

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**JOSÉ WANDERLEY SCUCUGLIA**

**SISTEMA DE CONTROLE DE ESCOAMENTO DE GÁS  
NATURAL EM DUTOS DE DISTRIBUIÇÃO COM  
DETECÇÃO DE VAZAMENTOS UTILIZANDO REDES  
NEURAIIS**

Tese submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira

ILHA SOLTEIRA – SP  
AGOSTO DE 2006



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

## **CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Sistema de Controle de Escoamento de Gás Natural em Dutos de Distribuição com Detecção de Vazamentos Utilizando Redes Neurais

**AUTOR:** JOSÉ WANDERLEY SCUCUGLIA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. MARCELO CARVALHO M TEIXEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO M TEIXEIRA  
DEE / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EDVALDO ASSUNÇÃO  
DEE / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO  
DEE / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. IVAN NUNES DA SILVA  
DEE / EESC/USP - São Carlos

Prof. Dr. PAULO MONTEIRO VIEIRA BRAGA BARONE  
Depto. de Física / Universidade Federal de Juiz de Fora

Data da realização: 28 de agosto de 2006.



Presidente da Comissão Examinadora  
Prof. Dr. MARCELO CARVALHO M TEIXEIRA

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

S436s Scucuglia, José Wanderley  
Sistema de controle de escoamento de gás natural em dutos de distribuição com detecção de vazamentos utilizando redes neurais / José Wanderley Scucuglia. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006  
128 p. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,  
2006

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira  
Bibliografia: p. 111-115

1. Automação e controle. 2. Gás natural. 3. Localização de vazamentos.  
4. Redes neurais artificiais.

*À minha esposa Patrícia,*

*Dedico*

*Aos meus pais Roque e Zilda.*

*Aos meus filhos Júlia e Pedro.*

*As minhas irmãs Lucimari e Viviane.*

*Aos meus irmãos Alexandre, Júlio e Rafael.*

*Aos meus tios Alberto e Iraci.*

*A minha família.*

*Aos meus amigos.*

*Ofereço*

*“Escolha um problema,  
chame-o de x  
e resolva-o”*

*(Albert Einstein)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha esposa pelo carinho e compreensão durante esta etapa.

Aos meus filhos, simplesmente por existirem.

Aos meus pais e irmãos e a toda minha família que me acompanharam, com entusiasmo desde os primeiros passos.

Aos meus tios Alberto e Iraci e aos primos Albertinho, Ana e Adriana, que me acolheram no início da minha trajetória.

Aos meus amigos e colegas de trabalho Celso Corrêa, Waldemar Maldonado, Antonio Marcos Reis, Lauro Cruz Jr, Moisés Suzuqui, Willian Rosa, Marco Antonio, Matheus Belin, Renato Guimarães, Isidoro Casal Caminha, Maria Paula Villela, Lillian Villela, Kelen Fagundes, Donato, Uender, Fausto e todos aqueles que de alguma forma deram valiosas contribuições durante a realização deste trabalho.

Ao professor Marcelo Minhoto, pela orientação, confiança e pela amizade em todos os momentos.

Aos professores do curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica da FEIS, pela busca continua da excelência da qualidade dos trabalhos e das condições de realização dos mesmos.

À FINEP pelo suporte financeiro.

## RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de simulação do escoamento e controle de vazamento para uma rede de distribuição de gás natural. De forma a alcançar os objetivos propostos, foram discutidos vários métodos de abordagem do problema de fluxo de gás em redes de gasodutos e definido um método mais adequado ao presente trabalho para compor as rotinas de simulação. Foram abordadas diversas formas de detecção de vazamentos de gás em tubulações, optando-se pelo balanço de volume para esse fim. Para a localização do vazamento ao longo do duto foi proposto e utilizado um sistema de Redes Neurais Artificiais (RNA). O fluxo no interior da rede de dutos é simulado por um sistema de equações diferenciais não lineares obtido para regime permanente, cuja solução para uma dada topologia de rede, fornece pares de valores de pressão e vazão em pontos específicos. A partir de valores de pressão e vazão de saída, obtidos de simulações em condições de vazamentos, é treinada uma RNA com o objetivo de fornecer a localização de eventuais escapes ao longo do duto. Sensores e medidores instalados em pontos estratégicos na rede, fornecem um conjunto de entrada ao algoritmo neural que tem como saída a posição do vazamento para as respectivas condições de operação. Atuando no controle de válvulas eletro-hidráulicas com controladores proporcionais, integrais e derivativos (PID), instaladas na rede, é possível isolar eventuais trechos com vazamento. Para tanto, foi projetado um controlador PID para otimizar o tempo de resposta das respectivas válvulas. De acordo com o modelo proposto de análise, foi desenvolvido um sistema algébrico computacional com interface gráfica amigável, em linguagem *Delphi*, que relaciona rotinas de simulação, algoritmos neurais, e mecanismos remotos de supervisão e controle em tempo real. Ao operador é permitido construir visualmente na tela do computador, através de ícones gráficos, a rede de distribuição desejada, para a qual, o sistema computacional compõe automaticamente um conjunto de equações algébricas lineares correspondente, cuja solução numérica é obtida pelo método de *Newton-Raphson*. Dispõe-se, portanto, de um sistema computacional inteligente, que permite simulação das condições de escoamento do gás na rede de distribuição, detecção e localização de vazamentos e isolamento de trechos, uma ferramenta simples e de baixo custo, porém de vanguarda, para subsidiar a automação da operação de distribuição de gás natural em gasodutos.

