutos, não apenas um gasoduto. O objetivo é verificar a funcionalidade e melhoria dos resultados para uma malha mais complexa e com transientes significativos nas condições de contorno.

A geometria da malha é composta por três dutos unidos num equipamento submarino, sendo encontrados duas UEPs exportadoras, E_1 e E_2 e uma UTG importadora, I_1 nas extremidades dos dutos. Esta configuração pode ser vista na Fig. 5.63. A geração de dados simulados segue o mesmo procedimento proposto na Seção 5.4

A geometria proposta para esta malha também é de LDA profunda, e existe diferença de composição entre as diferentes correntes exportadas, que levam a uma variação na composição do terceiro duto pela variação das vazões praticadas. Com o objetivo de manter o perfil de pressão na malha oscilando em torno de um valor médio, sem tendência definida, é proposta a vazão definida na Fig. 5.64.

Como as condições de contorno propostas variam no tempo, são apresentadas tendências de pressão e temperatura para E_1, E_2 e I_1. A proposta é colocada nas vazões de entrada e saída de gás na malha, mostrada na Fig. 5.64. Existe um patamar alto em E_2 seguido de um patamar baixo em E_1, e um valor quase constante para I_1.

A geometria de escoamento é mostrada na Fig. 5.65. Os dutos R_1 e R_2 têm a mesma geometria e se sobrepõem. Os *risers* de exportação são verticais até o fundo do mar, e o gasoduto R_3 perde profundidade e chega à costa na UTG, que importa o gás.

Como consequência para este comportamento na vazão temos o perfil de pressão variando no tempo. Com o pico de vazão em E_2, a pressão neste ponto sobe rapidamente, e a malha toda é pressurizada, refletindo em I_1. Algum tempo depois, com o vale em E_1 a pressão neste

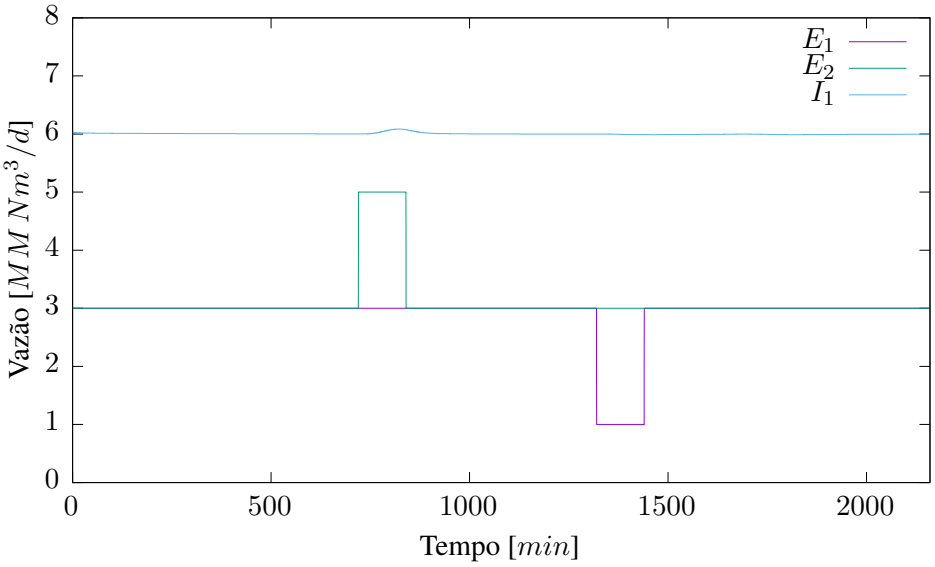


Figura 5.64: Valores de vazão nas extremidades para malha em Y.

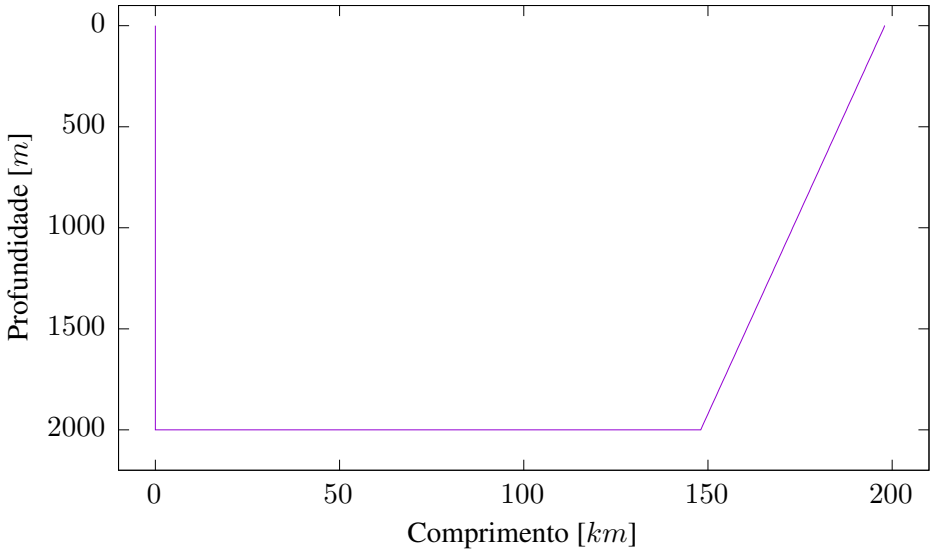


Figura 5.65: Geometria da malha em Y.

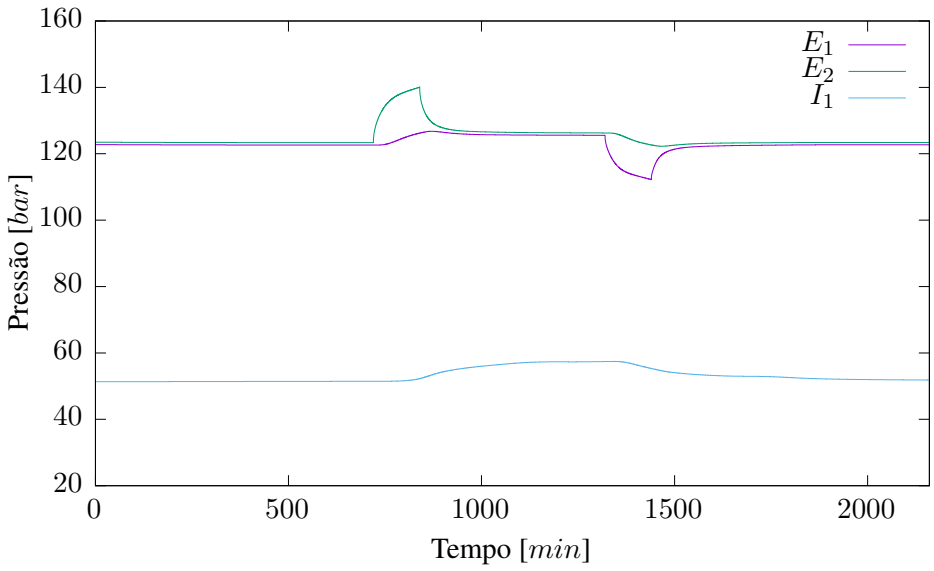


Figura 5.66: Valores de Pressão para malha em Y.

Tabela 5.5: Composição das correntes para malha em Y.

	C1	C2	C3
E_1	0,90	0,08	0,02
E_2	0,92	0,07	0,01

ponto tem queda perceptível, e a pressão média no gasoduto volta a cair, com I_1 retornando ao patamar inicial, como mostrado na Fig. 5.66.

Também como consequência da variação das vazões e das pressões o perfil de temperatura no escoamento também é alterado. A principal variação é percebida na temperatura em I_1, que aumenta nos momentos de maior vazão importada, conforme mostra a Fig. 5.67.

Estas condições são impostas de forma cíclica, e o sistema oscila indefinidamente conforme estas curvas. Para uso com estimação nos próximos itens estas informações ainda são modificadas com ruído branco de magnitude definida de forma similar à apresentada na Subseção 5.5.1.

Por fim, o coeficiente global de troca térmica utilizado na geração dos dados simulados foi de $30\,W/m^2K$, similar a valores de dutos rígidos reais, e a composição das corrente é dada na Tab. 5.5, sendo um gás leve sem a possibilidade de formação de condensado.

5.5.2.1 Estimação da rugosidade

Visto que, pela Subseção 5.5.1, a utilização da equação de conservação de energia melhora os perfis de pressão e temperatura obtidos, e que a estimação de parâmetros também

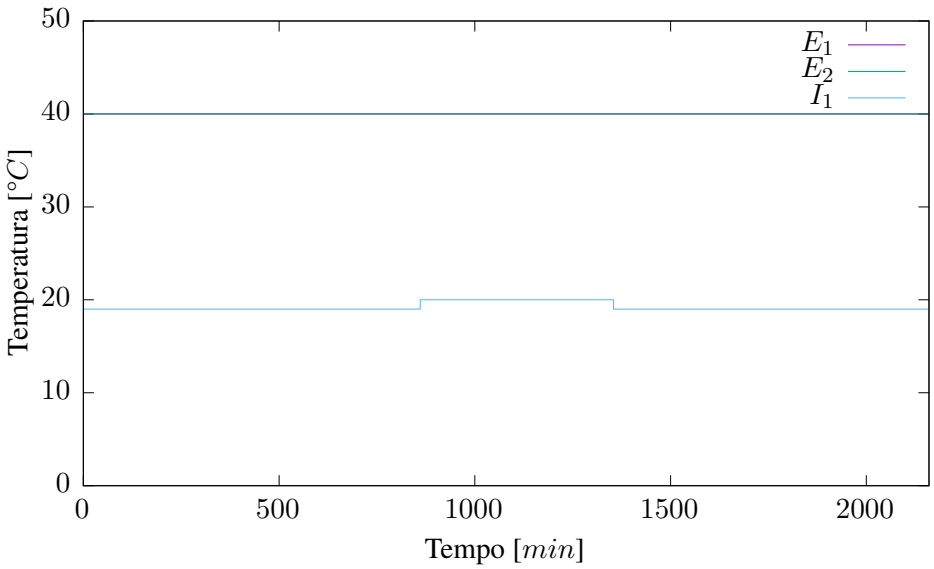


Figura 5.67: Valores de temperatura para malha em Y.

tem este efeito, um primeiro caso avaliado consiste da estimação do estado em conjunto com parâmetro de rugosidade interna. Para tanto, o estado proposto é dado por:

$$v = [\ldots\ P_i\ T_i\ \dot{m}_i\ \ldots] \tag{5.12}$$

Este vetor é composto pelas variáveis de pressão, temperatura e vazão para cada um dos três gasodutos que compõem a malha. Como a geometria aqui é mais complexa, são mais variáveis a serem consideradas, chegando a 300. Como temos também a estimação de parâmetro de rugosidade, temos que

$$p = [\varepsilon] \tag{5.13}$$

Com o estado sendo descrito conforme Eq. 5.2.

O modelo de evolução utilizado é o descrito no Capítulo 3. Assim, para o uso do filtro de Kalman, se faz necessário o uso de um vetor de observação, composto pelas medidas disponíveis nas extremidades dos dutos, num total de nove medidas, dadas por:

$$z = [\, P_{E_1}\, T_{E_1}\, \dot{m}_{E_1}\, P_{E_2}\, T_{E_2}\, \dot{m}_{E_2}\, P_{S_1}\, T_{S_1}\, \dot{m}_{S_1}\,]^T \tag{5.14}$$

As matrizes de covariância são definidas conforme Lorentzen, Nævdal e Lage (2003), já sendo descritas na Subseção 5.5.1. O resíduo de estimação para esta simulação reproduz o transiente imposto na entrada, conforme mostrado na Fig. 5.68.

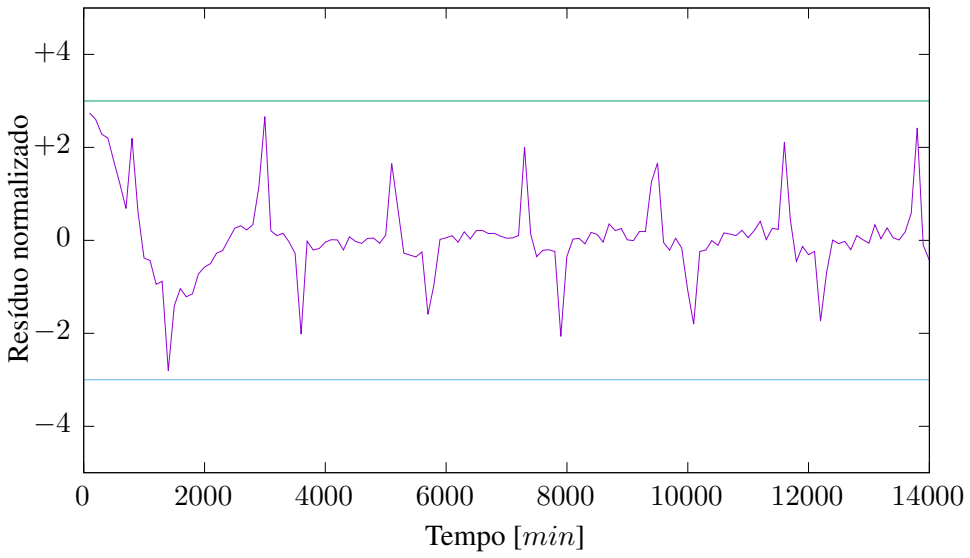


Figura 5.68: Resíduo para malha de gasoduto com estimação de um parâmetro.

Como forma de verificação, temos o histograma do ruído na pressão mostrado na Fig. 5.69. Pode ser verificado que, mesmo para malha de escoamento de gás composta por três gasodutos, o filtro é capaz de ajustar as diferenças entre medidas e valores simulados de forma a tornar o erro médio nulo.

O histograma do resíduo também mostra um formato diferente do que vinha sendo encontrado até então. Isto se deve ao transiente inserido na vazão exportada pelas UEPs. Como a rugosidade tem efeitos não lineares com a variação da vazão na perda de carga do escoamento, uma estimação deste parâmetro é visível no histograma do resíduo quando da existência de transientes no escoamento.

A rugosidade estimada é dada na Fig. 5.70. É visível o comportamento mais suave da estimação do parâmetro no tempo quando comparado ao caso do gasoduto. Isso se deve às diferenças na matriz de covariância de erro do modelo, que é de difícil ajuste por não ser diretamente ligada a comportamentos físicos, e foram usados valores diferentes para o caso de gasoduto e malha em Y.

5.5.2.2 Estimação da rugosidade e troca térmica

A proposta após o caso anterior é incluir também a estimação de parâmetro do coeficiente global de troca térmica. Neste caso, com a mesma abordagem proposta pela Eq. 5.2 os parâmetros a serem estimados são dados por:

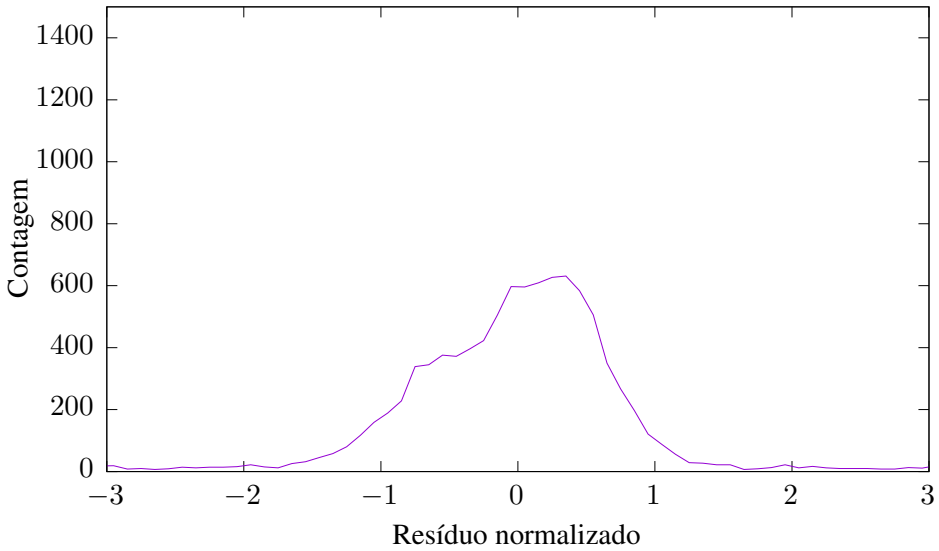


Figura 5.69: Histograma do resíduo para modelo térmico e estimação de um parâmetros.

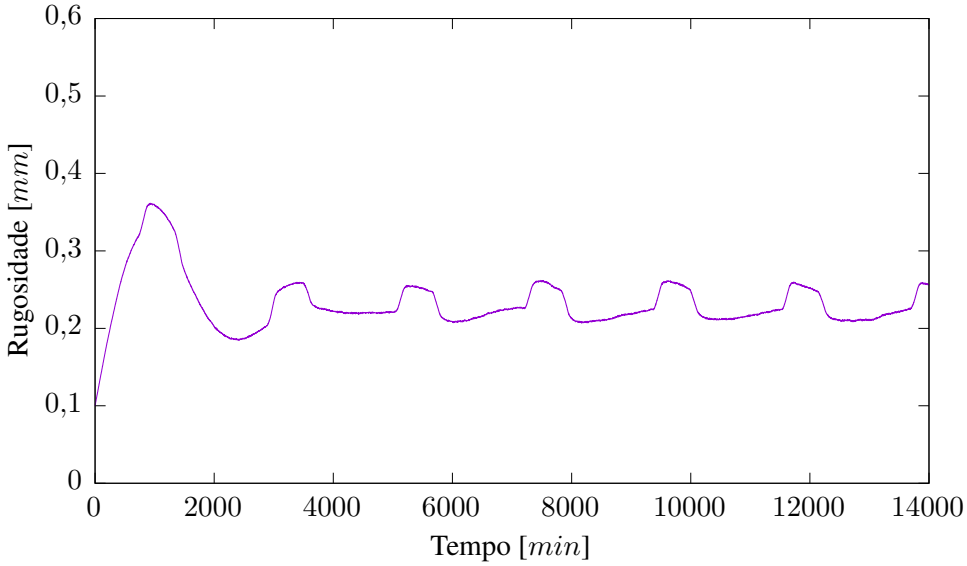


Figura 5.70: Rugosidade estimada para malha de gasoduto com estimação de um parâmetro.

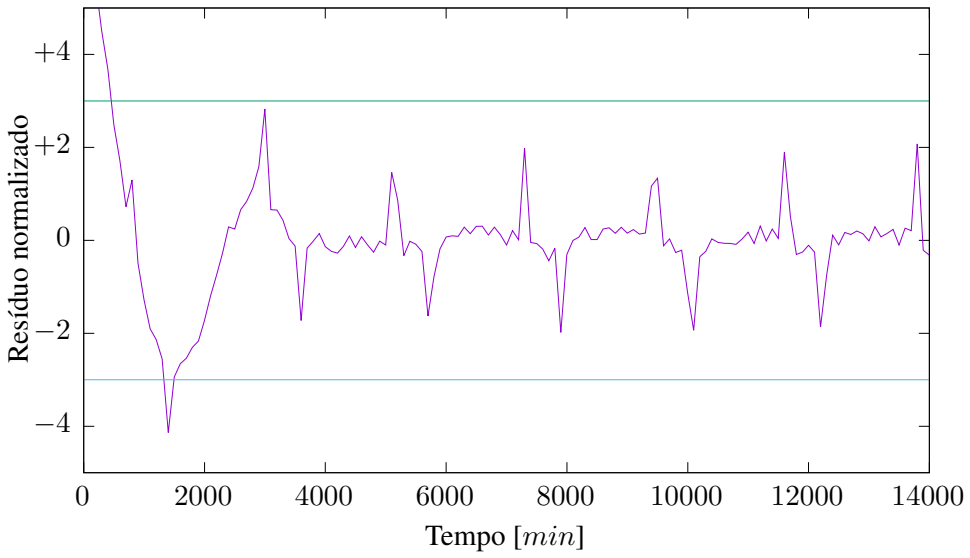


Figura 5.71: Resíduo para malha de gasoduto com estimação de dois parâmetros.

$$p = [\ \varepsilon\ U\ ] \tag{5.15}$$

Como resultado temos o resíduo mostrado na Fig. 5.71. Os resultados são bastante similares aos do caso anterior, onde o ruído tem sua média levada a zero pela atuação do filtro de Kalman, com um desvio padrão inferior a 3σ, caracterizando a convergência do procedimento de estimação.