## ABSTRACT

A flow simulation and a leaking control computational system has been developed for a gas distribution network pipeline. A discussion of gas flow in pipeline is presented and the lamellar regime of flow has been chosen to be implemented in a simulating routine. Also, a description of gas leaking detection method has been carried out and the balance volume one has been adapted to find out the location of the leaking point in the pipeline a system an artificial neural network (ANN) has been proposed. The flow into the pipeline network is simulated by a system of non-linear differential equation, obtained in a lamellar regime, which solution for any topology given specification provide a couple of values of pressure and flow at discrete points into the domain. From this couple of values of pressure and flow at the ending point of the pipeline, obtained by simulating leaking condition, an ANN is trained with the purpose to provide a location of eventual escapes through the pipeline. Sensors to detect flow located in strategical points of the network pipeline may provide information to feed the neural system which output is the position of leaking point under a such operation conditions. Handle the electro-hydraulic through the proportional integral derivative (PID), installed along the network pipeline, is possible to isolate a pipeline interval with eventual leaking. For this purpose a PID controller system has been developed to minimize the time response of the electro-hydraulic valves. According to the proposed model of analysis, an algebraic computational system with a friendly graphic interface in a Delphi language has been carried out. In this computer program simulating routine, neural algorithmic and remote mechanism of supervision and control in real time, have been related. The user are allowed to build visually at the computer video, through the graphic icons, the desired network pipeline which corresponding system of equation are automatically generated by the computational system and solved by means of the Newton-Raphson method. In that way, an intelligent computational system is disposal, where the flow simulation in a gas network pipeline, the detection, location and isolation of leaking points are allowed. It may be considered that a simple and low cost tool to aid in the automation process of distribution of natural gas in pipeline, is offered in the present report.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Parâmetros do escoamento de fluido em dutos .....	11
Figura 2.2 – Escoamento de fluido em uma porção infinitésima de duto. ....	12
Figura 2.3 – Topologia de uma rede de gás.....	24
Figura 2.4 – Dutos em rede com escoamento de gás.....	26
Figura 3.1 – Fluxograma do método nodal de Newton. ....	33
Figura 3.2 – Características da convergência para o método nodal de Newton.....	36
Figura 3.3 – Interpolação e processo da média. ....	36
Figura 3.4 – Fluxograma método nodal <i>Hardy-Cross</i> . ....	37
Figura 3.5 – Rede de distribuição de gás, malha simples.....	38
Figura 3.6 – Grafo da rede de distribuição de gás. ....	41
Figura 3.7 – Fluxograma do método de malha de Newton. ....	42
Figura 3.8 – Características de convergência para o método de malha.....	44
Figura 3.9 – Fluxograma do método de malha de Newton - <i>Hardy-Cross</i> . ....	45
Figura 3.10 – Rede de escoamento de gás em regime permanente. ....	46
Figura 4.1 – Sistema pneumático de posição. ....	50
Figura 4.2 – Diagrama do sistema pneumático de posicionamento. ....	51
Figura 4.3 – Sistema pneumático de posicionamento. ....	52
Figura 4.4 – Diagrama do mecanismo completo.....	53
Figura 4.5 – Descrição do bloco da válvula proporcional eletro-hidráulica. ....	53
Figura 4.6 – Gráfico da abertura da válvula proporcional x tempo, com ganhos $Ka = 3, 5, 7$ e $9$ . .....	55
Figura 4.7 – Controlador PID em série com a Planta $H(s)$ .....	56
Figura 4.8 – Saída do sistema controlado com um PID. ....	59
Figura 4.9 – Controlador PID em série com a válvula proporcional.....	60
Figura 4.10 – Gráfico da abertura da válvula proporcional com o controlador PID.....	61
Figura 4.11 - Rede de distribuição de gás. ....	62
Figura 5.1- Valores de pressão medidos e previstos pelo modelo transiente. ....	73
Figura 6.1 – Neurônio biológico.....	81
Figura 6.2 - Analogia entre neurônio e seu modelo matemático.....	82
Figura 6.3 – Funções de ativação. ....	82
Figura 6.4 – Representação de um neurônio. ....	83

Figura 6.5 - Rede neural direta MLP.....	85
Figura 6.6 - Estrutura da rede LVQ.....	85
Figura 6.7 - MLP com janela temporal.....	87
Figura 6.8 - Rede neural com atraso no tempo.....	87
Figura 6.9 - Neurônio recorrente.....	89
Figura 6.10 - Topologia de uma rede simétrica.....	89
Figura 6.11 - Redes parcialmente recorrentes.....	90
Figura 6.12 – Gasoduto sob vazamento.....	94
Figura 6.13 – Pressão x Vazamento.....	94
Figura 6.14 – Pressão de saída em gasoduto sob vazamento.....	95
Figura 6.15 – Pressão de saída em função da posição de vazamento.....	95
Figura 7.1 – Abordagem da pesquisa.....	102
Figura 7.2 – Elementos da rede de distribuição de gás natural.....	104
Figura 7.3 – Composição da rede de distribuição.....	105
Figura 7.4 – Atribuição de parâmetros dos elementos.....	105
Figura 7.5 – Simulação de escoamento.....	106
Figura 7.6 – Expansão da rede.....	106
Figura 7.7 – Históricos de pressão e vazão.....	107
Figura 7.8 – Localização de vazamento pela RNA.....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados de vazão e pressão da rede proposta.....	46
Tabela 3.2 – Dados de diâmetro e comprimento dos dutos da rede proposta. ....	47
Tabela 3.3 – Resultados comparativos dos métodos de Newton.....	47
Tabela 4.1 – Parâmetros de válvula eletro-hidráulica. ....	54
Tabela 4.2 - Parâmetros de ajuste pelo método de oscilação de Ziegler-Nichols. ....	58
Tabela 4.3 - Dados de vazão e pressão nos nós.....	63
Tabela 4.4 - Dados dos dutos e resultados obtidos antes e após vazamento no duto 12.....	64

## **LISTA DE SIGLAS**

LVQ: Learning Vector Quantization

MLP: Multi-Layer Perceptron

PDP: Parallel Distributed Processing

PID : Proporcional, Integral e Derivativo.

RNA: Redes Neurais Artificiais

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition.

TDNN: Time Delay Neural Network

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>CAPÍTULO II: MODELAGEM DO ESCOAMENTO DO GÁS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM REGIME PERMANENTE</b> .....	10
2.1 MODELAGEM DO ESCOAMENTO DO GÁS EM DUTOS ISOLADOS .....	10
2.1.1 Equação geral do escoamento do gás em dutos .....	10
2.1.2 Fator de eficiência.....	17
2.1.3 Equações usuais do escoamento do gás em dutos .....	19
2.1.3.1 Equação para baixa pressão .....	19
2.1.3.2 Equação para média pressão.....	20
2.1.3.3 Equação para alta pressão .....	21
2.2 MODELAGEM DO ESCOAMENTO DO GÁS EM REDES DE DUTOS.....	24
2.2.1 Topologia das redes de gás .....	24
2.2.1.1 Matriz de incidência: ramo-nó .....	25
2.2.1.2 Matriz de incidência: ramo-malha.....	25
2.2.2 Formulação nodal de uma rede de gás .....	26
2.2.3 Formulação de uma rede de gás por malha .....	28
2.3 CONCLUSÃO .....	29
<b>CAPÍTULO III: MÉTODOS DE SOLUÇÃO NUMÉRICA DE REDES DE ESCOAMENTO DE GÁS EM REGIME PERMANENTE</b> .....	30
3.1 MÉTODO NODAL DE NEWTON: CASO MULTI-DIMENSIONAL.....	30
3.2 MÉTODO NODAL DE NEWTON: CASO UNI-DIMENSIONAL ( <i>HARDY-CROSS</i> )..	34
3.3 Método de Malha de Newton: Caso Multi-Dimensional.....	38
3.4 MÉTODO DE MALHA DE NEWTON: CASO UNI-DIMENSIONAL ( <i>HARDY-CROSS</i> ) .....	42
3.5 Implementação Numérica dos Métodos de Newton .....	46
3.6 CONCLUSÃO.....	47

<b>CAPÍTULO IV: ISOLAMENTO DE DUTOS COM VÁLVULAS PROPORCIONAIS ELETRO-HIDRÁULICAS CONTROLADAS VIA CONTROLADORES PID.....</b>	<b>49</b>
4.1 MODELAMENTO MATEMÁTICO DE VÁLVULAS ELETRO-PNEUMÁTICAS....	50
<b>4.1.1 Sistema pneumático de posicionamento .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2 Controlador PID .....</b>	<b>56</b>
4.2 MÉTODO DE OSCILAÇÃO DE AJUSTE DE ZIEGLER E NICHOLS DO CONTROLADOR PID .....	57
4.3 CONTROLADOR PID ACOPLADO À VÁLVULA PROPORCIONAL.....	60
4.4 ISOLAMENTO DE DUTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL UTILIZANDO SISTEMA DE POSICIONAMENTO COM CONTROLADOR PID ACOPLADO À VÁLVULA ELETRO-PNEUMÁTICA .....	62
<b>4.4.1 Implementação numérica .....</b>	<b>62</b>
4.5 CONCLUSÃO.....	65
<b>CAPÍTULO V: MÉTODOS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL .....</b>	<b>66</b>
5.1 MÉTODOS UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE VAZAMENTO DE GÁS NATURAL EM DUTOS E REGIME PERMANENTE DE ESCOAMENTO .....	66
<b>5.1.1 Balanço de volume .....</b>	<b>67</b>
<b>5.1.2 Análise de pressão em um ponto do duto .....</b>	<b>69</b>
5.2 MÉTODOS UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE VAZAMENTO DE GÁS NATURAL EM DUTOS EM TRANSIENTES .....	71
<b>5.2.1 Método do desvio de pressão .....</b>	<b>72</b>
<b>5.2.2 Modelo de compensação do balanço de volumes .....</b>	<b>74</b>
5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS .	76
<b>CAPÍTULO VI: LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL UTILIZANDO REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS .....</b>	<b>80</b>
6.1 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS .....	80
6.2 ESTRUTURAS DE REDES NEURAIAS .....	84
<b>6.2.1 Redes diretas (<i>Feedforward</i>) .....</b>	<b>84</b>
<b>6.2.2 <i>Learning Vector Quantization (LVQ)</i> .....</b>	<b>85</b>
6.3 REDES NEURAIAS TEMPORAIS .....	86