Mais uma vez o ruído na pressão é mostrado em forma de histograma, agora na Fig. 5.72. Os resultados mostram media próxima a zero e são muito similares aos do caso anterior, mas agora com um formato mais parecido com o esperado, uma curva normal padrão.

O parâmetro estimado de rugosidade para o caso com estimação de dois parâmetros é mostrado na Fig. 5.73. Como foram usadas matrizes de ruído e incerteza iguais às do caso anterior, o resultado é também similar.

O segundo parâmetro estimado é dado na Fig. 5.74, sendo o coeficiente global de troca térmica. Aqui o comportamento é suave também, de maneira semelhante ao caso em gasoduto, e o coeficiente global parece ficar próximo de $30\,W/m^2K$, valor utilizado na geração dos dados simulados.

Os resultados mostram comportamento similar entre as duas abordagens, sendo necessário mais aprofundamento para uma conclusão mais adequada. Tal avaliação comparativa será trabalhada a seguir, explicitando melhorias conseguidas.

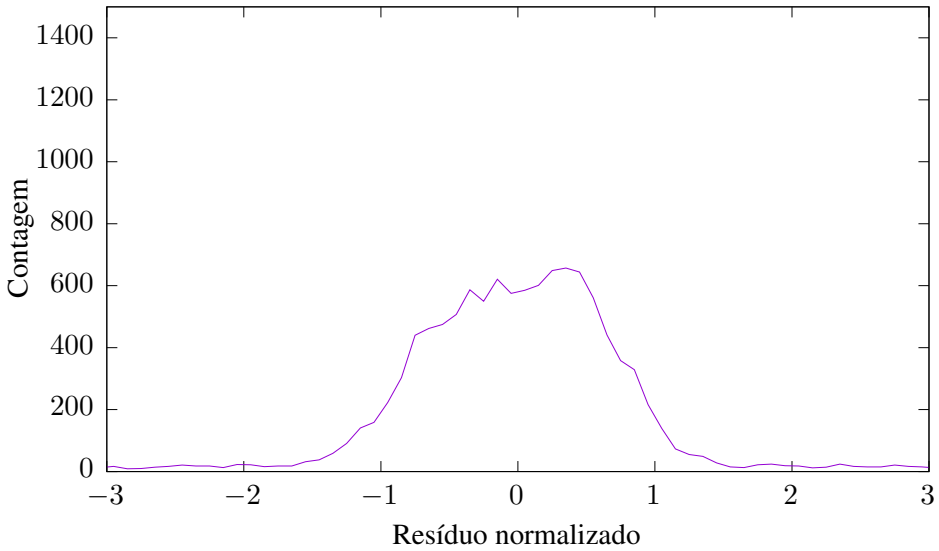


Figura 5.72: Histograma do resíduo para modelo térmico e estimação de dois parâmetros.

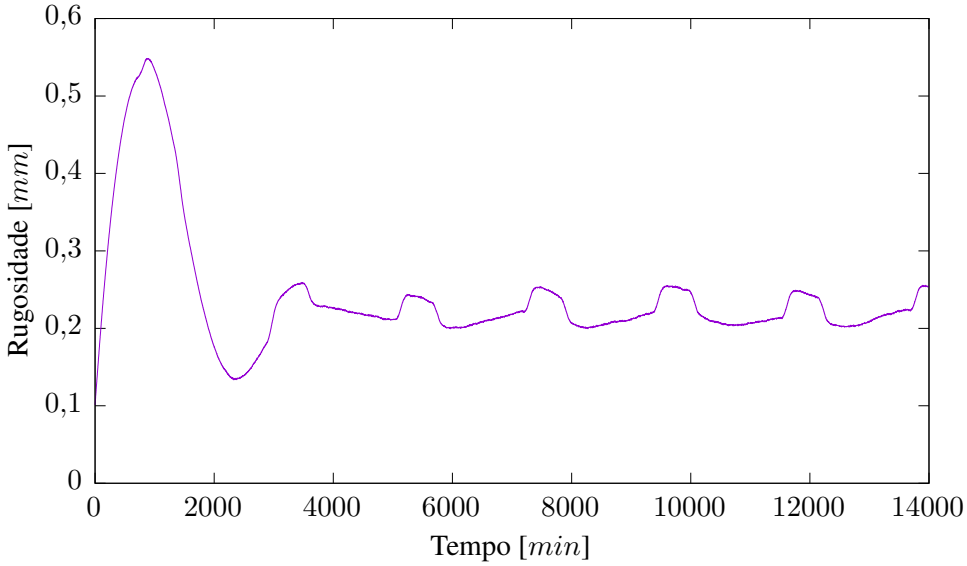


Figura 5.73: Rugosidade estimada para malha de gasoduto com estimação de dois parâmetros.

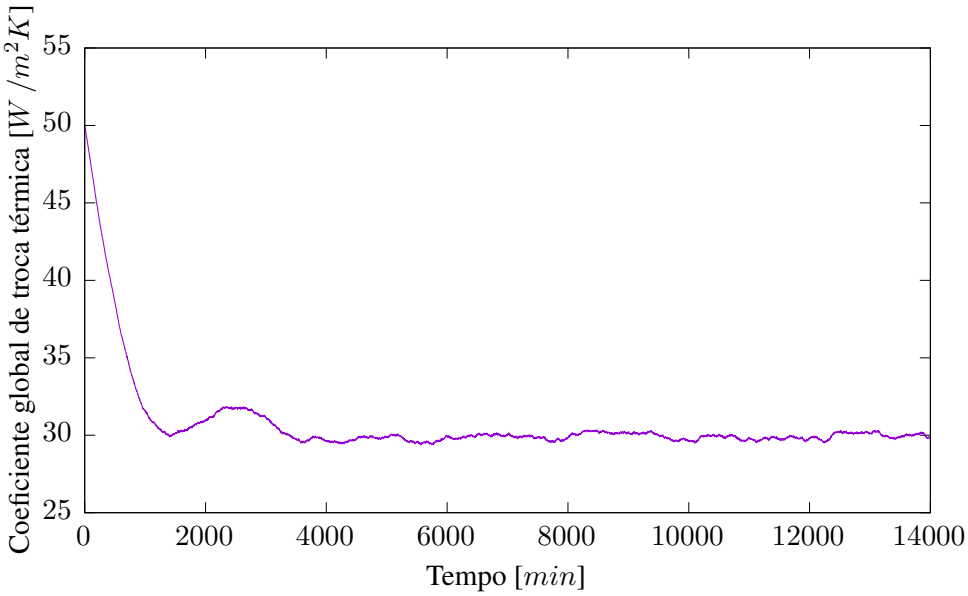


Figura 5.74: Coeficiente global de troca térmica estimado para malha em Y com estimação de dois parâmetros.

5.5.2.3 Comparativo entre estimação de um ou dois parâmetros com transientes

A fim de se verificar alguma melhora nos resultados com a proposta de estimação de dois parâmetros, é apresentado na Fig. 5.75 o ruído na pressão para ambos os casos. Não é perceptível diferença entre os resultados, apesar de a estimação de dois parâmetros simultaneamente ser mais complexa que a de um parâmetro.

Por fim, são apresentados os histogramas dos ruídos na pressão para ambos os casos. Estes são bastante similares, sendo mostrados na Fig. 5.76, não sendo possível definir qual abordagem se mostrou mais interessante na geração dos perfis de escoamento.

A partir do histograma acima, também é possível verificar que o desvio padrão para o caso com estimação de um parâmetro ($1{,}7bar$) é superior ao do caso com estimação de dois parâmetros ($1{,}5bar$), enquanto que apenas a estimação de estado apresenta desvio padrão de $1{,}9bar$. Além disso, o histograma obtido para a estimação com dois parâmetros é mais próximo a uma gaussiana, o que indica que o modelo de escoamento foi mais preciso em momentos de variação da vazão quando a troca térmica estava mais bem estimada.

Isso significa que a melhor estimação dos valores de rugosidade interna e coeficiente global de troca térmica trazem melhor ajuste do modelo para efeitos transientes em malha mais complexas que um gasoduto apenas.

Além dessa percepção diretamente dos resultados do filtro, os perfis também são mais

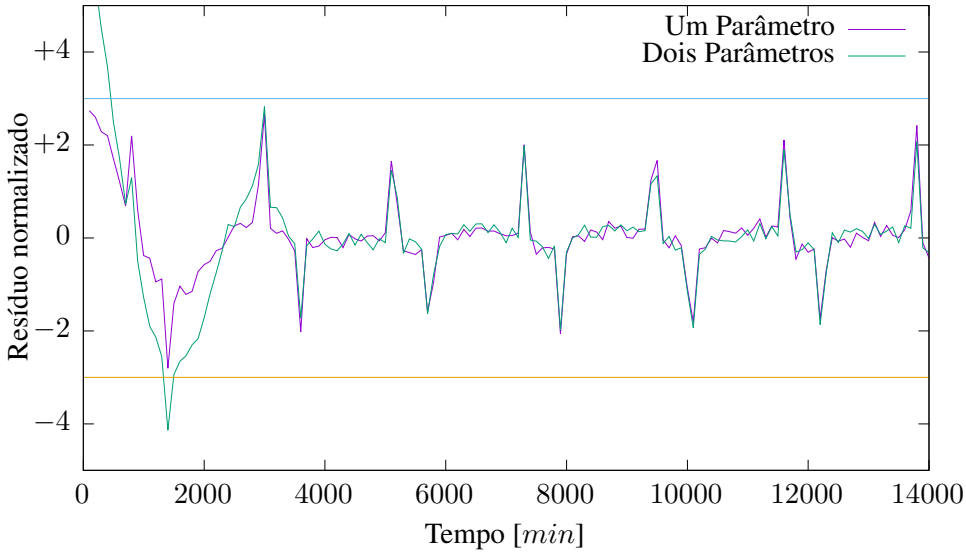


Figura 5.75: Resíduo de pressão numa malha em Y, a depender da quantidade de parâmetros estimados.

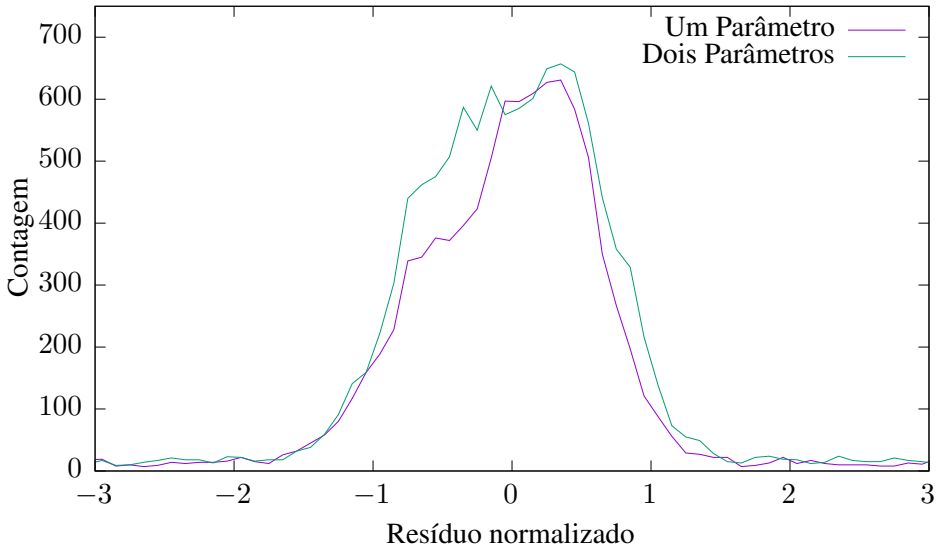


Figura 5.76: Histograma do resíduo na pressão para modelo térmico e estimação de dois parâmetros.

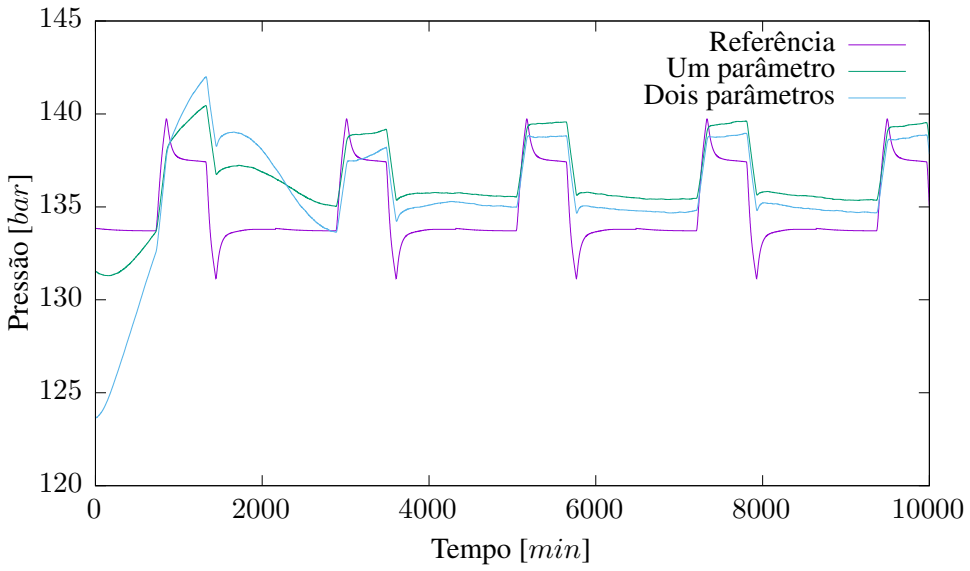


Figura 5.77: Pressão estimada no PLEM para malha em Y.

bem calculados. Para mostrar a melhora do resultado no segundo caso é apresentada tendência de pressão e de temperatura para o PLEM submarino, sendo que estas informações não foram utilizadas anteriormente para uso no filtro de Kalman. Não são usados gráficos de perfis pelo comportamento transiente proposto.

A Fig. 5.77 mostra a tendência da pressão do gás escoado no PLEM obtida nos resultados simulados, que podem ser considerados como uma referência, e nos dois casos propostos de estimação de um ou dois parâmetros.

O resultado mostra que existe melhora dos resultados dos perfis de pressão e temperatura estimados quando da estimação de dois parâmetros, mesmo que isso não seja visível diretamente nos resultados do filtro em comparação com as medidas. Em termos gerais, a estimação dos dois parâmetros de forma simultânea teve como melhoria o perfil de temperaturas estimado, o que tem influência no perfil de pressões estimado.

A temperatura neste mesmo ponto do escoamento é mostrada na Fig. 5.78. Da mesma forma que para o caso de gasoduto, a estimação de dois parâmetros leva a uma melhor estimação do perfil de temperatura no escoamento.

Uma conclusão obtida é que a estimação de rugosidade e de coeficiente global de troca térmica melhora os perfis de pressão e temperatura estimados quando comparados a estimação de estado simples ou estimação de apenas um parâmetro com o estado.

O perfil de pressão e temperatura gerado para o escoamento, de forma similar ao verificado no caso de gasoduto, também é mais próximo ao obtido no caso de estimação de es-

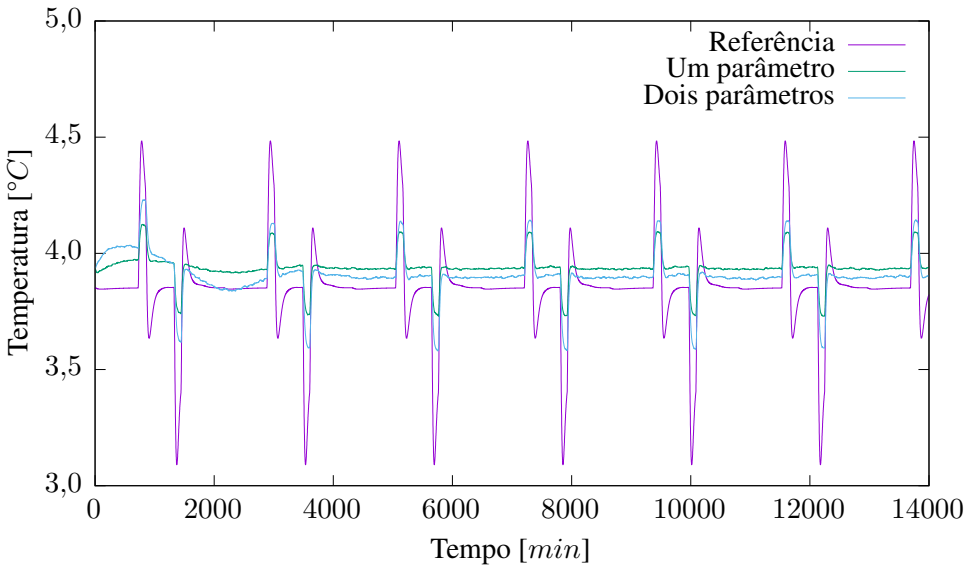


Figura 5.78: Temperatura estimada no PLEM para malha em Y.

tado com dois parâmetros. Ademais, a estimação dos parâmetros de rugosidade interna e de coeficiente global de troca térmica melhoraram o comportamento dos resultados para malhas complexas com efeitos transientes.

5.5.3 Gasoduto *onshore*

Para comparação com gasodutos *onshore* foi realizada avaliação similar, a fim de explicitar os ganhos conseguidos através da estimação de parâmetro relativo a troca térmica em gasodutos *offshore* em LDA profunda e diferenças para problemas *onshore*, e justificar o uso de tal abordagem neste cenário.

Para um duto de $125\,km$ de comprimento e diâmetro interno de $16\,in$, foi feita simulação em OLGA 7.3.2 e os valores obtidos foram usados, após modificação com ruído branco, como medidas para o problema de estimação de estado. A rugosidade interna utilizada foi de $0{,}183\,in$ e o coeficiente global de troca térmica foi usado em $10\,W/m^2K$. Com o modelo construído foi feita a estimação do estado com abordagem isotérmica e estimação da rugosidade, e com a utilização da conservação de energia foi feita a estimação de estado com um ou dois parâmetros.

Os resultados para os parâmetros estimados são dada na Fig. 5.79. O comportamento geral da estimação da rugosidade interna é similar para os três casos, muito embora o valor do parâmetro estimado seja diferente entre eles. No caso com estimação de dois parâmetros, o coeficiente global de troca térmica é estimado adequadamente, atingindo um valor de $9\,W/m^2K$, muito próximo ao de $10\,W/m^2K$ utilizado na geração dos dados simulados.

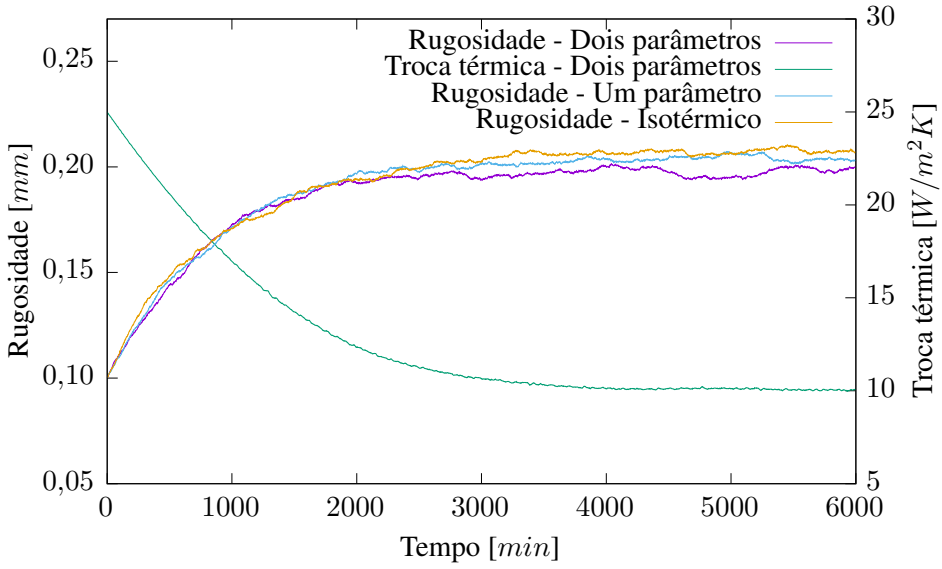


Figura 5.79: Comportamento dos parâmetros estimados para gasoduto *onshore*.