6.3.1 Redes não recorrentes .....	86
6.3.2 Redes localmente recorrentes .....	88
6.3.3 Redes totalmente recorrentes .....	89
6.3.4 Redes parcialmente recorrentes .....	89
6.4 TREINAMENTO DE REDE NEURAL .....	91
6.4.1 Treinamento supervisionado .....	91
6.4.1.1 <i>Backpropagation</i> .....	92
6.4.2 Treinamento não-supervisionado .....	92
6.5 LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE GÁS NATURAL EM DUTOS UTILIZANDO RNA .....	93
6.5.1 Características de pressão e vazão em dutos sob vazamento em regime permanente .....	93
6.5.2 Modelo proposto de localização de vazamento utilizando RNA .....	96
6.5.3 Implementação numérica .....	97
6.5.4 Considerações práticas sobre RNA .....	98
<b>CAPÍTULO VII: SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE DA OPERAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>100</b>
7.1 O SISTEMA PROPOSTO .....	101
7.1.1 Modelagem e estratégia de controle .....	102
7.1.2 O Software desenvolvido .....	104
7.2 CONCLUSÃO.....	108
<b>CAPÍTULO VIII: CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>116</b>

## **CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO**

Tecnologias emergentes envolvendo a utilização do gás natural como combustível automotivo e em aplicações residenciais e comerciais têm ampliado cada vez mais a diversificação do uso do gás natural em vários países. O suprimento dessa crescente demanda é limitado, muitas vezes, pela ausência de uma adequada infra-estrutura de transporte. Dentre as opções disponíveis, os gasodutos representam a alternativa mais segura e econômica para o transporte de gás natural. Em todo mundo, grandes recursos têm sido investidos para o desenvolvimento de novas tecnologias para a atividade dutoviária, visando principalmente a melhoria dos níveis de segurança, eficiência e efetividade da operação.

O controle da operação de um gasoduto é uma tarefa bastante complexa. A diversidade de componentes, aliada às grandes distâncias envolvidas, impõe a necessidade de um monitoramento permanente das condições operacionais. A obtenção de informação precisa e confiável sobre as condições da rede representa papel chave na operação dos gasodutos, não só com o propósito de manter a eficiência operacional, mas, em particular, para a minimização dos riscos associados a possíveis acidentes, como por exemplo, vazamentos, que acontecem de forma não prevista, causando danos ao homem e ao meio ambiente.

Em um cenário de legislações ambientais cada vez mais rigorosas, a detecção e localização de vazamentos tornam-se imperativos, sendo necessário que eventuais acidentes sejam reparados rapidamente.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema computacional inteligente para simulação e controle do escoamento de gás em redes de distribuição em regime permanente, permitindo a detecção, a localização e o isolamento de pontos de vazamentos. Para tanto, foram avaliados diferentes métodos de modelagem e solução numérica do problema de escoamento de gás em redes de gasodutos; projetado um controlador proporcional, integral e derivativo (PID), de forma a otimizar o tempo de resposta de válvulas de fluxo eletro-

hidráulicas; estudados vários métodos de detecção de vazamentos de gás em tubulações; desenvolvida uma rotina inteligente utilizando redes neurais artificiais (RNA) visando localizar a posição do vazamento ao longo do duto, e por fim, foi desenvolvido um sistema computacional inteligente, em linguagem de programação *Delphi*, com toda a modelagem avaliada e proposta, para ser utilizado em projetos de redes de gasodutos e na automação da operação da distribuição de gás.

Para a detecção de vazamentos em gasodutos, vários métodos podem ser utilizados, dependendo das características operacionais de cada rede. A grande dificuldade na aplicação dos métodos se dá pela compressibilidade do gás no interior dos dutos, o que pode levar a alarmes falsos nos transitórios. No entanto, em regime permanente o escoamento é uniforme, e as características de pressão e vazão ao longo dos dutos tornam os modelos considerados aplicáveis com suficiente segurança.

Os estudos iniciais de detecção de vazamento tratavam desta operação como preventiva a paradas em dutos, não se preocupando com prejuízos ao meio ambiente, somente com prejuízos comerciais.

A literatura consultada permitiu identificar também muitos casos de estudo para dutos transportando óleo (oleodutos) ou vários fluidos diferentes, também chamados de polidutos (HIGGES, 1983; THOMPSON & SOGMAN, 1984; MONTOMERY, 1986; ELLUL, 1989; JAVARSHEISHVILI & NAMGALADZE, 1991; RACHFORD & WIKE, 1996; MUKHERJEE & NARASHIMHAN, 1996).

Inicialmente, considera-se o trabalho de Whaley et al. (1992), que apresenta um tutorial dos métodos computacionais utilizados para a detecção de vazamentos em dutos. Os autores apresentam técnicas baseadas em simulação computacional das condições e propriedades do fluido escoando, para o regime transitório, e também técnicas que consideram regime permanente para o escoamento no duto, tratando a variação das pressões ou dos volumes transportados pelo duto. Os autores ainda discutem as vantagens e desvantagens de cada técnica, apresentando o estado da arte de tal metodologia.

Ainda tratando de modelagem transitória para a detecção de vazamento, Jenícek e Sterba (1994), apresentam um modelo, onde os mesmos se preocupam com a qualidade da instrumentação que fornecerá as informações que permitam ao modelo monitorar incidências no duto. Interessa-se também na definição, pelo uso do modelo apresentado, nas alterações necessárias para que os resultados possam ser alcançados.

Belsito et al. (1998) também propõem um modelo para a detecção de vazamento utilizando o conceito de redes neurais para o processamento das informações provenientes do

campo. O trabalho foi inspirado na necessidade de detecção de vazamentos inferiores a 1% da vazão de operação, para um sistema de transporte de amônia liquefeita, material este considerado pelos autores, de extrema periculosidade, devendo, portanto, sofrer rígido controle durante a operação. A rede foi treinada com dados simulados e testada levando em consideração os sinais de ruídos existentes na tubulação. No sistema em estudo foram detectados vazamentos de 1% do fluxo de entrada e a localização de vazamentos maiores (5%, 10%) foi feita com alta confiabilidade mesmo na presença de ruídos. No trabalho também é tratado o efeito de transdutores em falha no duto sobre o sistema de detecção.

Outro trabalho interessante do ponto de vista da apresentação das técnicas atualmente utilizadas, foi apresentado por Ellul (1989) em sua dissertação de mestrado. Técnicas como monitoramento acústico de dutos, monitoramento via sistema computacional e modelagem matemática são tratados por este autor. Em seu trabalho, o autor apresenta a simulação computacional da detecção de vazamento de uma malha de distribuição de gás, tomando como parâmetros de análise: i) o tempo necessário para a detecção do vazamento; ii) o tempo necessário para a determinação do local de vazamento e; iii) o tempo necessário para a perfeita determinação do volume vazado. Ainda constam simulações semelhantes para uma malha de distribuição de etileno e um sistema para transporte de produtos líquidos.

Do ponto de vista operacional da detecção de ruptura do duto, Mc Kee (1988) faz uma análise considerando: i) parâmetros necessários para a detecção; ii) efeitos de condições operacionais e configurações do duto, e; iii) simulação da propagação do transiente causado pela ruptura do duto, apresentando diversas leituras de registros de pressão em dutos alteradas pelo ruptura dos mesmos. Como conclusões importantes, o autor apresenta: i) a importância da rapidez de detecção para minimização de perdas dos produtos transportados, continuidade na operação, se possível, e redução do potencial de dano ao meio ambiente e populações localizadas próximas ao duto; ii) a relevância da detecção de ondas acústicas devidas a ruptura; iii) o conhecimento dos tempos de resposta e sensibilidade dos instrumentos de medição utilizados, e; iv) a presença de esquemas para controle da ruptura do duto e conseqüente colocação em operação. O autor ainda cita uma tabela apresentando a aplicabilidade de diversos esquemas de detecção de ruptura de dutos relacionada ao tipo de operação escolhida para o duto, quais sejam, controle autônomo, estação de controle e central de controle.

Pringle (1988) trata a importância do ajuste de parâmetros do modelo implantado. Este ajuste de parâmetros é único para cada sistema, devendo, portanto, ser efetuado para cada implantação de sistemas de detecção de vazamentos utilizado em um duto. Além disso, cita a

importância dos dados obtidos dos medidores instalados no duto, afirmando que uma boa detecção depende do nível e da qualidade dos instrumentos de medição utilizados. Cabe ressaltar que a comunicação e coleta de dados em um computador central são necessárias para a implantação de um sistema de detecção de vazamentos, uma vez que o mesmo deve monitorar todo o duto, ou pelo menos, o trecho em questão.

Nicholas (1992) ateu-se ao estudo das incertezas inerentes aos sistemas de detecção de vazamento. Ele discute incertezas devidas ao balanço de fluxo no duto, a taxa de variação do empacotamento do duto, a medição da pressão e sua taxa de variação, ao cálculo das propriedades do fluido, ao modelo computacional utilizado, a mudança da temperatura média do duto, ao cálculo do volume empacotado no duto e ao balanço total de volume. Com relação à medição de pressão, o autor informa que o aumento da incerteza de medição de pressão pode variar de 1 a 4% da faixa de SPAN calibrada para uma variação de temperatura da ordem 50°C. Também informa que para os modelos transientes, a incerteza também depende da discretização utilizada para o modelo e dos intervalos de tempo utilizados em seus cálculos (discretização no tempo), e apresenta a ordem de grandeza das diversas incertezas discriminadas para óleo cru, gás natural e gás natural liquefeito.

Outros autores que estudaram o efeito das incertezas de medição sobre os sistemas de detecção de vazamento são Van Reet e Skogman (1987). Eles apresentam a importância do conhecimento das incertezas introduzidas pelos instrumentos de medição do sistema, assim como o efeito de tais incertezas sobre o processo de detecção do vazamento no duto.

Um trabalho bastante interessante é aquele apresentado por Bowles et al. (1996), que trata da operação e localização das válvulas usadas em gasodutos para rápido isolamento de áreas rompidas do duto. Nesse trabalho os autores discutem o uso de válvulas automáticas e de controle remoto, apresentando simulações de condições de aparecimento de rompimentos em dutos, analisando então respostas e tempos de atuação de tais sistemas, e a questão de bloqueios ocasionados por “falsos alarmes”.

Ainda tratando de válvulas, Murphy e Dean (1984) apresentam a importância da segura identificação das ondas acústicas induzidas pelo fechamento de tais equipamentos no campo de pressões no duto.