Porém, quando avaliado o perfil de pressão no gasoduto, as três soluções apresentam um perfil muito similar. A Fig. 5.80 mostra a pressão calculada no meio do gasoduto. Não existe diferença perceptível entre os resultados das três abordagens diferentes. Isso indica que as soluções encontradas são equivalentes para cenários *onshore*, do ponto de vista do perfil de pressão gerado.

Entretanto, para os perfis de temperatura a abordagem tem, obviamente, forte influência. Porém, nos casos onde as informações de temperatura não são consideradas, o filtro obtém uma rugosidade equivalente de forma a compensar este efeito, minimizando possíveis erros de cálculo de inventário no gasoduto ou tempo de trânsito das moléculas.

O histograma do resíduo das pressões é mostrado na Fig. 5.81. Aqui também não é possível verificar diferenças entre as abordagens, onde todas elas apresentam desvio padrão de $0{,}1\,bar$, similar ao caso de gasoduto *offshore*. O filtro parece estimar estado com similaridade aos valores observados independentemente do modelo de escoamento usado e da quantidade de parâmetros.

Com isso é possível se afirmar que problemas de escoamento em gasodutos *onshore* não tem efeitos significativos do perfil de temperatura estimado no de pressão. Assim parece ser razoável o uso de aproximações isotérmicas nestes casos, quando o perfil de pressão for o foco.

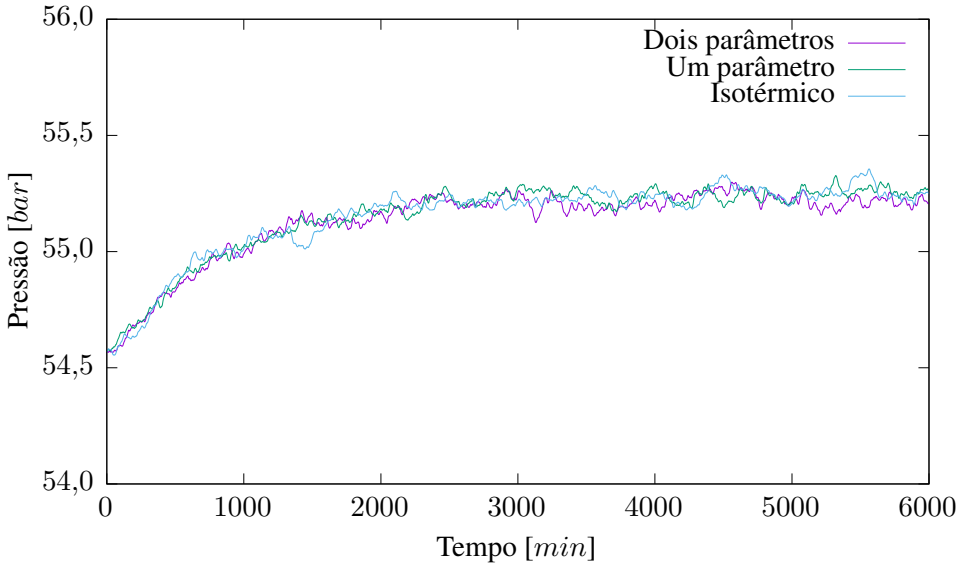


Figura 5.80: Comparativo de pressão intermediaria estimada para cada uma das abordagens num gasoduto *onshore*.

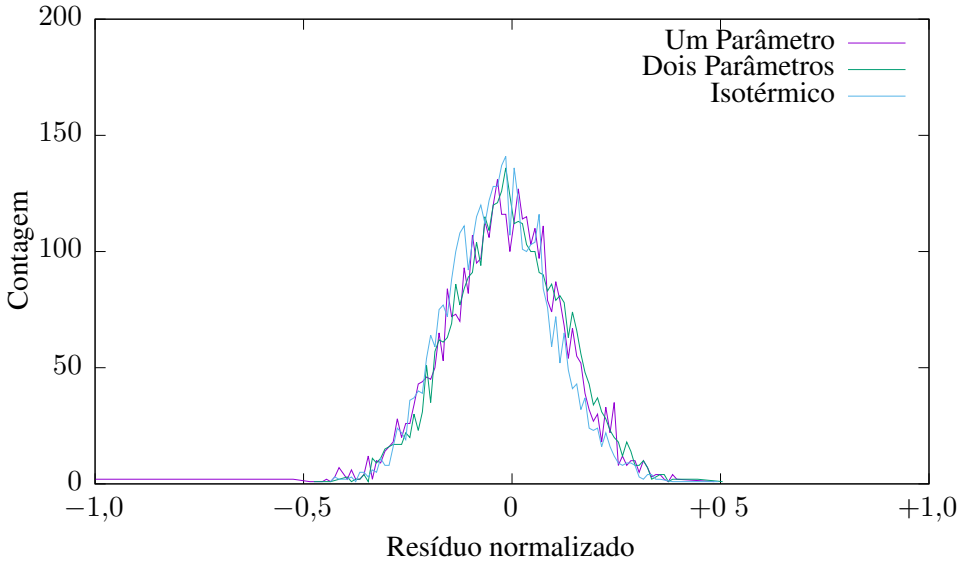


Figura 5.81: Histograma do resíduo para caso de gasoduto *onshore*.

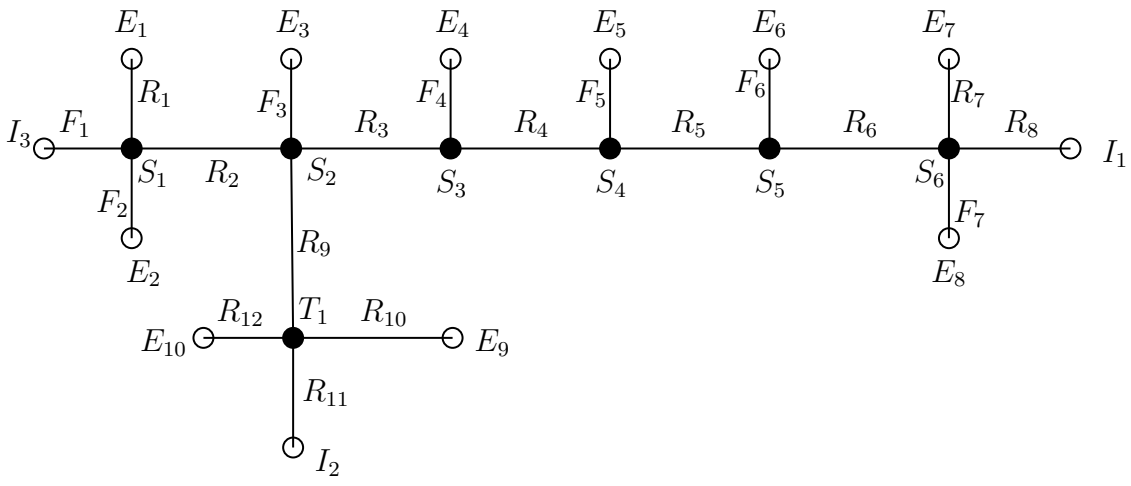


Figura 5.82: Desenho esquemático da malha com dados de campo.

5.5.4 Dados de campo

Com o objetivo de verificar a funcionalidade do conceito para um sistema real foi proposto o uso em malha real operando, como forma de validação para trabalho com dados de campo. O caso trabalhado está em operação na bacia de Santos, no Brasil.

O desenho esquemático desta malha é mostrado na Fig. 5.82, mostrando duas UTGs, I_1 e I_2, uma unidade importadora I_3, dez unidades exportadoras E_i , além de diferentes dutos rígidos R_i e flexíveis F_i, interligados entre si por equipamentos submarinos do tipo PLEM ou ILT S_i ou em superfície T_i.

Quase não existem controles de vazão nos dutos e equipamentos submarinos, apenas nas unidades exportadoras e importadoras. A exceção se encontra nos trechos R_9 e R_{10}, onde são utilizados *chokes* para controle da vazão na extremidade do lado de T_1. Por questões operacionais, atualmente existe isolamento hidráulico no trecho R_3, no lado de S_2.

As informações conhecidas de campo são a pressão, a temperatura e a vazão importada e exportada, assim como estas mesmas medidas nos dutos R_9 e R_{10}, do lado de T_1. A informação primária utilizada para operação deste sistema é a vazão, sendo demais informações consequência do histórico de aplicação.

Esta característica, de controle da vazão praticada é devida à construção do sistema de processamento das UEPs ou UTGs, onde o gás pode ser desviado para outros destinos que não o gasoduto ou diferentes plantas são selecionadas para a operação. A pressão, que tem um comportamento mais suave que a vazão, é gerenciada com a atuação destes equipamentos.

Foi adotado um período de 30 dias para teste de funcionamento do filtro. São consi-

Tabela 5.6: Composição da malha para caso com dados de campo.

Duto	Comprimento $[m]$	Diâmetro $[m]$
R_1	18 500	0,4
R_2	54 500	0,4
R_3	5 000	0,4
R_4	5 000	0,4
R_5	5 000	0,4
R_6	10 000	0,4
R_7	10 000	0,4
R_8	378 000	0,57
R_9	217 000	0,4
R_{10}	175 000	0,4
R_{11}	145 000	0,8
R_{12}	600	0,4
F_1	34 000	0,23
F_2	7 400	0,23
F_3	6 500	0,23
F_4	7 000	0,23
F_5	7 000	0,23
F_6	6 000	0,23
F_7	15 500	0,23

deradas medidas de pressão, vazão e temperatura, quando disponíveis, nos pontos onde forem disponíveis. São estimados estado e coeficiente global de troca térmica para dutos rígidos e flexíveis, de três rugosidades internas, um para o duto R_9, outra para o R_8 e uma para o duto R_{11}.

A Fig. 5.83 mostra a tendência das vazões praticadas nas diferentes extremidades desta malha de gasodutos. Os valores mais altos se encontram nas UTGs I_1 e I_2, com valores menores nas UEPs exportadoras. São visíveis variações rápidas do valor trabalhado, por ser dependente de condição de equipamentos.

As pressões são dadas na Fig. 5.84, e têm comportamento mais suave que o da vazão, dependendo principalmente da vazão instantânea no ponto e da pressurização media do duto. Diferente das vazões, aqui as UTGs I_1 e I_2 são os pontos de menor valor, enquanto que as UEPs têm maiores valores, a depender de sua posição na malha e vazão praticada, dado o sentido de escoamento.

Por fim temos as temperaturas disponíveis na malha de gasodutos descritas na Fig. 5.85. São disponíveis apenas as temperaturas nas UEPs que trabalham com dutos rígidos na exportação, além das UTGs e unidade importadora. As demais unidades exportadoras são consideradas como exportando o gás a $40\,°C$. A temperatura da I_3 tem uma grande variação devido

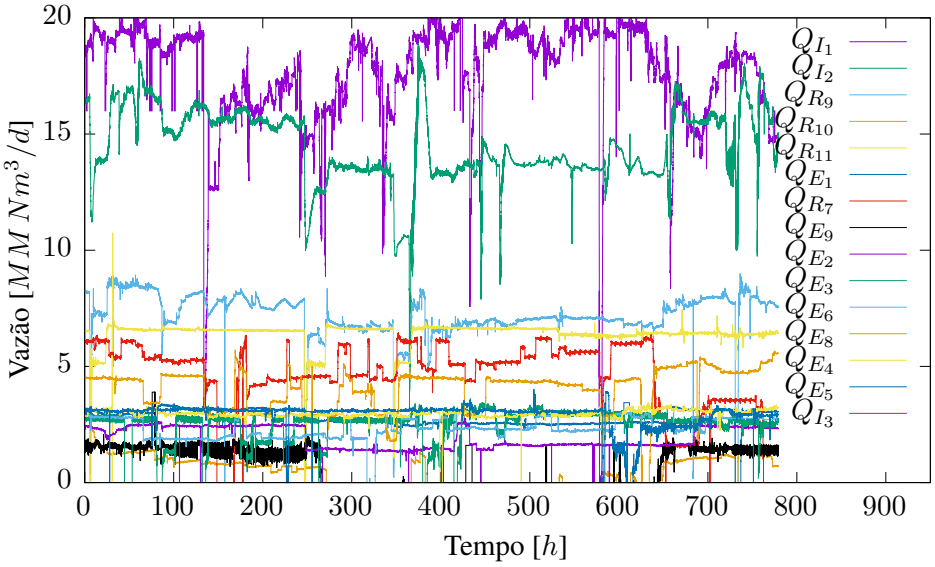


Figura 5.83: Vazões praticadas no caso com dados de campo.

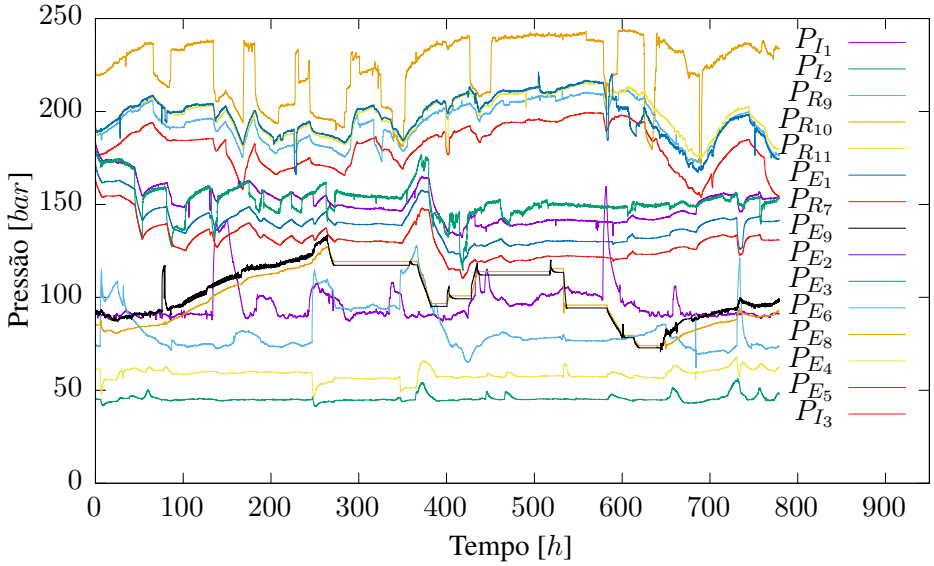


Figura 5.84: Pressões praticadas para caso com dados de campo.

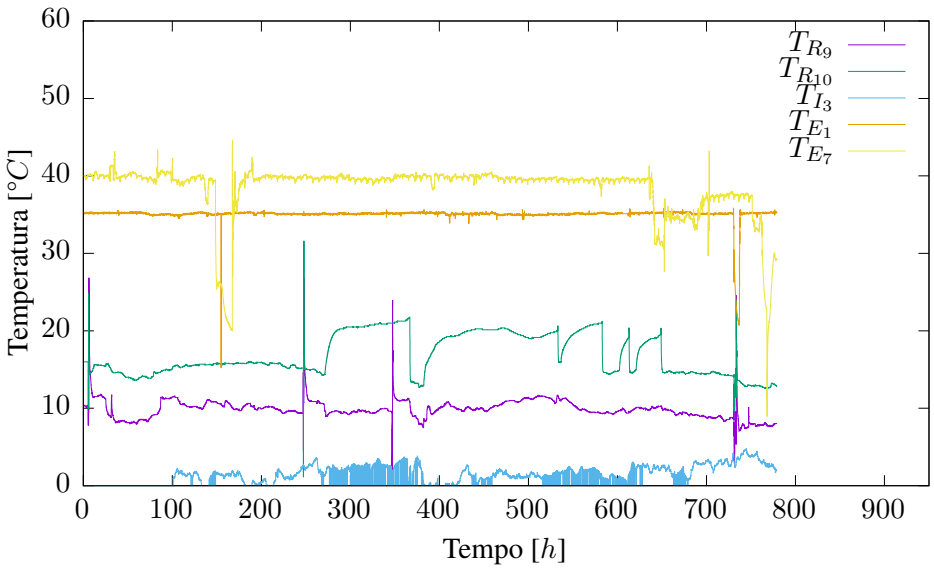


Figura 5.85: Temperaturas praticadas para caso com dados de campo.

a indisponibilidade da informação, sendo considerada como nula nestes momentos.

Considerando estas informações como medidas disponíveis e o modelo de escoamento proposto anteriormente, resta descrever como será utilizado o filtro de Kalman. Como são colocadas quatro rugosidades e dois coeficientes globais de troca térmica como representativos para o problema, o vetor de estado é dado por:

$$x = [\ldots\ P_i\, \dot{n}_i\, T_i\ \ldots\ \varepsilon_{R_{11}}\, \varepsilon_{R_{10}}\, \varepsilon_{R_9}\, \varepsilon_F\, U_R\, U_F]^T \tag{5.16}$$

Onde os termos $P_i\, \dot{n}_i\, T_i$ consistem das variáveis de escoamento calculadas conforme discretização da malha de gasodutos, num total de 167 variáveis de escoamento avaliadas e seis parâmetros a serem estimados. Por sua vez, o vetor de observação é descrito por:

$$z = [P_{I_1}\, P_{I_2}\, P_{I_3}\, P_{R_9}\, P_{R_{10}}\, P_{E_1}\, P_{E_2}\, P_{E_3}\, P_{E_4}\, P_{E_5}\, P_{E_6}\, P_{E_7}\, P_{E_8}\, P_{E_9}\, T_{E_9}\, T_{E_{10}}\, T_{I_3}]^T \tag{5.17}$$

Aqui foram colocadas medidas disponíveis do sistema real, consistindo principalmente de pressões e temperaturas que não são condições de contorno no problema numérico de escoamento. Por fim, o vetor de controle é dado por:

$$u = [\dot{n}_{I_1}\, \dot{n}_{I_2}\, \dot{n}_{I_3}\, \dot{n}_{R_9}\, \dot{n}_{R_{10}}\, \dot{n}_{E_1}\, \dot{n}_{E_2}\, \dot{n}_{E_3}\, \dot{n}_{E_4}\, \dot{n}_{E_5}\, \dot{n}_{E_6}\, \dot{n}_{E_7}\, \dot{n}_{E_8}\, \dot{n}_{E_9}\, T_{E_1}\, T_{E_7}]^T \tag{5.18}$$

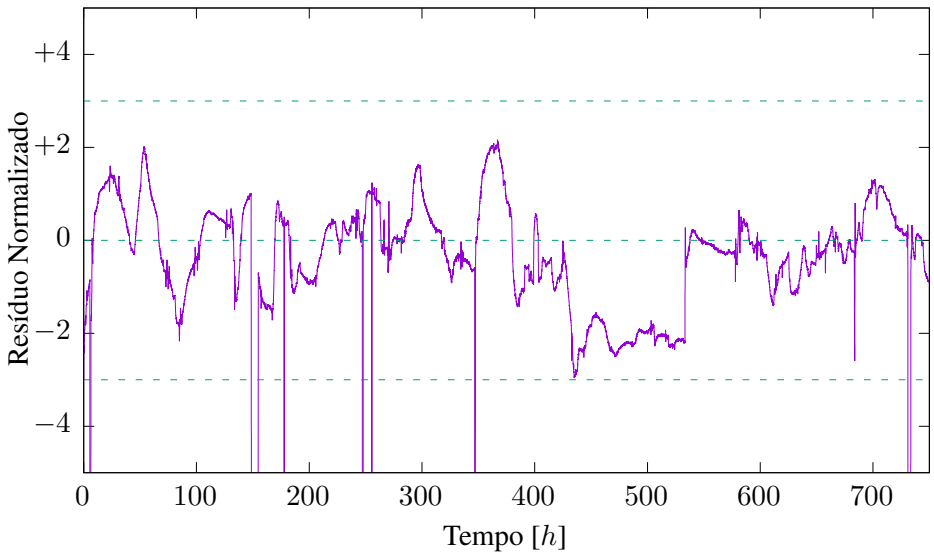


Figura 5.86: Resíduo normalizado para caso com dados de campo.