Uma análise de vazamentos ocasionados na rede de transporte/distribuição da companhia francesa de gás é apresentada por Delarue (1996). Neste trabalho ele cita a ocorrência de dez acidentes por ano neste país, em média, sendo setenta por cento deles causada por equipamento de escavação. O autor discute várias ferramentas atualmente disponíveis para a detecção de vazamento em linhas de gás, afirmando que um estudo de

viabilidade deve ser levado em conta na escolha do sistema a ser adotado, uma vez que, em sua experiência naquele país, os vazamentos causados simplesmente pelo uso do duto são, de maneira geral, de pequena monta, o que, na maioria das vezes inviabiliza a compra de equipamentos caros. Um fator importante a ser considerado é a proximidade dos dutos de áreas urbanas, onde acidentes podem alcançar dimensões catastróficas.

Nicholas (1989) discute em seu artigo “Detecção de vazamento em dutos: Quão confiável ela é?” (*Pipeline leak detection: How much is feasible?*) os vários efeitos que influenciam a detecção de vazamento em dutos. Como conclusão para a melhoria operacional do processo de detecção, ele cita a importância de: i) filtrar os dados antes de amostrá-los; ii) amostrar com uma frequência pelo menos duas vezes maior que a maior frequência de variação dos dados; iii) usar transmissores com incertezas de no máximo 0.25% para evitar efeitos de variação com a temperatura; iv) proteger os transmissores da ação direta do sol e da chuva; v) limitar a precisão esperada para a medição da vazão à máxima sensibilidade do sistema; vi) reconhecer que o vazamento nada mais é que um fluxo de fluido não medido; vii) manter o sistema atuando 24 horas por dia; (viii) lembrar que tais sistemas esperam informações consistentes todo o tempo.

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

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

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

A observação é o meio mais simples de detectar vazamentos, é a patrulha regular da tubulação, fazendo a inspeção visual da integridade da linha. Um método similar é a injeção de aditivos químicos em gases atóxicos provendo odor. A ocorrência de vazamentos deve ser

verificada em inspeções regulares, já que a eficácia deste método pode deteriorar dependendo das condições ambientais e da direção do vento (BLACK, 1992).

Métodos acústicos, em princípio são métodos que podem detectar vazamentos muito pequenos em um curto espaço de tempo, mas que nem sempre funcionam bem, devido ao “ruído de fundo” de compressores e válvulas. Sanderberg et al. (1989) cita “pigs” de monitoramento acústico que detectam o vazamento através da energia acústica gerada pelo escape do fluido. Sensores de ruídos ultra-sônicos: instrumentos baseados na detecção do ruído criado pelo vazamento, produzido na faixa de frequências ultra-sônicas. O *software* associado deve ser desenvolvido cuidadosamente de modo a filtrar os ruídos externos (BLACK, 1992).

Chung e Lee (2001) desenvolveram um sistema de monitoramento de vazamento de gás natural, baseado em sensores de SnO<sub>2</sub> que apresentam detecção seletiva do metano ou gás natural.

Sanderberg et al. (1989) desenvolveu um sistema sensor de hidrocarbonetos que consiste em um módulo de alarme e um cabo sensor envolto à tubulação. O cabo sensor é instalado ao longo da tubulação e tem comprimento de 2 km. O cabo é revestido por um polímero condutivo que incha ao entrar em contato com o hidrocarboneto que está vazando da tubulação.

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

Zhang (2001) examina a aplicação do sistema *ATMOS Pipe* desenvolvido pela Shell.

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

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

Detecção baseada na modelagem matemática da tubulação. Embora existam diferentes formulações, a essência da maioria dos sistemas de modelagem é a mesma: solução de equações da conservação de massa, momento e energia.

Estas equações não representam um sistema fechado e devem ser suplementadas por uma equação de estado e formulação do fator de fricção. Métodos numéricos são usados para resolver este grupo de equações não lineares, o resultado é uma ferramenta preditiva conhecida como modelo de tempo real, ou “*on-line*” (BLACK, 1992).

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

Uma predição exata do empacotamento da linha e o efeito do transiente no balanço de volume só são obtidos quando se utiliza o sistema baseado no modelo. Black (1992), Pudar e Liggett (1992) e Dempsey e Al-Habib (1996) fizeram a modelagem na rede inteira para obter o transiente hidráulico.

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

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

Fukushima et al. (2000) relatam o sistema de detecção de vazamento de gás, em funcionamento desde 1997, instalado na tubulação Niigata-Sendai, de 250 km de extensão. A detecção do vazamento é feita medindo a pressão e temperatura nas estações de válvulas, distantes 12 km entre si, e medindo o fluxo de gás na entrada e na saída da tubulação. Como a demanda principal é para a estação de energia de Sendai, que opera continuamente, não há estado estacionário na operação da tubulação. O sistema de detecção de vazamento, automaticamente, determina o local do vazamento e a taxa de vazamento em tempo real. O método proposto é uma extensão do método de balanço de massa e volume. O modelo de simulação para a tubulação é baseado no modelo do fluxo transiente, e o método das características é usado para resolver as equações diferenciais ordinárias. A detecção em tempo real é feita em duas etapas. É feita uma simulação baseada no balanço da pressão. O vazamento em potencial é definido pela diferença de balanço de massa a cada estação de válvula. No momento em que há certeza de que não existe vazamento, um parâmetro de sintonia reconcilia o balanço de pressão para minimizar a possibilidade de vazamento a cada estação de válvula. A discrepância entre o valor do balanço da pressão simulada e o real é avaliado para determinar o possível vazamento. A detecção de vazamento é feita comparando o valor do vazamento em potencial com um valor preestabelecido. Se o vazamento em potencial for maior que o valor preestabelecido ele pode ser determinado como um possível vazamento. A localização do vazamento é feita entre os dois pontos em que os valores preestabelecidos foram violados.

Por fim, Macias (2004), em sua dissertação de mestrado, descreve uma técnica de detecção de vazamentos, em tubulações de transporte de gás, baseada na análise de transientes de pressão simulados e reais. Os transientes de pressão foram detectados e simulados para os casos de tubulações com e sem escoamento em várias condições de operação.

No presente trabalho, por se tratar de um estudo em regime permanente, foi utilizado o modelo de compensação de balanço de volumes para a detecção de vazamento em gasodutos, apresentado em Whaley et al. (1992).

Para a obtenção das modelagens adequadas que compuseram as rotinas de simulação do sistema proposto, vários estudos e simulações foram realizados. No capítulo II, são apresentadas as modelagens do escoamento do gás em dutos isolados e redes de dutos.

No capítulo III são apresentados diferentes métodos de solução numérica propostos por Newton para resolução de problemas de escoamento de gás natural em regime permanente em redes de distribuição. Os métodos foram testados através da implementação em MATLAB, como apresentado no anexo “A”.

No capítulo IV, foi avaliado o isolamento de dutos com válvulas proporcionais eletro-hidráulicas, controladas via controladores PID, apresentado o modelo matemático da referida válvula, e projetado um controlador PID com o objetivo de otimizar seu tempo de resposta à atuação em isolamento de dutos.

No capítulo V, estão descritos os principais métodos de detecção de vazamentos em gasodutos.

No capítulo VI é apresentada uma proposta de modelo de localização de vazamento em regime permanente, utilizando redes neurais artificiais.

No capítulo VII, está descrito o sistema proposto e desenvolvido com todas as modelagens agregadas.

Finalizando, no capítulo VIII, são apresentadas as conclusões finais e as propostas para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO II: MODELAGEM DO ESCOAMENTO DO GÁS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM REGIME PERMANENTE**

O escoamento do gás em redes de distribuição pode ser descrito, no seu estado permanente, por um conjunto de equações algébricas, geralmente não-lineares, mas de fácil tratamento matemático. No estado transitório o modelo é mais complexo, podendo ser representado por um sistema de equações diferenciais parciais. Neste capítulo, serão apresentados modelos de escoamento de gás natural em redes em regime permanente, segundo Osiadacz (1987), e a topologia adotada para compor a rotina de simulação do sistema desenvolvido.

### **2.1 MODELAGEM DO ESCOAMENTO DO GÁS EM DUTOS ISOLADOS**

#### **2.1.1 Equação geral do escoamento do gás em dutos**

Para obtenção do modelo no estado permanente, pode-se tomar como base um elemento de duto de comprimento infinitesimal  $dx$  (m), e seção transversal  $A$  ( $m^2$ ), e considerar  $w$  (m/s) e  $a$  ( $m/s^2$ ), respectivamente, a velocidade e a aceleração do gás no interior desse elemento,  $W$  ( $Kg.m/s^2$ ) o peso das partículas de gás e  $p$  (bar), a pressão externa, como é mostrado na figura 2.1, segundo Osiadacz (1987).

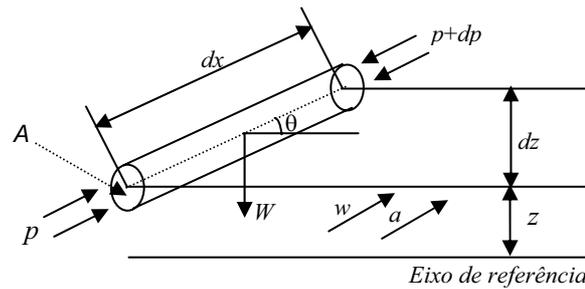


Figura 2.1 – Parâmetros do escoamento de fluido em dutos.

Para escoamentos de fluidos incompressíveis, com densidades constantes, a equação que determina o seu comportamento dinâmico é a equação 2.1, de Bernoulli, como apresentado por Fox (1995) e Vianna (1993).

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g} + z = C \quad (2.1)$$

sendo que:

$\rho$  = densidade do fluido (Kg/m<sup>3</sup>);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$w$  = velocidade de escoamento do fluido (m/s);

$z$  = altura relativa ao eixo de referência (m);

$C$  = constante de proporcionalidade.

Cada termo da equação de Bernoulli, representa energia por unidade de peso do fluido: o termo  $p/\rho g$  representa o trabalho realizado pela pressão por unidade de peso do fluido, o termo  $w^2/2g$ , a energia cinética por unidade de peso do fluido, e  $z$  a energia potencial por unidade de peso do fluido devido à altura em relação ao eixo de referência.

No estado permanente, o escoamento de massa é constante em qualquer seção transversal do duto, conforme mostrado na figura 2.2, e representado pela equação 2.2.

$$w_1 A_1 = w_2 A_2 = Q = \text{Constante} \quad (2.2)$$

sendo que:

$A_1$  e  $A_2$  representam as áreas das seções transversais 1 e 2 mostradas na figura 2.2.