Com esta construção dos vetores, foram avaliados 30 dias de escoamento na malha de gasodutos. A Fig. 5.86 mostra o resíduo normalizado entre valores calculados pelo modelo de escoamento e medidos. O filtro é capaz de, após horas de estimação, levar este ruido a um valor médio nulo. Mas variações nas condições físicas de escoamento, como grandes alterações nas vazões das UEPs, alteram perceptivelmente o valor do resíduo.

O resíduo apresenta, em alguns momentos, uma variação bastante alta, como nas 150 ou 250 horas. Neste momento foi identificada indisponibilidade de diferentes medidas como E_1 e E_7, e com o uso de seu valor medido nulo, o desvio-padrão se torna notável.

Em outros períodos, o resíduo se aproxima de três desvios-padrão do ruído na medida, como nas 450 horas, situação em que a válvula intermediária em R_{10} era fechada, gerando assim uma medida não representativa. As demais medidas disponíveis e o modelo de escoamento foram suficientes para uma adequada estimação do estado proposto.

Neste caso, utilizando dados reais, foram estimadas quatro rugosidades internas diferentes, sendo uma para duto flexível, uma para duto rígido, a terceira para duto rígido com revestimento interno para diminuição da rugosidade e, finalmente, uma quarta para um oleoduto convertido em gasoduto. As tendências para os valores estimados de rugosidade interna são dadas na Fig. 5.87.

Os valores iniciais arbitrados para as rugosidades são de $1\,mm$ para o duto flexível. Este valor é alto por considerar características construtivas como a carcaça intertravada interna do duto, que traz consigo uma rugosidade interna equivalente alta. Para o gasoduto sem revestimento, este valor inicial foi colocado como $0{,}1\,mm$, enquanto que para o trecho de gasoduto

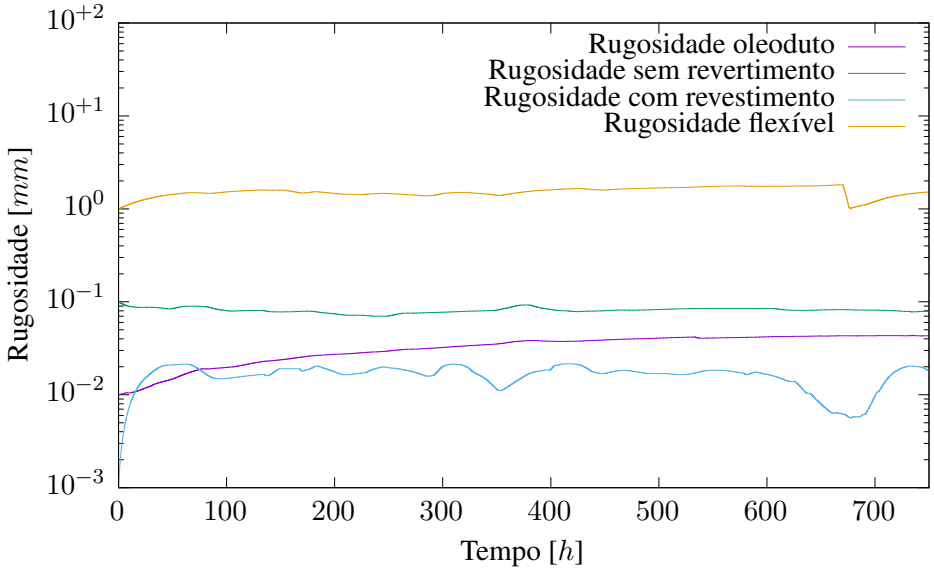


Figura 5.87: Rugosidades estimadas para caso com dados de campo.

com revestimento interno para redução da fricção foi de $0{,}001\,mm$. O último gasoduto, com escoamento multifásico, foi inicializado com $0{,}01\,mm$ de rugosidade.

É possível ver que a rugosidade é inicializada num valor, se altera com o tempo, até que em algum momento passa a ter variação menor. A rugosidade do oleoduto adaptado foi inicializada em $0{,}1\,mm$, sendo que após quinhentas horas atingiu um valor estabilizado de $0{,}42\,mm$, enquanto que a rugosidade do trecho com revestimento foi inicializada em $0{,}001\,mm$, e um valor estabilizado foi atingido em $0{,}017\,mm$, um valor dezessete vezes maior que o inicialmente sugerido.

Muito embora o valor de rugosidade interna não sofra variação real num curto espaço de tempo, é esperada a estimação com variação por se tratar de um modelo da dinâmica do sistema com simplificações e incertezas.

Na Fig. 5.88 são apresentadas tendências dos coeficientes globais de troca térmica, sendo um para dutos flexíveis e outro para dutos rígidos. Os valores iniciais foram colocados como $50\,W/m^2K$ para o duto rígido, valor baseado na construção do duto e sua camada de polipropileno, e de $10\,W/m^2K$ para o duto flexível, pela maior quantidade de camadas poliméricas envolvidas.

O coeficiente para duto rígido varia em torno do valor de $40\,W/m^2K$, um pouco abaixo do esperado pela construção do duto rígido. Isso pode ter relação com um eventual enterramento parcial do duto, uma vez que isso diminui a área exposta à água e modifica a troca térmica. Este parâmetro oscila de forma perceptível, o que pode estar relacionado ao comportamento do escoamento em *topside*, onde o fluido exterior é o ar e a tubulação sofre influência de radiação

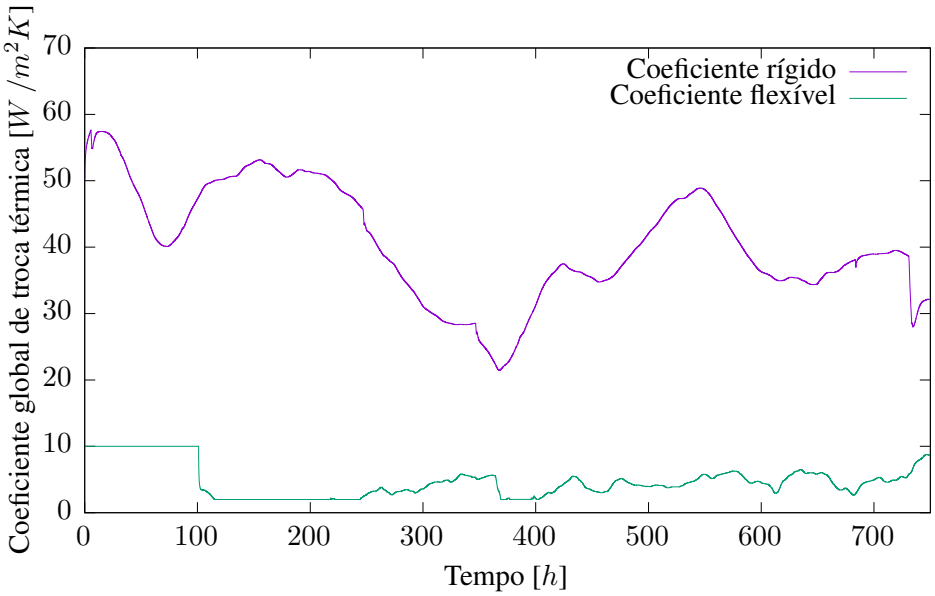


Figura 5.88: Coeficientes globais de troca térmica estimados para caso com dados de campo.

externa, ou ao fato de o sensor ser não intrusivo, o que pode fazer com que a medida seja não representativa. De forma geral, a variação de 25 a $50\,W/m^2K$ na estimação deste parâmetro evidencia uma necessidade de melhora da modelagem proposta.

Outro parâmetro estimado, o coeficiente global de troca térmica do flexível, cai a valores baixos, próximos a zero. O valor esperado é de, numa média, $6\,W/m^2K$, por especificação do fabricante e testes de bancada. Os resultados chegaram a aproximadamente $7{,}5\,W/m^2K$ após as $500\,h$ de simulação, quando a informação passou a ser mais disponível, após a correção de problemas de comunicação que impediam a sua leitura.

Finalmente são mostradas pressões de exportação em três UEPs, sendo comparados os valores estimados e os medidos na Fig. 5.89. É visível a melhora da estimação com o passar do tempo, na aproximação das curvas. Em cerca de $120\,h$ de estimação, as curvas se separam. Isso acontece por falha nas medidas disponíveis e simplificações no modelo, que leva o filtro ao erro.

As temperaturas estimadas são mostradas na Fig. 5.90. As curvas em azul mostram as temperaturas estimada e medida em I_3. Neste ponto existe indisponibilidade da medida, e mesmo assim a temperatura estimada se comporta de forma coerente. Em outro ponto, R_9, a temperatura estimada é compatível com a medida, com algumas variações.

No ponto R_{10} a temperatura é estimada de forma satisfatória até as $250\,h$. A partir deste momento as oscilações acontecem nas medidas e não são percebidas na estimativa. Isso se deve a um fechamento de válvula no trecho, o que tornou a medida não representativa para o período.

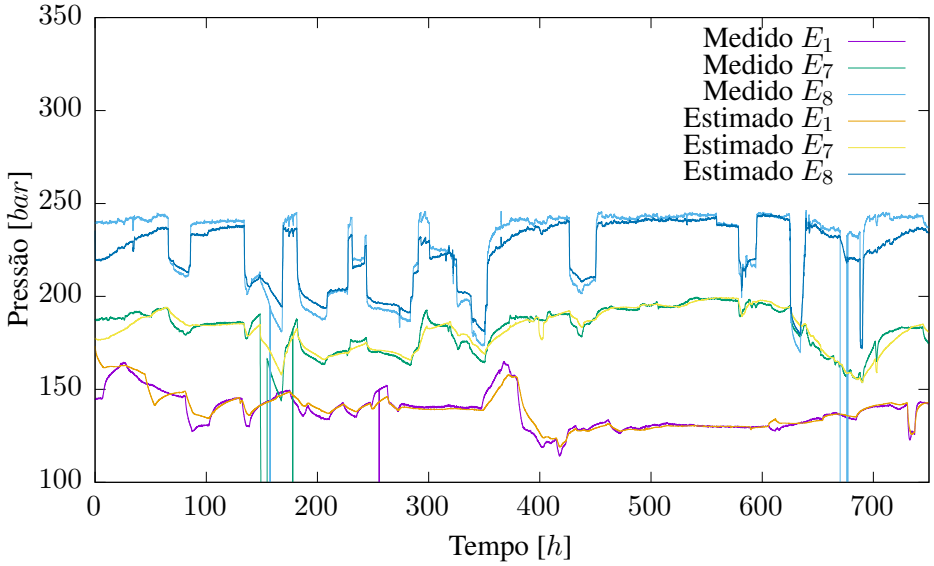


Figura 5.89: Comparativo de pressão de exportação medidas e estimadas para caso com dados de campo.

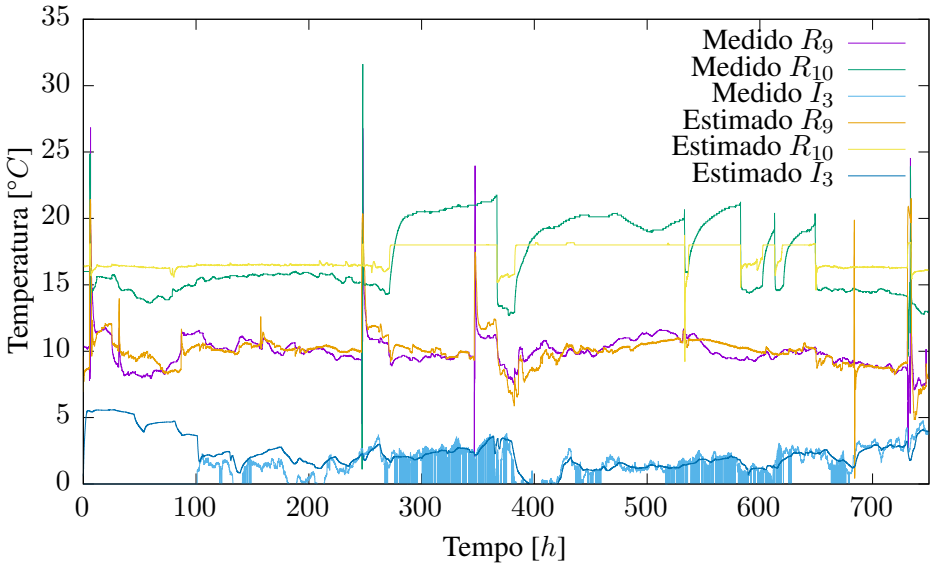


Figura 5.90: Comparativo de temperaturas de importação medidas e estimadas para caso com dados de campo.

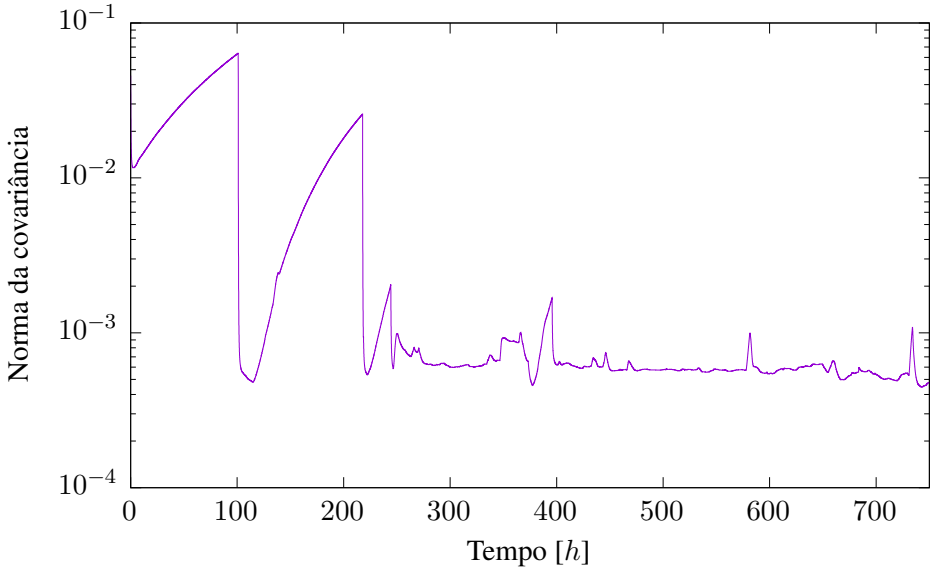


Figura 5.91: Norma euclidiana da matriz de covariância para caso com dados de campo.

Para complementar os resultados mostrados, resta a apresentação da norma euclidiana da matriz de covariância, conforme Fig. 5.91. Percebe-se que, dependendo da disponibilidade de medidas, o comportamento é compatível com a operação de um filtro de Kalman.

Este comportamento indica que o filtro está atuando de maneira correta, aprendendo o estado e fazendo avaliações adequadas para os parâmetros estimados e, associado ao já descrito para o resíduo, indica a convergência do filtro proposto.

De forma geral a proposta se comporta bem com os dados de campo, e os parâmetros estimados tem valores coerentes a depender da qualidade das medidas disponíveis. Esta abordagem também pode ser utilizada para verificação de falha de medida quando do aumento da diferença entre medidas e estimativas de forma brusca.

Por fim, os resultados deste estudo são mais precisos que os obtidos com a utilização direta de medidas nas condições de contorno do modelo de escoamento em malha de gasoduto *offshore* em LDA profunda, quando comparada à abordagem adotada em *softwares* do tipo PMS, amplamente utilizados na gestão de malhas de gasodutos.

5.6 Dificuldades encontradas

Esta seção tem por objetivo apresentar e discutir as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho, de forma a auxiliar futuras pesquisas. A modelagem do escoamento, assim como solução numérica para as equações regentes não foram problemáticas, sendo que o filtro de Kalman se mostrou mais desafiador.

5.6.1 Parâmetros

Muito embora a utilização do filtro traga consigo uma dificuldade na construção da proposta, após vencida a dificuldade inicial para cálculo das matrizes de covariância e ganho, avaliação numérica das derivadas parciais e outros cálculos intermediários, o funcionamento da metodologia ainda depende de definições importantes e não claramente apresentadas.

A primeira, e mais óbvia, é a definição dos parâmetros a serem estimados. A utilização de parâmetros redundantes, ou seja, que levam a um mesmo perfil de pressão e temperatura no escoamento, tornam a estimação de tais parâmetros mais difícil.

Isso significa que numa proposta de estado com estimação da rugosidade e de um parâmetro multiplicativo para a perda de carga por fricção, por exemplo, o filtro pode levar estas estimativas a valores irreais, pela possibilidade de mesmo assim produzir perfis coerentes de pressão e temperatura.

Outra possibilidade, menos óbvia, é a adoção de *offset* de medição em diferentes pontos como parâmetros a estimar. Esse offset pode auxilia na estimação de rugosidade durante a fase transiente. Entretanto, após este transiente, os valores estimados não são representativos e o filtro passa a se comportar de forma errática.

A estratégia utilizada neste trabalho foi o início dos trabalhos com estimação de estado sem a estimação de parâmetros. Uma vez funcional e estável, iniciou-se com a colocação de um parâmetro, ou a rugosidade, que respondeu de forma satisfatória a proposta. Posteriormente foi colocada um segundo parâmetro e assim sucessivamente, até o caso mais complexo avaliado na malha real, com seis parâmetros.

Outro ponto de atenção para a definição dos parâmetros a serem estimados é a sensibilidade apresentada a pressão e temperatura calculados. Parâmetros com pouca influência nestas variáveis nos pontos com medidas não são bem estimados. Seguindo-se estes requisitos a possibilidade de os resultados se mostrarem coerentes é maior.

5.6.2 Incertezas

Uma vez selecionados os parâmetros do escoamento que o filtro de Kalman deve estimar em conjunto com o estado, o próximo desafio concerne a adoção das incertezas nos modelos de estado e medida. Muito embora a incerteza de medição seja relacionada a características do sensor, e assim pode ser adotada com relativa acuidade, a incerteza do modelo é mais complexa, assim como a relacionada aos parâmetros.

A abordagem utilizada foi adotar valores muito pequenos para a incerteza do modelo, apenas com o objetivo de tornar a matriz positiva definida, e avaliar diferentes valores para a incerteza dos parâmetros, que evoluem conforme o dito passeio aleatório. Valores menores levam a uma menor alteração do parâmetro estimado no tempo, ou uma variação mais suave, o que pode ser ruim a depender da precisão do valor inicial adotado.

Valores muito altos causam grandes variações nos parâmetros estimados, o que pode levar a um processo similar de instabilização de controladores lineares. A melhor estratégia encontrada foi a de tentativa e erro para este cenário. Uma dificuldade extra foi a influência de outros parâmetros, uma vez que a adoção de um vetor de estado diferente traz a possibilidade de instabilidade nas estimativas dos valores dos parâmetros. Nesse caso deve-se, novamente, reduzir os valores adotados para as incertezas do modelo.

Por fim, uma definição que também tem importância, e é ainda menos intuitiva que as anteriores, é a inicialização da matriz de covariância de erro de estimação. Nas entradas referentes ao modelo de escoamento os valores podem ser nulos, mas naqueles referentes aos parâmetros, os valores inicializados tem grande influência nas variações do parâmetro estimado nas primeiras iterações.

Neste trabalho adotou-se, inicialmente, apenas a incerteza nos parâmetros para inicializar a matriz de covariância do erro de estimação. Quando os valores adotados foram muito grandes, as estimativas dos parâmetros oscilaram rapidamente; por outro lado, com valores pequenos, o algoritmo demorava a fornecer valores distintos para a estimativa inicial. Foi adotada, em todos os casos, uma solução intermediária. Deve-se salientar que não há nenhum método específico para a escolha dessa matriz, ou mesmo da matriz de covariância do erro no modelo de estado. Na prática, a experiência do projetista com a planta a avaliar é um fator preponderante na escolha dessas matrizes.

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões decorrentes do trabalho e algumas recomendações para trabalhos futuros, bem como avaliação da influência dos parâmetros avaliados e estratégias escolhidas.

As informações utilizadas nas conclusões são baseadas nos resultados obtidos para gasoduto onshore, offshore e malha de gasodutos offshore com efeitos transientes, que podem ser encontradas no Capítulo 5.

6.1 Conclusões

No presente trabalho são utilizadas três equações de conservação para a descrição do escoamento, sendo a equação da conservação de energia linearizada no ponto de avaliação. O método de solução do sistema de equações é implícito e direto, com iteração para ajuste das propriedades necessárias ao cálculo.

Os resultados do modelo de escoamento são comparados a problemas disponíveis na literatura e dados simulados para gasodutos e malhas proposta ou real, mostrando coerência dos resultados, característica necessária a um simulador a ser utilizado em tempo real.

O modelo de escoamento proposto apresenta resultados coerentes com bibliografia, tanto para casos onde a temperatura é tida como constante no espaço e tempo quanto para comparações com problemas térmicos, bastando alterar a modelagem para uma geração de resultados similares.

Para casos reais de transientes, o modelo também se apresenta com precisão dos resultados, com uma maior dificuldade de comparação e validação dada a baixa quantidade de dados disponíveis, localizados apenas nas extremidades dos dutos.

Para o caso de escoamento em dutos terrestres, com baixa variação da temperatura do fluido e pouca variação da cota de escoamento, o uso da equação de conservação da energia

parece ter baixo impacto nos resultados, principalmente no perfil de pressão quando da estimação de parâmetro relacionado à perda de carga como a rugosidade interna, podendo-se fazer a consideração de escoamento isotérmico sem perda significativa de precisão dos resultados.

Para cenários onde existe grande variação da cota de escoamento com variação da temperatura ambiente, como em ambiente *offshore*, a consideração da equação da conservação da energia em conjunto com a conservação de massa e de quantidade de movimento mostrou um ganho de precisão nos resultados obtidos pelo modelo quando comparado a dados simulados, principalmente quando existe grande gradiente térmico na região de variação da cota de escoamento, como o *riser* de exportação das UEPs.

Para o cenário de gasoduto *offshore* brasileiro, composto por um *riser* de exportação com baixa troca térmica e um trecho tronco mais longo com maior troca térmica, a resolução da conservação de energia se mostrou vantajosa com relação à consideração de escoamento isotérmico, por se caracterizar os requisitos descritos no parágrafo anterior.

O uso de nós intermediários como condição de contorno para diferentes gasodutos permite a modelagem de malhas complexas de escoamento que, aliadas a métodos diretos de solução, permitem a avaliação de escoamento em sistemas complexos envolvendo diversas unidades exportadoras, importadoras, dutos e equipamentos submarinos.

Condições de escoamento em regime, sem variações significativas de vazão, indicam similaridade nos resultados obtidos para o filtro de Kalman, só indicando melhoria quando da comparação de diferenças quadráticas para a estimação da rugosidade interna e dos perfis de pressão e temperatura gerados para a estimação do coeficiente global de troca térmica.

A existência de transientes de vazão, pressão e temperatura em malha de gasoduto permite mostrar a diminuição das incertezas nos cálculos de escoamento quando da melhor estimação de parâmetro relacionado à troca térmica, como o coeficiente global.

A estimação de estado para gasodutos singelos e malhas disponíveis na literatura ainda é incipiente e baseada em trabalhos sem o uso de dados de campo. Para este trabalho foi realizada estimação com o uso de filtro de Kalman estendido, dadas as não linearidades encontradas na formulação do problema.

O trabalho também estende a estimação de estado para malhas de gasodutos *offshore* em LDA profunda, demonstrando ganhos relativos à utilização da equação de conservação da energia e estimação de parâmetro para a troca térmica no cenário descrito. Os resultados mostram a viabilidade da solução proposta para sistemas reais e resultados obtidos para malhas de gasodutos.

O presente trabalho serve de base para a construção de *software* para simulação e acompanhamento do escoamento de gás natural em malha de gasodutos *offshore*. A estimação do estado permite uma maior tolerância a falhas nas medidas e possíveis imprecisões, enquanto que os parâmetros estimados, além de melhorarem a precisão dos resultados, permitem inferir efeitos de longo prazo nos gasodutos.

6.2 Recomendações

Seguem algumas sugestões de assuntos a serem tratados em futuros trabalhos sobre o tema:

- Viabilizar abordagem similar para EnKF, UKF ou EnKS;
- Avaliar variação nos resultados com outras abordagens para a troca térmica com o meio. Isso pode aumentar a quantidade de variáveis de estado a serem estimadas e aumentar a complexidade do modelo de escoamento significativamente;
- Incluir características das plantas de processamento primário e tratamento do gás nos modelos, bem como sistemas de coleta, possibilitando um acompanhamento integrado entre coleta e transporte;
- Avaliar a influência das matrizes de covariância no comportamento da solução, propondo melhores práticas para sua definição;
- Adicionar o comportamento de perdas de carga localizadas no modelo de escoamento, como válvulas *choke*, *shutdown valves* (SDVs), *in line "T"s* (ILTs) e válvulas de instalação, e estimar estado e parâmetros destes;
- Avaliar a possibilidade de uso do filtro de forma concomitante para detecção e localização de vazamentos.

Estas sugestões têm com o objetivo de aumentar a representatividade dos resultados obtidos, que com sua aplicação em sistemas reais pode auxiliar de forma mais efetiva a tomada de decisão da operadora de uma malha de gasodutos, aumentando a taxa de ocupação do sistema mantendo os parâmetros de segurança.

REFERÊNCIAS

AAMO, O.; SALVESEN, J.; FOSS, B. Observer design using boundary injections for pipeline monitoring and leak detection. In: CITESEER. *Proc. IFAC Symp. Adv. Control Chem. Process*. [S.l.], 2006. p. 2–5.

ABBASPOUR, M.; CHAPMAN, K. Nonisothermal transient flow in natural gas pipeline. *Journal of applied mechanics*, American Society of Mechanical Engineers, v. 75, n. 3, p. 031018, 2008.

ABDOLAHI, F.; MESBAH, A.; BOOZARJOMEHRY, R. B.; SVRCEK, W. Y. The effect of major parameters on simulation results of gas pipelines. *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, v. 49, n. 8, p. 989–1000, 2007.

AL-RASHEED, M.; WALLOOPPILLAI, R.; WAGNER, G.; SCHEERER, H. et al. Mgs-stat, a pipeline management tool for saudi aramco's master gas system. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2011.

BEHROOZ, H. A.; BOOZARJOMEHRY, R. B. Distributed and decentralized state estimation in gas networks as distributed parameter systems. *ISA transactions*, Elsevier, v. 58, p. 552–566, 2015.

BEHROOZ, H. A.; BOOZARJOMEHRY, R. B. Modeling and state estimation for gas transmission networks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 22, p. 551–570, 2015.

BRATLAND, O. Pipe flow 1: single-phase flow assurance. *Chapter*, v. 2, p. 21–92, 2009.

CHACZYKOWSKI, M. Transient flow in natural gas pipeline–the effect of pipeline thermal model. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 1051–1067, 2010.

CHACZYKOWSKI, M.; SUND, F.; ZARODKIEWICZ, P.; HOPE, S. M. Gas composition tracking in transient pipeline flow. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 55, p. 321–330, 2018.

CHEN, N. H. An explicit equation for friction factor in pipe. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, ACS Publications, v. 18, n. 3, p. 296–297, 1979.

COLEBROOK, C. F.; BLENCH, T.; CHATLEY, H.; ESSEX, E.; FINNIECOME, J.; LACEY, G.; WILLIAMSON, J.; MACDONALD, G. Correspondence. turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws.(includes plates). *Journal of the Institution of Civil engineers*, Thomas Telford-ICE Virtual Library, v. 12, n. 8, p. 393–422, 1939.

DANDREA, T. Z. linepack. In: *Rio pipeline*. [S.l.: s.n.], 2015.

D'ANDRÉA, T. Z. *Reconciliação de dados de uma malha de gasodutos.* Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

DANDREA, T. Z.; ROTAVA, E.; MUKATI, K. Santos operational simulation system: integrated dynamic compositional simulation of multiphase pipeline network and treatment facilities to assist in planning, operation and production management. 2015.

DEHDAR, F.; YAP, S.-F.; NAGHAVI, M.; DEHDAR, M. M. Charting the future global status of oil and natural gas using grey forecasting. *Institutions and Economies*, p. 105–125, 2017.

DEMMEL, J. W. Superlu users' guide. 1999.

DONEY, K. L. *Leak detection in pipelines using the extended kalman filter and the extended boundary approach*. Tese (Doutorado) — University of Saskatchewan Saskatoon, 2007.

DURGUT, İ.; LEBLEBICIOĞLU, M. K. State estimation of transient flow in gas pipelines by a kalman filter-based estimator. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 35, p. 189–196, 2016.

D'ANDREA, T. Z.; ROTAVA, E.; SERPEJANTE, C. G.; RUSSO, E. E. R.; TEIXEIRA, A. F.; KHATIB, H. A. B.; INACIO, A. M. da S.; BASTOS, M. D. I. M.; GOMES, A. de M.; MUKATI, K. Santos operational simulation system: Integrated dynamic compositional simulation of multiphase pipeline network and treatment facilities to assist in planning, operation and production management. In: *Rio Pipeline*. [S.l.: s.n.], 2015.

FARZANEH-GORD, M.; RAHBARI, H. Developing novel correlations for calculating natural gas thermodynamic properties. *Chemical and Process Engineering*, Versita, v. 32, n. 4, p. 435–452, 2011.

FARZANEH-GORD, M.; RAHBARI, H. R. Unsteady natural gas flow within pipeline network, an analytical approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 28, p. 397–409, 2016.

FARZANEH-GORD, M.; RAHBARI, H. R. Response of natural gas distribution pipeline networks to ambient temperature variation (unsteady simulation). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 52, p. 94–105, 2018.

GERSTEN, K.; PAPENFUSS, H.; KURSCHAT, T.; GENILLON, P. New transmission-factor formula proposed for gas pipelines. *Oil & Gas Journal*, Proquest ABI/INFORM, v. 98, n. 7, p. 58–58, 2000.

GILLIJNS, S.; MENDOZA, O. B.; CHANDRASEKAR, J.; MOOR, B. D.; BERNSTEIN, D.; RIDLEY, A. What is the ensemble kalman filter and how well does it work? In: IEEE. *American Control Conference, 2006*. [S.l.], 2006. p. 6–pp.

GLOBAL, B. P. Bp statistical review of world energy june 2017. *Relatório. Disponível em: http://www. bp. com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy. html*, 2017.

HAALAND, S. E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. *Journal of Fluids Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 105, n. 1, p. 89–90, 1983.

HANMER, G.; JACKSON, E.; HANSEN, D.; VELDE, B.; LOSNEGARD, S.-E. et al. Tuning of subsea pipeline models to optimize simulation accuracy. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2012.

HAUGE, E. Advanced leak detection in oil and gas pipelines using a nonlinear observer and olga models. Institutt for teknisk kybernetikk, 2007.

HERRÁN-GONZÁLEZ, A.; CRUZ, J. D. L.; ANDRÉS-TORO, B. D.; RISCO-MARTÍN, J. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 33, n. 3, p. 1584–1600, 2009.

HERTY, M.; MOHRING, J.; SACHERS, V. A new model for gas flow in pipe networks. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, Wiley Online Library, v. 33, n. 7, p. 845–855, 2010.

HODNE, K. Leak detection in two-phase oil and gas pipelines by parameter and state estimation. Institutt for teknisk kybernetikk, 2008.

HOEVEN, T. Van der et al. Gas network state estimation with the equal error fraction method. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 1987.

ISOM, J. D.; STAMPS, A. T.; ESMAILI, A.; MANCILLA, C. Two methods of data reconciliation for pipeline networks. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 115, p. 487–503, 2018.

JALVING, J.; ZAVALA, V. M. An optimization-based state estimation framework for large-scale natural gas networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 57, n. 17, p. 5966–5979, 2018.

JARRAHIAN, A.; HEIDARYAN, E. A simple correlation to estimate natural gas viscosity. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 20, p. 50–57, 2014.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 82, n. 1, p. 35–45, 1960.

KUNZ, O.; WAGNER, W. The gerg-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of gerg-2004. *Journal of chemical & engineering data*, ACS Publications, v. 57, n. 11, p. 3032–3091, 2012.

LESYSHEN, R. M. *Water transmission line leak detection using extended kalman filtering*. Tese (Doutorado) — University of Saskatchewan Saskatoon, 2005.

LI, X. S. An overview of superlu: Algorithms, implementation, and user interface. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, ACM, v. 31, n. 3, p. 302–325, 2005.

LÓPEZ-BENITO, A.; TENREIRO, F. J. E.; GUTIÉRREZ-PÉREZ, L. C. Steady-state non-isothermal flow model for natural gas transmission in pipes. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 40, n. 23-24, p. 10020–10037, 2016.

LORENTZEN, R. J.; NÆVDAL, G.; LAGE, A. C. Tuning of parameters in a two-phase flow model using an ensemble kalman filter. *International Journal of Multiphase Flow*, Elsevier, v. 29, n. 8, p. 1283–1309, 2003.

MADOLIAT, R.; KHANMIRZA, E.; MOETAMEDZADEH, H. R. Transient simulation of gas pipeline networks using intelligent methods. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 29, p. 517–529, 2016.

MALISKA, R. C. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. *ISBN 8521613962. 2ª Edição–2004. LTC*, 1995.

MAYBECK, P. S. The kalman filter: An introduction to concepts. In: *Autonomous robot vehicles*. [S.l.]: Springer, 1990. p. 194–204.

METELSKA, K.; BIAŁY, R.; CIEŚLIK, T.; BLACHARSKI, T.; SZURLEJ, A. The importance of lng for natural gas consumption in the eu. In: EDP SCIENCES. *E3S Web of Conferences*. [S.l.], 2016. v. 10, p. 00132.

MODISETTE, J. et al. Automatic tuning of pipeline models. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2004.

MODISETTE, J. L. et al. Equation of state tutorial. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2000.

MODISETTE, J. P. et al. State estimation in online models. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2009.

MODISETTE, J. P. et al. State estimation of pipeline models using the ensemble kalman filter. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2013.

NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C. *Data reconciliation and gross error detection: An intelligent use of process data*. [S.l.]: Elsevier, 1999.

NEACSU, S.; EPARU, C. System for real time managing the natural gas transport network. *Journal of Eastern Europe Research in Business & Economics*, IBIMA Publishing LLC, v. 2013, p. 1, 2013.

OOSTERKAMP, A.; HELGAKER, J.; YTREHUS, T. Modelling of natural gas pipe flow with rapid transients-case study of effect of ambient model. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 64, p. 101–110, 2015.

OSIADACZ, A. J.; CHACZYKOWSKI, M. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, v. 81, n. 1-3, p. 41–51, 2001.

OSIADACZ, A. J.; CHACZYKOWSKI, M. et al. Comparison of isothermal and and non-isothermal transient models. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 1998.

OVEN, S. Leak detection in pipelines by the use of state and parameter estimation. Institutt for teknisk kybernetikk, 2014.

PALM, W. J. *System dynamics*. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2005.

PAMBOUR, K. A.; BOLADO-LAVIN, R.; DIJKEMA, G. P. An integrated transient model for simulating the operation of natural gas transport systems. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 28, p. 672–690, 2016.

PEDERSEN, K. S.; CHRISTENSEN, P. L.; SHAIKH, J. A. *Phase behavior of petroleum reservoir fluids*. [S.l.]: CRC Press, 2014.

PEDERSEN, K. S.; FREDENSLUND, A. An improved corresponding states model for the prediction of oil and gas viscosities and thermal conductivities. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 42, n. 1, p. 182–186, 1987.

PÉNELOUX, A.; RAUZY, E.; FRÉZE, R. A consistent correction for redlich-kwong-soave volumes. *Fluid Phase Equilibria*, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 7–23, 1982.

PENG, D.-Y.; ROBINSON, D. B. A new two-constant equation of state. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, ACS Publications, v. 15, n. 1, p. 59–64, 1976.

REED, D.; NARVAEZ, O.; TEPEDINO, A.; FRISOLI, C. et al. An example of business and operational integration for a gas pipeline. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2006.

REID, R. C.; PRAUSNITZ, J. M.; POLING, B. E. The properties of gases and liquids. McGraw Hill Book Co., New York, NY, 1987.

ROBINSON, D. B.; PENG, D.-Y. *The characterization of the heptanes and heavier fractions for the GPA Peng-Robinson programs*. [S.l.]: Gas processors association, 1978.

ROMAGNOLI, J. A.; SANCHEZ, M. C. *Data processing and reconciliation for chemical process operations*. [S.l.]: Elsevier, 1999. v. 2.

SANTOS, M. F. Analysis of transient flow in natural gas transmission network. 2010.

SANTOS, P. L. dos; AZEVEDO-PERDICOÚLIS, T.; JANK, G.; RAMOS, J.; CARVALHO, J. M. de. Leakage detection and location in gas pipelines through an lpv identification approach. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Elsevier, v. 16, n. 12, p. 4657–4665, 2011.

SHOHAM, O. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes. Society of Petroleum Engineers Richardson, TX, 2006.

SIMON, D. *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

SOAVE, G. Equilibrium constants from a modified redlich-kwong equation of state. *Chemical engineering science*, Elsevier, v. 27, n. 6, p. 1197–1203, 1972.

SORENSON, H. W. Least-squares estimation: from gauss to kalman. *Spectrum, IEEE*, IEEE, v. 7, n. 7, p. 63–68, 1970.

SUDJATMIKO, A. A.; BAWONO, A.; LIDDELL, A.; MEURS, E. van; ZHANG, J. et al. The integrated application of pipeline models and gas management systems to gas transmission networks. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2009.

SUN, S.-L.; DENG, Z.-L. Multi-sensor optimal information fusion kalman filter. *Automatica*, Elsevier, v. 40, n. 6, p. 1017–1023, 2004.

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

VASCONCELOS, C. D.; LOURENÇO, S. R.; GRACIAS, A. C.; CASSIANO, D. A. Network flows modeling applied to the natural gas pipeline in brazil. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 14, p. 211–224, 2013.

VELDE, B. Application benefit of the online simulation software for gassco's subsea pipeline network. In: PIPELINE SIMULATION INTEREST GROUP. *PSIG Annual Meeting*. [S.l.], 2013.

WEI, X.; VERHAEGEN, M.; ENGELEN, T. van. Sensor fault detection and isolation for wind turbines based on subspace identification and kalman filter techniques. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Wiley Online Library, v. 24, n. 8, p. 687–707, 2010.

WIGGINS, M. L.; RUSSELL, J. E.; JENNINGS, J. W. et al. Analytical development of vogel-type inflow performance relationships. *SPE Journal*, Society of Petroleum Engineers, v. 1, n. 04, p. 355–362, 1996.

WOLDEYOHANNES, A. D.; MAJID, M. A. A. Simulation model for natural gas transmission pipeline network system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier, v. 19, n. 1, p. 196–212, 2011.

ZHOU, J.; ADEWUMI, M. A. Simulation of transients in natural gas pipelines using hybrid tvd schemes. *International journal for numerical methods in fluids*, Wiley Online Library, v. 32, n. 4, p. 407–437, 2000.

APÊNDICE A – FILTRO DE KALMAN

Teoria da estimação é o ramo da estatística que se dedica a estimar valores, parâmetros ou estados baseando-se em dados com erro aleatório e modelos para descrição do problema de interesse. Estes valores, parâmetros ou estados descrevem configurações físicas do problema de interesse. Um estimador busca aproximar os parâmetros desconhecidos do seu valor real através de medidas sujeitas a erros aleatórios com variância definida.

Na teoria da estimação os dados são assumidos como afetados por ruídos aleatórios e independentes, onde se busca encontrar um valor para variáveis mais adequado que o valor medido, já que este segundo tem erro aleatório embutido. Em se considerando um histórico de medições, e não apenas a medição mais atual, é possível, de alguma forma, separar do valor medido o seu ruído, minimizando a diferença entre os valores medidos e os valores calculados pelo modelo proposto, considerando-se os erros associados a estas medições e a estes cálculos.

O filtro é nomeado em homenagem ao criador, (KALMAN, 1960). Em termos práticos é feito cálculo matricial baseado nas medições e no comportamento previsto pelo modelo de forma a minimizar o erro quadrático médio presente entre os cálculos e medições, podendo ser realizada uma estimação de parâmetros não medidos, uma fusão de sinais complementares num mesmo ponto ou um misto destes dois conceitos de forma simultânea.

Este filtro tem sido aplicado a um grande número de diferentes tipos de problemas, de engenharia a economia, sendo bastante importante para a teoria de controle. Na maior parte das aplicações, o número de medições é limitado, e existe um maior número de variáveis para a descrição do estado completo no problema. O filtro, combinando uma serie de medições e um modelo para o problema, é capaz de estimar um conjuro completo de parâmetros e variáveis definindo o estado. Esta estimativa é mais adequada que as obtidas por meio de uma medição.

É importante notar que, na realidade, medições e cálculos são, também, aproximações para a realidade. Modelos são baseados em premissas, e possuem simplificações. Medições sempre possuem erros associados, tanto sistemáticos quanto aleatórios. Existem ainda fatores externos que também influenciam a precisão dos cálculos e medições, aumentando a incerteza

sobre as informações obtidas. O filtro combina as medições e cálculos de forma a ponderar as incertezas neste problema, sendo que com esta ponderação os dados se tornam mais confiáveis. A proporção de medição ou cálculo no valor da variável estimada depende de um parâmetro denominado ganho de Kalman, que é dependente da covariância, uma medida para a incerteza na predição calculada e medição de variáveis.

Como, neste trabalho, o filtro de Kalman trata o problema como discreto no tempo, o processo é repetido a cada intervalo de cálculo, melhorando a estimativa de covariância e o estado previsto com o passar do tempo. Por se tratar de um cálculo recursivo, para o cálculo de um novo estado, são suficientes o estado anterior e as medições apenas, não sendo necessário armazenamento de estados mais antigos. Os cálculos para o filtro, de estado e as covariâncias são representadas por matrizes, e o estado e medições são tratados como vetores.

A.1 Formulação para sistemas lineares

Para utilizar o filtro de Kalman em sua forma original na estimação de estado de um problema a partir de uma série de medidas com ruído e um modelo da dinâmica do sistema, é necessário modelar uma série de matrizes. Isto significa definir F_{t+1}, ou modelo de transição dos estados; H_{t+1}, ou modelo de observação; Q_{t+1}, ou covariância do ruído do processo; R_{t+1}, ou covariância do ruído da observação; e B_{t+1}, ou modelo das entradas de controle, para cada passo de tempo, podendo ser avaliado no instante de tempo a ser calculado $t+1$ ou no anterior e já avaliado t, como descrito a seguir para um caso de dinâmica do sistema:

$$x_{t+1} = F_{t+1}x_t + B_{t+1}u_{t+1} + w_{t+1} \tag{A.1}$$

onde:

F_{t+1} é o modelo de transição de estados, avaliado no estado do instante de tempo anterior x_t;

B_{t+1} é o modelo das entradas de controle, aplicado no vetor de entradas de controle no instante de tempo a ser calculado u_{t+1};

w_{t+1} é o ruído do processo, assumido como sendo de distribuição normal com média zero e covariância do instante de tempo a ser calculado Q_{t+1}.

No tempo $t+1$, uma observação, ou medidas, z_{t+1} do estado real x_{t+1} é feita de acordo com

$$z_{t+1} = H_{t+1}x_{t+1} + v_{t+1} \tag{A.2}$$

Onde H_{t+1} é o modelo de observação, que faz a transição entre o estado do sistema e as medidas disponíveis, e v_{t+1} é o ruído da observação, assumido como um ruído branco gaussiano de média zero e covariância R_{t+1}, dependente da instrumentação utilizada.

O estado e os vetores de ruído $x_0, w_1, ..., w_{t+1}, v_1...v_{t+1}$ são assumidos como sendo independentes. O estado para o filtro de Kalman é representado por duas variáveis de interesse, uma vetorial e outra matricial:

$x_{t+1|t+1}$, a estimativa a posteriori do estado no tempo $t+1$, dadas as observações até o tempo $t+1$, inclusive;

$P_{t+1|t+1}$, a matriz de covariância do erro a *posteriori*.

Estas duas informações caracterizam o filtro de Kalman por si só.

Embora existam diferentes formas, o filtro normalmente é apresentado em duas fases distintas: Predição e Atualização. Na predição usa a estimativa do estado no instante de tempo anterior t para obter uma estimativa do estado no tempo a ser calculado, pela utilização do modelo da dinâmica do sistema. Esta predição é chamada de estimativa a *priori*, já que não inclui a informação vinda das medidas no instante de tempo a ser calculado $_{t+1}$. Na fase de atualização, a predição a *priori* é combinada com a observação em $_{t+1}$ para refinar a estimativa do estado, utilizando-se o ganho de Kalman, que pondera entre a estimava e as medições os valores para o estado a depender da matriz de covariância. Esta estimativa refinada é chamada de estimativa a *posteriori*. Nesta estruturação o cálculo segue a seguinte sequência:

1. Predição do estado

$$\widehat{x}_{t+1|t} = F_{t+1}x_{t|t} + B_{t+1}u_{t+1} \tag{A.3}$$

2. Predição da covariância

$$P_{t+1|t} = F_{t+1}P_{t|t}F_{t+1}^{\mathrm{T}} + Q_{t+1} \tag{A.4}$$

3. Resíduo da medição

$$\tilde{y}_{t+1} = z_{t+1} - H_{t+1}x_{t+1|t} \tag{A.5}$$

4. Resíduo da covariância

$$S_{t+1} = H_{t+1} P_{t+1|t} H_{t+1}^T + R_{t+1} \tag{A.6}$$

5. Ganho ótimo de Kalman

$$K_{t+1} = P_{t+1|t} H_{t+1}^T S_{t+1}^t \tag{A.7}$$

6. Estado atualizado

$$x_{t+1|t+1} = x_{t+1|t} + K_{t+1} \tilde{y}_{t+1} \tag{A.8}$$

7. Covariância atualizada

$$P_{t+1|t+1} = (I - K_{t+1} H_{t+1}) P_{t+1|t} \tag{A.9}$$

As fórmulas acima para a estimativa e covariância atualizadas são válidas para o ganho ótimo de Kalman.

A.2 Formulação para sistemas não lineares

Na teria da estimação o filtro estendido de Kalman é a versão do filtro de Kalman para sistemas não lineares que lineariza o comportamento deste sistema no ponto de operação, trabalhando também com covariâncias e valores estimados. Neste caso, os modelos não precisam ser lineares, tanto o de evolução quanto o de observação, mas precisam ser funções diferenciáveis.

Estas características podem ser descritas como:

$$x_{t+1} = f(x_t, u_{t+1}) + w_{t+1} \tag{A.10}$$

e

$$z_{t+1} = h(x_{t+1}) + v_{t+1} \tag{A.11}$$

Estas funções podem ser usadas para cálculo direto da estimativa a priori do estado ou da observação a partir do estado. Entretanto não são possíveis de se utilizar diretamente a covariância. Neste caso se faz o uso das derivadas parciais destas funções.

A cada intervalo de tempo, as derivadas parciais são calculadas e montadas numa matriz denominada Jacobiana. Estas matrizes podem ser utilizadas nos cálculos envolvidos no filtro de Kalman. Esse processo lineariza as funções em torno da estimativa atual.

A notação $x_{n|m}$ indica a estimativa do estado x num instante de tempo n com as observações dadas até m, incluindo esta.

Assim, com nomenclatura similar a aplicada anteriormente, a predição do estado se torna:

$$x_{t+1|t} = f(x_{t|t}, u_{t+1}) \tag{A.12}$$

Enquanto que para a predição da covariância:

$$P_{t+1|t} = F_{t+1} P_{t|t} F_{t+1}^T + Q_{t+1} \tag{A.13}$$

Para as etapas de atualização que se seguem, temos o resíduo nas medidas:

$$\tilde{y}_{t+1} = z_{t+1} - h(x_{t+1|t}) \tag{A.14}$$

Enquanto que a covariância residual pode ser calculada com:

$$S_{t+1} = H_{t+1} P_{t+1|t} H_{t+1}^T + R_{t+1} \tag{A.15}$$

Com isso, o ganho de Kalman se torna:

$$K_{t+1} = \frac{P_{t+1|t} H_{t+1}^T}{S_{t+1}} \tag{A.16}$$

Agora é possível a atualização do estado com:

$$x_{t+1|t+1} = x_{t+1|t} + K_{t+1} \tilde{y}_{t+1} \tag{A.17}$$

E da covariância com:

$$P_{t+1|t+1} = (I - K_{t+1} H_{t+1}) P_{t+1|t} \tag{A.18}$$

Com a transição dos estados e observações descritas pelas matrizes jacobianas:

$$F_{t+1} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x_{t|t},u_{t+1}} \tag{A.19}$$

e

$$H_{t+1} = \left.\frac{\partial h}{\partial\, x}\right|_{x_{t+1|t}} \tag{A.20}$$

respectivamente.

A.3 Medidas disponíveis de forma discreta no tempo

A maioria dos sistemas reais são melhor representados por modelos contínuos da dinâmica, mas possuem apenas medidas de campo discretas no tempo, com estimação de estado feita através de um processador digital. Neste caso, o equacionamento pode ser colocado como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) + w(t) \quad & w(t) \sim \mathcal{N}(0, Q(t)) \\ z_{t+1} &= h(x_{t+1}) + v_{t+1} & v_{t+1} \sim \mathcal{N}(0, R_{t+1}) \end{aligned} \tag{A.21}$$

onde

$$x_{t+1} = x(t_+1) \tag{A.22}$$

Inicialização

$$x_{0|0} = E[x(t_0)] \tag{A.23}$$

e

$$P_{0|0} = E[\,(x(t_0) - x(t_0))\,(x(t_0) - x(t_0))^T\,] \tag{A.24}$$

Isso, na prática, significa a colocação de vetor de estado e matriz de covariância de forma conveniente, sem grande fundamentação física. Posto isto, a predição pode ser conseguida com:

$$x_{t+1|t} = x(t_{t+1}) \tag{A.25}$$

e

$$S_{t+1} = H_{t+1} P_{t+1|t} H_{t+1}^T + R_{t+1} \tag{A.26}$$

onde:

$$F(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x(t),u(t)} \tag{A.27}$$

Agora na fase de atualização, o ganho de Kalman é dado por:

$$K_{t+1} = P_{t+1|t} H_{t+1}^T \left(H_{t+1} P_{t+1|t} H_{t+1}^T + R_{t+1} \right)^{-1} \tag{A.28}$$

O estado atualizado é dado por:

$$x_{t+1|t+1} = x_{t+1|t} + K_{t+1}(z_{t+1} - h(x_{t+1|t})) \tag{A.29}$$

e a covariância é dada por:

$$P_{t+1|t+1} = (I - K_{t+1} H_{t+1}) P_{t+1|t} \tag{A.30}$$

onde

$$H_{t+1} = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_{t+1|t}} \tag{A.31}$$

APÊNDICE B – MODELO DE ESCOAMENTO

Este apêndice tem como objetivo demonstrar as transformações e técnicas utilizadas para a obtenção do modelo de escoamento proposto para o escoamento de gás natural em malha de gasoduto *offshore* com grandes LDAs. Para o escoamento de hidrocarbonetos, é comum a utilização de simplificação do escoamento como unidimensional, pela geometria de escoamento utilizada.

Por se tratar de gasoduto, é considerado apenas o escoamento de gás. Apesar de esta simplificação não ser necessariamente verdade, a quantidade de líquido em gasodutos que não recebem condensado é baia e não tem influência no escoamento.

B.1 Transformação de variáveis

As variáveis básicas de cálculo são modificadas para maior correspondência com a operação de uma malha real, e posteriormente são discretizadas para solução algébrica. Usualmente as equações de conservação são dadas em termos de velocidade local do escoamento, massa específica do fluido, temperatura do gás e sua composição.

Porém malhas de gasodutos são operadas com base em medidas de pressão, por questões relacionadas à segurança operacional, e vazão em condições de referência, por questões relacionadas a legislação brasileira, além da temperatura. Desta forma é interessante alterar as variáveis básicas do equacionamento.

Partido-se da equação dos gases reais

$$PV = znRT \tag{B.1}$$

e utilizando o conceito de massa molar do gás (MW)

$$MW = \frac{m}{n} \tag{B.2}$$

é possível construir a correlação:

$$\rho = \frac{P\,M_W}{z\,R\,T} \tag{B.3}$$

Já para a velocidade pode ser utilizada a definição de vazão mássica:

$$\dot{m} = \rho\,u\,A_i \tag{B.4}$$

que, reescrita com o uso da Eq. B.2, pode ser colocada de forma conveniente:

$$\rho\,u = \frac{\dot{n}\,M_W}{A} \tag{B.5}$$

Apesar de a variável $\dot{n}$ ser definida como vazão molar, e não em condição padrão, ela pode ser considerada uma forma alternativa a esta, pois ambas são proporcionais dado que o volume ocupado pelo gás na condição de referência.

As Eq. B.3 e B.5 serão utilizadas para transformação das variáveis nas equações de conservação. Como as condições de referência são dadas por $1atm$ e $20°C$, a relação entre vazão molar e vazão volumétrica em condições de referência:

$$\dot{n}[mol/s] = Q_{ref}\,0{,}4092 \tag{B.6}$$

Sendo que a variável para cálculo a ser utilizada é a vazão molar, por facilidade de programação das equações, sendo a vazão volumétrica em condições de referência utilizada para medidas. A temperatura já é a própria grandeza medida e utilizada para gestão de escoamento em gasodutos, e será mantida sem modificações.

B.1.1 Conservação de massa

A primeira equação de conservação, para escoamento unidirecional, é descrita como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(\rho u) = 0 \tag{B.7}$$

Substituindo o primeiro termo com a Eq. B.3 e o segundo termo com a Eq. B.5, temos:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P\,M_W}{z\,R\,T}\right)+\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\dot{n}\,M_W}{A}\right)=0 \tag{B.8}$$

Considerando-se baixa variação da massa molar do gás no espaço e no tempo, característica de malha de gasoduto, esta equação pode ser simplificada como:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{z\,R\,T}\right)+\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\dot{n}}{A}\right)=0 \tag{B.9}$$

Considerando que a área de escoamento tem baixa variação no espaço, dada baixo variação do diâmetro interno nas tubulações, este equacionamento pode ser descrito como:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{z\,R\,T}\right)+\frac{1}{A}\frac{\partial\,\dot{n}}{\partial\,s}=0 \tag{B.10}$$

Que é a forma da conservação de massa resolvida neste trabalho. Por se tratar de uma equação diferencial, ela ainda não possui solução simples e depende de discretização para se tornar algébrica, procedimento a ser desenvolvido em B.2.

B.1.2 Conservação da quantidade de movimento

A segunda equação de conservação utilizada é a de quantidade de movimento, que relaciona a queda de pressão num escoamento com a velocidades e geometria, além de outros efeitos. Esta equação é dada a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u\right)+\frac{\partial}{\partial s}\left(\rho u^2\right)+\frac{\partial P}{\partial s}=-\frac{f\,\rho u\,|u|}{2D}-\rho\,g\,\mathrm{sen}\theta \tag{B.11}$$

Com a utilização da Eq. B.5 no primeiro, segundo e quarto termos e da Eq. B.3 no quinto termos, a equação se torna:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\dot{n}\,M_W}{A}\right)+\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\dot{n}\,M_W\,u}{A}\right)+\frac{\partial P}{\partial s}=-f\frac{\dot{n}\,M_W}{2\,A\,D}\,|u|\;-\;\frac{P\,M_W}{z\,R\,T}\,g\,\mathrm{sen}\theta \tag{B.12}$$

Mais uma vez considerando que a massa molecular do gás varia pouco no espaço e no tempo, e também que o diâmetro da tubulação tem baixa variação no espaço, a equação se torna:

$$\frac{\partial \dot{n}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(\dot{n}\,u) + \frac{A}{M_W}\frac{\partial P}{\partial s} = -f\frac{\dot{n}}{2\,D}\,|u| \;-\; \frac{A\,P}{z\,R\,T}\,g\,\text{sen}\theta \tag{B.13}$$

O termo convectivo ainda está presente no equacionamento, e é difícil de ser resolvido por apresentar derivada de uma variável não avaliada diretamente. Para este caso, são utilizados cálculos a partir das variáveis avaliadas para cálculo destas.

B.1.3 Conservação da energia

Por se tratar de um problema de escoamento onde os efeitos térmicos são importantes, é utilizada a equação de conservação da energia para a solução do escoamento, dada a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(h + \frac{u^2}{2} - \frac{P}{\rho}\right)\rho\right] + \frac{\partial}{\partial s}\left[\left(h + \frac{u^2}{2}\right)\rho u\right] = Q - \rho\,u\,g\,\text{sen}\theta \tag{B.14}$$

Em procedimento similar as demais conservações, no primeiro termo utilizamos a Eq. B.3 e no segundo e quarto termos utilizamos a Eq. B.5, tornando a equação baseada nas variáveis de interesse:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(h + \frac{u^2}{2} - \frac{z\,R\,T}{M_W}\right)\frac{P\,M_W}{z\,R\,T}\right] + \frac{\partial}{\partial s}\left[\left(h + \frac{u^2}{2}\right)\frac{\dot{n}\,M_W}{A}\right] = Q - \frac{\dot{n}\,M_W}{A}\,g\,\text{sen}\theta \tag{B.15}$$

Considerando baixa a variação da massa molecular do gás no espaço e tempo, além de baixa variação da área de escoamento no espaço temos a simplificação:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(h + \frac{u^2}{2} - \frac{z\,R\,T}{M_W}\right)\frac{P}{z\,R\,T}\right] + \frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial s}\left[\left(h + \frac{u^2}{2}\right)\dot{n}\right] = \frac{Q}{M_W} - \frac{\dot{n}}{A}\,g\,\text{sen}\theta \tag{B.16}$$

Mais uma vez aparecem variáveis indiretas no equacionamento, como a velocidade local. Apesar de ser inconveniente, estas variáveis serão tratadas apenas na etapa de discretização das equações de conservação, de modo a serem incluídas em procedimento iterativo de solução.

B.1.4 Conservação de espécies

Como o escoamento de gás é caracterizado neste trabalho com a composição deste, se faz necessário o uso da conservação das espécies, descrita pelo equacionamento a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\, X_i\right) + \frac{\partial}{\partial s}\left(\rho\, u\, X_i\right) = 0 \tag{B.17}$$

Com a alteração proposta para a conservação de massa, ou seja, com a Eq. B.3 no primeiro termo e a Eq. B.5 no segundo termo, o equacionamento se torna:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P\, M_W}{z\, R\, T}\, X_i\right) + \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\dot{n}\, M_W}{A}\, X_i\right) = 0 \tag{B.18}$$

Novamente, considerando baixas as variações de massa molar no tempo e no espaço, e baixa a variação da área de escoamento no espaço, temos:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{z\, R\, T}\, X_i\right) + \frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial s}\left(\dot{n}\, X_i\right) = 0 \tag{B.19}$$

Neste equacionamento aparecem, pela primeira vez, informações a respeito da composição do gás escoado, até então descrito apenas pela massa molar. A solução deste transporte da composição no escoamento também tem sua solução proposta numericamente.

B.2 Discretização das equações de conservação

No formato de equações diferenciais parciais, mesmo após a alteração das variáveis avaliadas, as equações de conservação não têm solução para problemas de engenharia. Uma forma de permitir a sua solução de maneira algébrica é discretizando estas equações diferenciais. Diferentes formas de discretização são descritas na literatura, como método dos elementos finitos ou diferenças finitas, e para problemas de escoamento o método dos volumes finitos é o mais utilizado.

Para tanto é definido um volume de controle (VC) para a integração da equação da conservação, onde existem superfícies de controle (SC) por onde a propriedade, como massa ou energia, entra e saem do respectivo volume. Como são necessárias avaliações de derivadas no espaço, são definidos os pontos como sendo

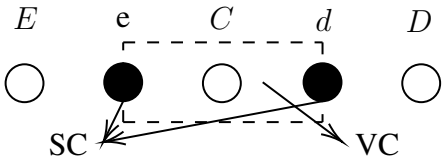


Figura B.1: Esquema de índice das variáveis num volume de controle.

A Fig. B.1 mostra como pode ser colocado um volume de controle num duto, sendo que ao seu lado são encontrados outros volumes de controle, percorrendo todo o duto. O ponto central C é o centro geométrico do volume, e propriedades do volume são avaliadas neste ponto. As SC são locais onde acontecem fluxos, sendo uma a direita d e outra à esquerda e.

Para o caso de serem necessárias variáveis de volumes de controle adjacentes, são utilizados índices como E e D. Como são computadas variáveis no centro do VC, quando estas são necessárias em avaliações nas SC pode ser necessário algum método de interpolação para se determinar um valor nestas locações.

Neste caso é utilizado método de interpolação conhecido como *upwind*, que carrega o valor com a direção de escoamento. Este método tem como características uma melhora na estabilidade numérica de soluções e simplicidade, porém com uma maior difusividade dos resultados.

B.2.1 Discretização da geometria de escoamento

Para a discretização das equações de conservação se faz necessário definir uma serie de pontos onde as variáveis serão avaliadas. Então, para a definição do problema de escoamento a ser resolvido, inicialmente é definida serie de pontos intermediários escoamento. Uma maneira de definir estes pontos é mostrado na Fig. B.2.

Para problemas de escoamento em geral as variáveis de escoamento são avaliadas em pontos diferentes das demais, numa configuração denominada de malha defasada. Nesta abordagem, variáveis como pressão, temperatura e composição são alocadas nos nós definidos na discretização, enquanto que as vazões molares são definidas no ponto médio entre estes nós.

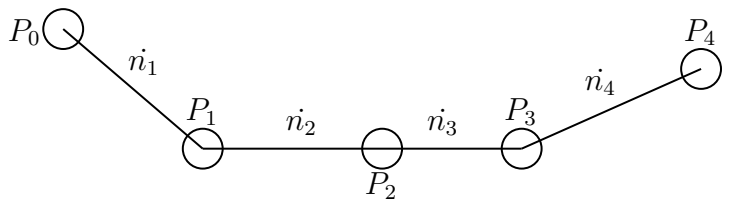


Figura B.2: Esquema de colocação de variáveis numa geometria composta por 5 pontos.

Esta discretização pode ser colocada em forma de tabela, onde são definidas as propriedades importantes para o escoamento do gás, como demonstrado na Tab. B.1

Nome	L $[m]$	dy $[m]$	D_{in} $[m]$	Rug $[m]$	U $[W/m^2K]$	T_{amb} $[°C]$
Nome$_0$						
...						
Nome$_i$						

Tabela B.1: Modelo de tabela para informações da geometria de escoamento.

Com estas definições já é possível tornar as equações de conservação algébricas, num procedimento a ser demonstrado a seguir.

B.2.2 Conservação da massa

Neste caso o volume é dado na Fig. B.3. Como descrito anteriormente, as variáveis são avaliadas em diferentes posições, e são tratadas por índices a depender de onde são avaliadas.

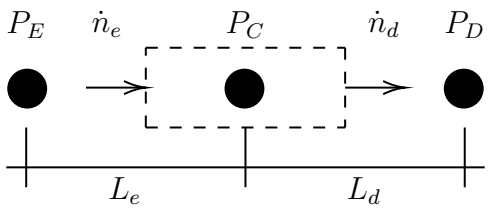


Figura B.3: Volume de controle para discretização da equação de conservação de massa.

O equacionamento dado é:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{z\,R\,T}\right) + \frac{1}{A}\frac{\partial \dot{n}}{\partial s} = 0 \tag{B.20}$$

O segundo termo da Eq. B.10 pode ser facilmente trabalhado e, utilizando esquema implícito de interpolação temporal aliado a área ponderada pela distância a da SC até o centro do VC, apresenta a forma:

$$\frac{1}{A}\frac{\partial \dot{n}}{\partial s} = \frac{\dot{n}_d^{t+1} - \dot{n}_e^{t+1}}{A_e\,L_2/2 + A_d\,L_d/2} \tag{B.21}$$

sendo que o supra-índice $t+1$ indica o intervalo de integração temporal que está sendo calculado. Enquanto que o primeiro termo depende da interpolação temporal a ser utilizada. Em se utilizando a interpolação temporal de primeira ordem, temos para o primeiro termo:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{z\,R\,T}\right) = \frac{1}{\Delta t}\left(\frac{P_C^{t+1}}{z_C^{t+1}\,R\,T_C^{t+1}} - \frac{P_C^{t}}{z_C^{t}\,R\,T_C^{t}}\right) \tag{B.22}$$

Com isso os termos podem ser unidos e referenciados a qualquer ponto da geometria discretizada do escoamento, sendo descrito como:

$$\frac{1}{\Delta t}\left(\frac{P_i^{t+1}}{z_i^{t+1}\,R\,T_i^{t+1}} - \frac{P_i^{t}}{z_i^{t}\,R\,T_i^{t}}\right) + \frac{\dot{n}_{i+1}^{t+1} - \dot{n}_i^{t+1}}{A_i\,L_i/2 + A_{i+1}\,L_{i+1}/2} = 0 \tag{B.23}$$

onde i é o nó avaliado e $i{+}1$ é o nó em sequência deste. Como a malha para escoamento é defasada, são utilizados os fluxos antes e depois do nó em avaliação. Esta equação pode ser interpretada como "a variação da quantidade de massa dentro do VC é ligada a quantidade de massa que entra e sai através das superfícies de controle no intervalo de tempo".

Como todas as variáveis intermediarias, como a compressibilidade, são avaliadas em $t+1$, é necessário processo iterativo para convergência. Por outro lado, a estabilidade da solução se dá para intervalos de integração bastante grandes.

B.2.3 Conservação da quantidade de movimento

Para a conservação da quantidade de movimento, é mais interessante colocar o VC com a variável de escoamento no seu interior e demais variáveis nas SC, como mostrado na Fig. B.4.

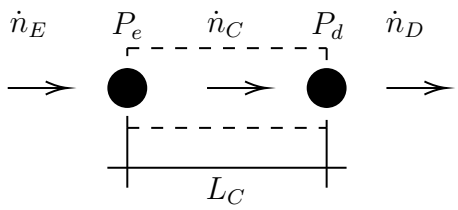


Figura B.4: Volume de controle para discretização da equação de conservação da quantidade de movimento.

Com a equação já nas variáveis de interesse

$$\frac{\partial \dot{n}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(\dot{n}\,u) + \frac{A}{M_W}\frac{\partial P}{\partial s} = -f\frac{\dot{n}}{2\,D}\,|u| - \frac{A\,P}{z\,R\,T}\,g\,\text{sen}\theta \tag{B.24}$$

a integração do primeiro termo é dada por:

$$\frac{\partial \dot{n}}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t}\left(\dot{n}_C^{t+1} - \dot{n}_C^{t}\right) \tag{B.25}$$

O segundo termo pode ser descrito de forma similar, mas agora com variáveis avaliadas no tempo de cálculo, mas baseada na iteração anterior, indicadas pela modificação ˆ,como:

$$\frac{\partial}{\partial s}\left(\dot{n}\, u\right) = \frac{1}{L_C}\, \widehat{u}_C^{t+1}\, \left(\dot{n}_d^{t+1} - \dot{n}_e^{t+1}\right) \tag{B.26}$$

Como os termos $\dot{n}_d$ e $\dot{n}_d$ não são avaliados na SC, eles precisam ser interpolados. Uma solução mais estável é a utilização de método *upwind*, onde o valor é dado pela variável disponível a montante. Neste caso:

$$\dot{n}_e = \begin{cases} \dot{n}_E & \text{se } \dot{n}_C > 0 \\ \dot{n}_E & \text{se não} \end{cases} \tag{B.27}$$

e

$$\dot{n}_d = \begin{cases} \dot{n}_C & \text{se } \dot{n}_C > 0 \\ \dot{n}_D & \text{se não} \end{cases} \tag{B.28}$$

A do terceiro termo pode ser dada por:

$$\frac{A}{M_W}\frac{\partial P}{\partial s} = \frac{A}{M_{W_c}^{t+1}}\frac{P_d^{t+1} - P_e^{t+1}}{L_C} \tag{B.29}$$

Como a variável M_{W_c} não é computado nesta posição, apenas em e ou d, é necessária interpolação para esta posição. Isto pode ser conseguido com interpolação de primeira ou segunda ordem. Visto que as variações de M_W são baixas no espaço e no tempo, esta interpolação faz pouca diferença, e será adotada *upwind*:

$$M_{W_C}^{t+1} \begin{cases} M_{W_e}^{t+1} & \text{se } \dot{n}_C > 0 \\ M_{W_d}^{t+1} & \text{se não} \end{cases} \tag{B.30}$$

O quarto termo, de perda de carga viscosa, pode ser dado por:

$$f\frac{\dot{n}}{2\,D}\left|u\right| = \widehat{f}_C^{t+1}\,\frac{\left|\widehat{u}_C^{t+1}\right|}{2\,D}\,\dot{n}_C^{t+1} \tag{B.31}$$

Aqui o fator de fricção f também é definido com base na iteração anterior, e informações não computadas nas SC necessárias seguem o conceito do *upwind*. O quinto, e último, termo, fica:

$$\frac{A\,P}{z\,R\,T}\,g\,\text{sen}\theta = \frac{A_C^{t+1}\,P^{t+1}}{z_C^{t+1}\,R\,T_C^{t+1}}\,g\,\text{sen}\theta_C \tag{B.32}$$

Onde P_C e T_C são obtidos a partir de interpolação pelo método *upwind*. Com esta definição, a conservação da quantidade de movimento pode ser colocada em sua forma algébrica como:

$$\begin{aligned}\frac{L_i}{\Delta t}\left(\dot{n}_i^{t+1}-\dot{n}_i^{t}\right)+\widehat{u}_i^{t+1}\,\left(\dot{n}_{I+1}^{t+1}-\dot{n}_I^{t+1}\right)+\frac{A}{M_{W_i}^{t+1}}\left(P_{i+1}^{t+1}-P_i^{t+1}\right) = -L_i\widehat{f}_i^{t+1}\,\frac{\left|\widehat{u}_i^{t+1}\right|}{2\,D_i}\,\dot{n}_i^{t+1} \\ -\frac{A_i\,P_I^{t+1}}{z_I^{t+1}\,R\,T_I^{t+1}}\,g\,\Delta y_i\end{aligned} \tag{B.33}$$

onde

$$I = \begin{cases} i & \text{se } \dot{n}_i > 0 \\ i+1 & \text{se não} \end{cases} \tag{B.34}$$

B.2.4 Conservação da energia

Continuando com os esforços de tornar as equações de conservação algébricas, segue a equação da conservação de energia. Ela indica, basicamente, que a quantidade de energia dentro do VC depende de transferência entre as SC e da convecção, descrita a seguir.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(h+\frac{u^2}{2}-\frac{z\,R\,T}{M_W}\right)\frac{P}{z\,R\,T}\right]+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial s}\left[\left(h+\frac{u^2}{2}\right)\dot{n}\right]=\frac{Q}{M_W}-\frac{\dot{n}}{A}\,g\,\text{sen}\theta \tag{B.35}$$

Como aqui a variável de interesse, a temperatura, é colocada na posição da pressão, o VC é similar ao caso de conservação de massa, mostrado na Fig. B.3. Como as velocidades de escoamento são baixas, o termo cinético do equacionamento é desprezado. O primeiro termo pode ser descrito como:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(h+\frac{u^2}{2}-\frac{z\,R\,T}{M_W}\right)\frac{P}{z\,R\,T}\right]=\frac{\widehat{\rho}_C^{t+1}}{\Delta t}\left(h_C^{t+1}-h_C^t\right)-\frac{1}{\Delta t}\frac{P_C^{t+1}}{M_{W_C}^{t+1}} \tag{B.36}$$

Esta equação está dada em termos da entalpia específica, e é interessante alterar para temperatura, de forma a lineariza-la. Isto pode ser feito com a derivada descrita a seguir:

$$h_C^{t+1}-h_C^t=\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_C^{t+1}\left(T_C^{t+1}-T_C^t\right) \tag{B.37}$$

e com isso o termo se torna:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(h+\frac{u^2}{2}-\frac{z\,R\,T}{M_W}\right)\frac{P}{z\,R\,T}\right]=\frac{\widehat{\rho}_C^{t+1}}{\Delta t}\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_C^{t+1}\left(T_C^{t+1}-T_C^t\right)-\frac{1}{\Delta t}\frac{P_C^{t+1}}{M_{W_C}^{t+1}} \tag{B.38}$$

Para o segundo termo, é necessário mais uma vez avaliar as variáveis em pontos onde não são armazenadas. Isso será feito com uso do método *upwind*. Neste caso, temos:

$$\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial s}\left[\left(h+\frac{u^2}{2}\right)\dot{n}\right]=\frac{1}{A_C}\frac{2}{L_e+L_d}\left(\widehat{\dot{n}}_d^{t+1}\,h_d^{t+1}-\widehat{\dot{n}}_e^{t+1}\,h_e^{t+1}\right) \tag{B.39}$$

Com a mesma linearização proposta para o primeiro termo, mas agora no espaço, o equacionamento se torna:

$$\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial s}\left[\left(h+\frac{u^2}{2}\right)\dot{n}\right]=\frac{1}{A_C}\frac{2}{L_e+L_d}\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_C^{t+1}\left(\widehat{\dot{n}}_d^{t+1}T_d^{t+1}-\widehat{\dot{n}}_e^{t+1}T_e^{t+1}\right) \tag{B.40}$$

O termo de troca de calor, ou terceiro termo do equacionamento, pode ser tratado com o uso do coeficiente global de troca térmica, desprezando a capacidade térmica do duto:

$$\frac{Q}{M_W}=\frac{\left(T_{amb}-T_C^{t+1}\right)U\,A_{sup}}{M_W\,L} \tag{B.41}$$

para o quarto e último termo, temos:

$$\frac{\dot{n}}{A}\,g\,\text{sen}\theta=\dot{n}_C^{t+1}\frac{\Delta y}{A\,L} \tag{B.42}$$

Dessa forma, o equacionamento fica descrito como:

$$\frac{A_i}{1}\frac{L_i+L_{i+1}}{2}\left[\frac{\widehat{\rho}_i^{t+1}}{\Delta t}\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_i^{t+1}\left(T_i^{t+1}-T_i^t\right)-\frac{1}{\Delta t}\frac{P_i^{t+1}}{M_{W_i}^{t+1}}\right]+$$
$$\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_i^{t+1}\left(\widehat{\dot{n}}_{I+1}^{t+1}T_{I+1}^{t+1}-\widehat{\dot{n}}_I^{t+1}T_I^{t+1}\right)=\left(T_{amb}-T_i^{t+1}\right)U\,A_{sup}+\dot{n}_I^{t+1}\Delta y \tag{B.43}$$

Os termos com a modificação ˆ são avaliados na iteração anterior.

B.2.5 Conservação das espécies

O problema de escoamento é tratado como composicional, o que significa que existem diferentes componentes do gás a serem acompanhados durante seu deslocamento. Em não se considerando difusão, o equacionamento se torna:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{z\,R\,T}\,X\right)+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial s}\left(\dot{n}\,X\right)=0 \tag{B.44}$$

As variáveis de composição do gás são alocadas como as de pressão, assim o VC é similar ao de conservação de massa. O primeiro termo pode ser tratado como:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{z\,R\,T}\,X\right)=\frac{1}{\Delta t}\left(\widehat{\rho}_C^{t+1}X_C^{t+1}-\rho_C^tX_C^t\right) \tag{B.45}$$

A segunda parte do equacionamento pode ser tratada como:

$$\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial s}\left(\dot{n}\,X\right)=\frac{2}{A\left(L_e+L_d\right)}\dot{n}_C^{t+1}\left(X_d^{t+1}-X_e^{t+1}\right) \tag{B.46}$$

Reescrevendo o equacionamento, já em termos do nó avaliado:

$$\frac{1}{\Delta t}\left(\widehat{\rho}_i^{t+1}X_i^{t+1}-{\rho_i}^tX_i^t\right)+\frac{2}{A_i\left(L_i+L_{i+1}\right)}\left(\widehat{\dot{n}}_{I+1}^{t+1}\,X_{i+1}^{t+1}-\widehat{\dot{n}}_I^{t+1}\,X_i^{t+1}\right)=0 \tag{B.47}$$

B.3 Condições de contorno

O equacionamento trabalhado anteriormente não possibilita a solução do problema de escoamento. Ainda são necessárias formas de se definir condições de contorno. Estas condições

podem ser de pressão definida, vazão definida ou nós intermediários.

B.3.1 Pressão definida

Neste caso, para um ponto inicial do duto, a equação é simplesmente:

$$P_0^{t+1} = f(t) \tag{B.48}$$

e para um ponto final:

$$P_N^{t+1} = f(t) \tag{B.49}$$

onde N é a quantidade de pontos de pressão definidos para o duto.

B.3.2 Vazão definida

De forma similar a descrita para pressão definida, para o trecho de inicial do duto pode ser escrita a condição de contorno:

Neste caso, para um ponto inicial do duto, a equação é simplesmente:

$$\dot{n}_1^{t+1} = f(t) \tag{B.50}$$

e para um ponto final:

$$\dot{n}_N^{t+1} = f(t) \tag{B.51}$$

Também bastante simples.

B.3.3 Temperatura e composição

Também é necessário, para pontos onde a vazão ou a temperatura é definida, definir a temperatura e composição deste ponto, que poderá ser utilizada nos cálculos a depender da direção de escoamento. Neste caso o equacionamento se torna para temperatura no ponto inicial:

$$T_1^{t+1} = f(t) \tag{B.52}$$

ou para um ponto final:

$$T_N^{t+1} = f(t) \tag{B.53}$$

enquanto que para a composição, devem ser colocadas todas as composições como

$$X_1^{t+1} = f(t) \tag{B.54}$$

ou para um ponto final:

$$X_N^{t+1} = f(t) \tag{B.55}$$

Nestes casos, como a utilização do equacionamento depende da direção de fluxo, apenas uma de cada par de equações é utilizada.

B.4 Equipamentos submarinos

Para a modelagem de malhas de gasodutos são necessárias condições de contorno para interligação de dutos. Fisicamente estes equipamentos são chamados de PLEMs, ILTs ou *manifolds*. Na modelagem de malha são tratados como nós intermediários.

Nesta condição de contorno são definidas como iguais as pressões dos dutos que a compartilham. No caso de mais dutos interligados a um mesmo nó intermediário, são geradas mais equações para a equivalência da pressão, num total de uma para cada par de dutos, de forma que as equações sejam linearmente independentes. Neste caso temos que:

$$P_i^{t+1} = P_j^{t+1} \tag{B.56}$$

Assim, no caso de nó intermediário com 3 dutos interligados, faz se a pressão do duto 1 equivalente à do duto 2 e do duto 3.

B.4.1 Conservação de massa

Além destas equações para pressão, temperatura e composição, ainda é gerada equação para a conservação de massa no nó intermediário. Para esta avaliação, é necessário definir o volume deste nó intermediário. Uma vez que a conservação de massa depende da massa no VC.

A Fig. B.5 mostra um desenho para este caso.

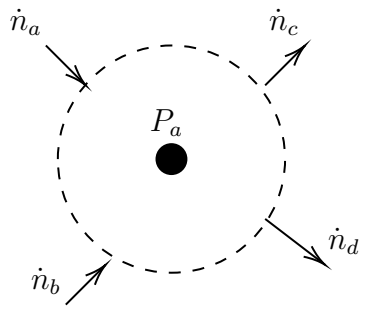


Figura B.5: Volume de controle para discretização da equação de conservação de massa para nó intermediário.

Aqui a principal diferença é que existem mais fluxos entrando e saindo do VC, quando que para nó do duto só haviam dois fluxos. Partindo-se de equacionamento similar, dado abaixo:

$$\frac{1}{\Delta t}\left(\frac{P_i^{t+1}}{z_i^{t+1}\,R\,T_i^{t+1}} - \frac{P_i^t}{z_i^t\,R\,T_i^t}\right) + \frac{\dot{n}_{i+1}^{t+1} - \dot{n}_i^{t+1}}{A_i\,L_i/2 + A_{i+1}\,L_{i+1}/2} = 0 \tag{B.57}$$

Uma modificação pode ser proposta para:

$$\frac{Vol_i}{\Delta t}\left(\frac{P_i^{t+1}}{z_i^{t+1}\,R\,T_i^{t+1}} - \frac{P_i^t}{z_i^t\,R\,T_i^t}\right) + \sum \dot{n}_{in}^{t+1} - \sum \dot{n}_{out}^{t+1} = 0 \tag{B.58}$$

B.4.2 Conservação da energia

Não é necessário equacionamento para conservação da quantidade de movimento neste nó intermediário, por já ser considerada a equivalência nas pressões. Entretanto para conservação de energia e de espécies também se faz necessário o equacionamento neste nó intermediário.

O volume de controle utilizado é similar ao da conservação de massa, mostrado na Fig. B.5. Novamente é uma modificação do equacionamento encontrado para o duto, mas agora com a possibilidade de diferentes entradas e saídas de energia. A equação original para tudo tem a forma:

$$\begin{aligned} &\frac{A_i}{1}\frac{L_i + L_{i+1}}{2}\left[\frac{\widehat{\rho}_i^{t+1}}{\Delta t}\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_i^{t+1}\left(T_i^{t+1} - T_i^t\right) - \frac{1}{\Delta t}\frac{P_i^{t+1}}{M_{W_i}^{t+1}}\right] + \\ &\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_i^{t+1}\left(\widehat{\dot{n}_{I+1}}\,T_{I+1}^{t+1} - \widehat{\dot{n}}_I T_I^{t+1}\right) = \left(T_{amb} - T_i^{t+1}\right) U\,A_{sup} + \dot{n}_I^{t+1}\Delta y \end{aligned} \tag{B.59}$$

Agora, considerando que são possíveis diferentes entradas e saídas de fluido e que o ponto não apresenta área superficial para troca térmica relevante, a equação toma a seguinte forma:

$$\frac{A_i}{1}\frac{L_i+L_{i+1}}{2}\left[\frac{\widehat{\rho}_i^{t+1}}{\Delta t}\left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_i^{t+1}\left(T_i^{t+1}-T_i^t\right)-\frac{1}{\Delta t}\frac{P_i^{t+1}}{M_{W_i}^{t+1}}\right]+ \\ \left.\widehat{\frac{\partial h}{\partial T}}\right|_i^{t+1}\left(\sum\widehat{\dot{n}}_{in}^{t+1}T_{in}^{t+1}-\sum\widehat{\dot{n}}_{out}^{t+1}T_{out}^{t+1}\right)=\left(T_{amb}-T_i^{t+1}\right)U\,A_{sup}+\dot{n}_I^{t+1}\Delta y \tag{B.60}$$

B.4.3 Conservação de especies

A última equação a ser descrita para nós intermediários é a de conservação de espécies. Ela segue o mesmo padrão dos casos anteriores, sendo generalizada para aceitar mais entradas e saídas de fluxo, também utilizando o volume definido. Partindo-se do equacionamento anterior:

$$\frac{1}{\Delta t}\left(\widehat{\rho}_i^{t+1}X_i^{t+1}-{\rho_i}^tX_i^t\right)+\frac{2}{A_i\left(L_i+L_{i+1}\right)}\left(\widehat{\dot{n}}_{I+1}^{t+1}X_{i+1}^{t+1}-\widehat{\dot{n}}_I^{t+1}X_i^{t+1}\right)=0 \tag{B.61}$$

torna-se:

$$\frac{Vol_i}{\Delta t}\left(\widehat{\rho}_i^{t+1}X_i^{t+1}-{\rho_i}^tX_i^t\right)+\left(\sum\widehat{\dot{n}}_{in}^{t+1}X_{in}^{t+1}-\sum\widehat{\dot{n}}_{out}^{t+1}X_{out}^{t+1}\right)=0 \tag{B.62}$$

onde o valor de I depende da direção de escoamento, pela interpolação do tipo *upwind*.

APÊNDICE C – MÉTODO NUMÉRICO

Com as equações governantes discretizadas e com variáveis convenientes colocadas no apêndice B é possível propor um procedimento numérico para solução destas equações. A forma proposta no presente trabalho utiliza cálculo matricial para solução do problema de escoamento.

Na literatura existem diferentes métodos de solução para escoamento, a depender das características deste escoamento. São disponíveis métodos ponto por ponto, linha por linha e diretos. Para o presente trabalho é proposto método implícito com solução linha por linha, que equivale a método direto quando o problema é unidirecional.

Inicialmente é definido vetor com as variáveis de escoamento a serem avaliadas. Isso depende da geometria discretizada dos gasodutos e da quantidade de gasodutos. Com um gasoduto tendo n elementos descritos na Tab. B.1, temos n variáveis de fluxo e $n+1$ variáveis de pressão, temperatura e composição. Como a composição influencia pouco na solução do escoamento, ele é resolvido separadamente. Estas variáveis do escoamento são alocadas na seguinte sequência:

$$[B] = [\, P_0 \, T_0 \, \dot{n}_1 \, P_1 \, T_1 \, \ldots \, \dot{n}_n \, P_n \, T_n \,]^T \tag{C.1}$$

e as de composição:

$$[B_{comp}] = [X_0 \, X_1 \, \ldots \, X_n]^T \tag{C.2}$$

Como o problema de escoamento é uma malha de gasodutos, então existem diferentes dutos a serem avaliados. Nessa condição, o tamanho do vetor B aumenta. Para o caso de malha composta por três dutos, a, b e c respectivamente, discretizados em n, m e o trechos, o vetor se torna:

$$[B] = \left[\, P_0^a \, T_0^a \, \dot{n}_1^a \ldots \dot{n}_n^a \, P_n^a \, T_n^a \, P_0^b \, T_0^b \, \dot{n}_1^b \ldots \dot{n}_m^b \, P_m^b \, T_m^b \, P_0^c \, T_0^c \, \dot{n}_1^c \ldots \dot{n}_o^c \, P_o^c \, T_c \,\right]^T \tag{C.3}$$

Sendo o vetor para a composição similarmente construído para cada um dos componentes, com menor dimensão quando comparado ao vetor das variáveis de escoamento. Com o vetor das variáveis montado, agora é vez de montar a matriz de cálculo dos seus valores no próximo instante de tempo. Nesta abordagem o sistema de equações a ser resolvido é dado por:

$$[A]\,[B] = [C] \tag{C.4}$$

Onde as matrizes A e C são construídas a partir das equações algébricas desenvolvidas no apêndice B. Exemplificando como fazer esta montagem das matrizes A e C, podemos ver que a conservação de massa, no ponto 1, pode ser descrita, para fluxo maior que zero, como:

$$\frac{Vol_1}{\Delta\, t}\,\frac{1}{z_1^{t+1}\, R\, \hat{T}_1^{t+1}}\, P_1^{t+1} + \dot{n}_2^{t+1} - \dot{n}_1^{t+1} = \frac{Vol_1}{\Delta\, t}\,\frac{1}{z_1^{t}\, R\, T_1^{t}}\, P_1^{t} \tag{C.5}$$

Nesta configuração os parâmetros que acompanham as variáveis a serem calculadas são constantes dentro da interação, e o escoamento se torna um sistema linear de equações. Para o caso apresentado na Fig. B.2, com vazão definida na entrada do duto e pressão na saída, a matriz apresenta a seguinte forma geral:

$$\begin{bmatrix}
CQM_1 & & & & & & & & & & & & & \\
 & CM_1 & & & & & & & & & & & & \\
 & & CE_1 & & & & & & & & & & & \\
 & & & CQM_2 & & & & & & & & & & \\
 & & & & CM_2 & & & & & & & & & \\
 & & & & & CE_2 & & & & & & & & \\
 & & & & & & CQM_3 & & & & & & & \\
 & & & & & & & CM_3 & & & & & & \\
 & & & & & & & & CE_3 & & & & & \\
 & & & & & & & & & CQM_4 & & & & \\
CCQ_e & & & & & & & & & & & & & \\
 & & & & & & & & & & CCP_s & & & \\
CCT_e & & & & & & & & & & & & & \\
 & & & & & & & & & & & & & CCT_s
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} P_0 \\ T_0 \\ \dot{n}_1 \\ P_1 \\ T_1 \\ \dot{n}_2 \\ P_2 \\ T_2 \\ \dot{n}_3 \\ P_3 \\ T_3 \\ \dot{n}_4 \\ P_4 \\ T_4 \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \end{bmatrix} \tag{C.6}$$

Onde as CQM_i são as equações de conservação da quantidade de movimento no ponto i, CM_i são as equações de conservação de massa, CE_i são as conservações de energia, CCQ_e é a condição de contorno de vazão definida na entrada, CCP_s é a condição de contorno de pressão definida na saída CCT_i é a condição de contorno de temperatura na entrada e saída do duto.

São quatorze variáveis no total, e são propostas quatorze equações no total, sendo três de conservação de massa, três de conservação de energia, quatro de conservação da quantidade de movimento, uma de condição de contorno na entrada de vazão definida e mais uma na saída de pressão definida, mais duas de condição de contorno da temperatura, uma na entrada e outra na saída. Como:

$$3 + 3 + 4 + 1 + 1 + 2 = 14 \tag{C.7}$$

do ponto de vista matemático o sistema de equações tem solução. Esta construção pode ser estendida para uma maior quantidade de dutos e uma divisão mais fina dos dutos, com uma quantidade maior de variáveis computadas, sendo limitada pela memória necessária ao processamento e, principalmente, pela velocidade de processamento desejada.

Por se tratar de uma matriz esparsa, a solução do problema linear descrito é conseguida através de método LU esparso, que alia tolerância a diferentes estruturas de matriz e rapidez na inversão de grandes matrizes. Como diversos parâmetros a serem calculados nas matrizes A e C são dependentes das variáveis no instante de tempo $^{t+1}$, o sistema matricial é recalculado e resolvido novamente, até que a diferença entre os vetores antes e após a iteração seja baixa:

$$\sum \left(B_i - \hat{B}_i \right)^2 \leq erro \tag{C.8}$$

Com o erro para convergência sendo definido. Após convergência, são atualizadas variáveis no instante de tempo anterior e o cálculo é repetido para novo incremento no tempo. Esta solução é interessante pois depende apenas de armazenamento de informações do tempo já calculado para o novo cálculo. Esta abordagem é similar a utilizada no filtro de Kalman.

O fluxograma C.1 mostra um caminho seguido na solução do escoamento. Neste procedimento numérico inicialmente são inicializados os valores das variáveis propostas, com valores não coerentes, e intervalo de integração é colocado num valor alto para o cálculo de uma condição de regime.

A partir destes valores são calculados valores de propriedades dependentes destas va-

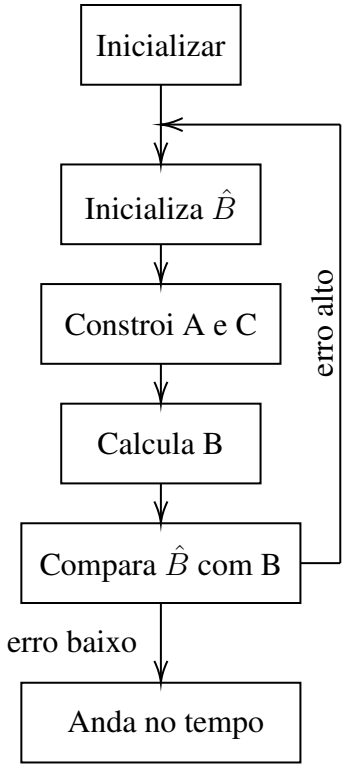


Figura C.1: Fluxograma para cálculo das variáveis de escoamento.

riáveis, como a massa específica e velocidade local. Com base nestas propriedades dependentes é calculado o novo campo de escoamento. Esta solução é tão mais precisa quanto melhor for o valor inicialmente arbitrado para as variáveis.

Com base neste campo de escoamento são atualizados os parâmetros dependentes, sendo então novamente calculado o campo de escoamento, agora com valores atualizados dos parâmetros na iteração. A partir deste campo de escoamento são calculadas as composições em cada nó. Como a composição influencia pouco no escoamento, é possível separar o cálculo, tornando-o mais veloz.

Esse novo campo de escoamento é comparado ao anterior, e no caso de grande diferença, novamente são atualizadas as propriedades dependentes e recalculado o campo de escoamento, num processo iterativo até a convergência.

Após a convergência, o campo de escoamento calculado é utilizado como nova condição inicial. Agora que esta é coerente, o intervalo de integração pode ser colocado com valor adequado, as condições de contorno podem ser alteradas e o cálculo iterativo é repetido quantas vezes forem necessárias. As variáveis que compõem o campo de escoamento inicial e o calculado vão sendo alteradas com o andar do tempo, sendo variáveis de interesse em determinados pontos armazenadas para avaliação posterior.

APÊNDICE D – EQUAÇÃO DE PENG - ROBINSON

A descrição de propriedades dos fluidos em escoamento é necessária como equação de fechamento para o modelo de escoamento proposto. Propriedades como compressibilidade, entalpia e densidade são utilizados para cada um dos elementos da discretização sobre a malha de escoamento proposta. Por se tratar de gás natural, foi optado pela equação cubica de estado proposta por (PENG; ROBINSON, 1976), onde existem formas explicitas de determinação do fator de compressibilidade em função da pressão ou densidade do fluido.

As equações de estado cubicas são derivadas do modelo proposto por Wan der Waals, onde o equacionamento para o volume específico é, de forma generalizada, apresentado na equação D.1.

$$\tilde{v}^3 - \left((b - \frac{RT}{P}\right)\tilde{v}^2 + \left(\frac{a}{P}\right)\tilde{v} - \frac{ab}{P} = 0 \tag{D.1}$$

Neste equacionamento podemos utilizar a definição de compressibilidade de um fluido,

$$Z = \frac{P\tilde{v}}{RT} \tag{D.2}$$

Conseguindo, então, o equacionamento a ser utilizado neste trabalho, baseado na compressibilidade do fluido.

$$Z^3 - \left(1 - \frac{b\,P}{R\,T}\right)Z^2 + \left(\frac{aa,P}{R^2a,T^2}\right)Z - \frac{aa,ba,P^2}{(Ra,T)^3} = 0 \tag{D.3}$$

Onde as variáveis a e b dependem da composição do fluido em estudo. Por se tratar de uma equação cubica sempre existe uma solução real e duas complexas. Para melhoria das características previstas para o gás natural, principalmente para temperaturas e pressões próximas ao ponto crítico, foi proposta modificação que é denominada equação de *Peng & Robinson*.

$$\left(P + \frac{\alpha a}{\tilde{v}^2 + 2b\tilde{v} - b^2}\right)(\tilde{v} - b) = RT \tag{D.4}$$

Que, de forma explicita para a pressão, se torna

$$P = \frac{RT}{\tilde{v} - b} - \frac{\alpha a}{\tilde{v}^2 + 2b\tilde{v} - b^2} \tag{D.5}$$

onde o fator α pode ser descrito por

$$\alpha = \left[1 + \left(0{,}37464 + 1{,}54226 * \omega - 0{,}26992 * \omega^2\right)\left(1 - \sqrt{T_r}\right)\right]^2 \tag{D.6}$$

Através de interpolações e regressões, a e b podem ser descritos como

$$a = 0{,}45724\frac{R^2T_c^2}{P_c} \tag{D.7}$$

$$b = 0{,}07880\frac{RT_c}{P_c} \tag{D.8}$$

onde a equação cubica de estado se torna

$$Z^3 - (1 - B()Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B3) = 0 \tag{D.9}$$

onde

$$A = \frac{\alpha a P}{R^2T^2} \tag{D.10}$$

$$B = \frac{bP}{RT} \tag{D.11}$$

com regra de mistura para diversos componentes

$$(\alpha a)_m = \Sigma\Sigma y_i y_j (\alpha a)_{ij} \tag{D.12}$$

$$(\alpha a)_{ij} = \sqrt{(\alpha a)_i (\alpha a)_j}(1 - k_{ij}) \tag{D.13}$$

$$b_m = \Sigma y_i b_i \tag{D.14}$$

Para solução da equação cubica, é demonstrado para a equação abaixo:

$$x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0 \tag{D.15}$$

geramos quatro coeficientes intermediários:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{3a_1 - a_2^2}{9} \\ R &= \frac{9a_1a_2 - 27a_0 - 2a_2^3}{54} \\ S &= \sqrt[3]{R + \sqrt{Q^3 + R^2}} \\ T &= \sqrt[3]{R - \sqrt{Q^3 + R^2}} \end{aligned} \tag{D.16}$$

onde as soluções são

$$\begin{aligned} x_1 &= S + T - \frac{1}{3}a_2 \\ x_2 &= -\frac{1}{2}(S+T) - \frac{1}{3}a_2 + \frac{1}{2}\sqrt{3}(S-T)i \\ x_3 &= -\frac{1}{2}(S+T) - \frac{1}{3}a_2 - \frac{1}{2}\sqrt{3}(S-T)i \end{aligned} \tag{D.17}$$

onde o parâmetro de iteração binaria, k_{ij}, é tabelado para um determinado par de componentes, assim como as propriedades críticas de cada componente e seu respectivo fator acêntrico.

Para a entalpia, é utilizado o conceito

$$h = \Sigma_{i=1}^{N} z_i h_i^{id} + h^{res} \tag{D.18}$$

onde o primeiro termo é a entalpia referente a parte ideal do comportamento e o segundo a parte real. A parte ideal pode ser descrita como

$$h_i^{id} = \int_{T_{ref}}^{T} C_{pi}^{id} dT \tag{D.19}$$

onde C_{pi}^{id} é a entalpia molar do componente no gás, e pode ser descrita como

$$C_{pi}^{id} = C_{1,i} + C_{2,i}T + C_{3,i}T^2 + C_{4,i}T^3 \tag{D.20}$$

onde $C_{j,i}$ tem seu valor tabelado, e

$$h^{res} = -RT^2 \frac{\partial \ln\varphi}{\partial T} \tag{D.21}$$

onde φ é o coeficiente de fugacidade, calculado por:

$$\ln\varphi \frac{1}{RT} \int_0^V \left(\left(\frac{\partial P}{\partial n} \right)_{TV} - \frac{RT}{V} \right) dV - \ln z \tag{D.22}$$

Na modelagem do presente trabalho não são consideradas trocas de fase.