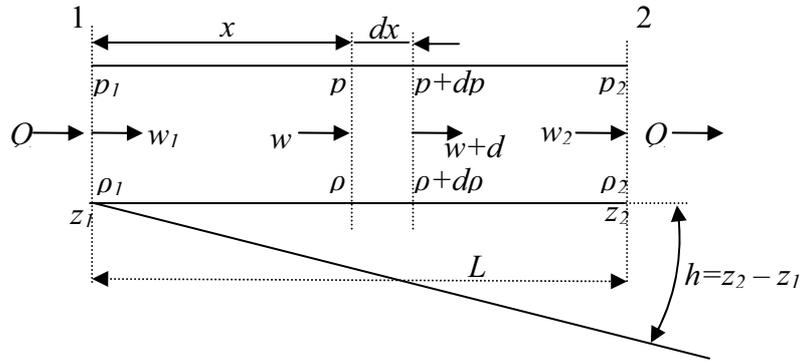


Figura 2.2 – Escoamento de fluido em uma porção infinitesimal de duto.

Assim, para as seções 1 e 2 da figura 2.2, pode-se a equação 2.3:

$$\rho_1 \cdot w_1 = \rho_2 \cdot w_2 \quad (2.3)$$

na qual,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  representam, respectivamente, as densidades nas seções 1 e 2 e  $w_1$  e  $w_2$  as velocidades nas respectivas seções.

A densidade decresce ao longo do duto com a diminuição da pressão, ( $p_1 > p_2$ ), e há um conseqüente aumento da velocidade ( $w_1 < w_2$ ) e energia cinética do sistema. Considerando no elemento de duto de comprimento infinitesimal  $dx$  uma pressão  $p$ , aplicada a uma distância  $x$  da origem e  $p + dp$  aplicada a uma distância  $x + dx$  dessa mesma origem, como é esquematizado na figura 2.2. A velocidade  $w$  e a densidade  $\rho$  variam através do elemento  $dx$ . Segundo Osiadacz (1987), em termos práticos, a variação na densidade do gás pode ser considerada desprezível, e a equação 2.1 de Bernoulli pode ser escrita como a equação 2.4.

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g} + z = \frac{p + dp}{\rho g} + \frac{(w + dw)^2}{2g} + (z + dz) + dh_f \quad (2.4)$$

na qual, o termo  $dh_f$  representa as perdas em forma de calor, devido ao atrito do gás na parede do duto e pode ser quantificado pela equação 2.5 de Darcy, conforme Streeter (1982).

$$dh_f = \frac{4f}{D} \frac{w^2}{2g} dx \quad (2.5)$$

sendo que:

$f$  é o fator de fricção (adimensional), e  $D$  o diâmetro interno do duto (m).

Considerando um fluxo em que a variação da energia cinética em relação à densidade e a velocidade são desprezíveis, a substituição da equação (2.5) em (2.4), fornece, após simplificações, a equação (2.6), segundo Osiadacz (1987).

$$-dp = \frac{2f\rho w^2}{D} dx + \rho g dz \quad (2.6)$$

Considerando a equação 2.3, e a proporcionalidade das variações de densidade, pressão e velocidade de escoamento nas tubulações, obtém-se a equação 2.7, segundo Osiadacz (1987).

$$-p dp = \frac{2f}{D} \rho_1 p_1 w_1^2 dx + \frac{p^2}{p_1} \rho_1 g dz \quad (2.7)$$

Da teoria dos gases, Vianna (1993), sabe-se que a densidade do gás é definida como o inverso do volume específico, como é mostrado na equação 2.8.

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (2.8)$$

O fator de compressibilidade  $Z$  do gás na tubulação é dado pela equação 2.9.

$$Z = \frac{pv}{RT} \quad (2.9)$$

Das equações 2.7, 2.8 e 2.9 obtém-se a equação 2.10.

$$-pdp = \frac{2f}{D} \rho_1^2 w_1^2 ZRTdx + \frac{p^2}{ZRT} gdz \quad (2.10)$$

Das equações 2.2 e 2.3 pode-se escrever a equação 2.11.

$$\rho_1^2 w_1^2 = \rho_n^2 w_n^2 = \rho_n^2 \frac{Q_n^2}{A^2} = \frac{\rho_n^2 Q_n^2}{(\pi D^2 / 4)^2} \quad (2.11)$$

na qual, o subscrito  $n$  indica os valores para as condições padrões de pressão e temperatura, que são  $p_n \cong 0,1 \text{ MPa}$  e  $T_n = 288 \text{ K}$ .

Substituindo a equação 2.11 na equação 2.10 obtém-se a equação 2.12.

$$-pdp = \frac{32f\rho_n^2 Q_n^2}{\pi^2 D^5} ZRTdx + \frac{p_{av}^2}{ZRT} gdz \quad (2.12)$$

Segundo Osiadacz (1987), pode-se considerar  $p_{av} = (p_1 + p_2)/2$ , e para o gás  $p_n = \rho_n RT_n$ , enquanto para o ar  $p_n = (\rho_{ar})_n R_{ar} T_n$ . Dividindo a segunda pela primeira pode-se escrever a equação 2.13:

$$\frac{\rho_n}{(\rho_{ar})_n} = \frac{R_{ar}}{R} = S \quad (2.13)$$

Considerando  $S$  a gravidade específica do gás, obtém-se a equação 2.14.

$$\rho_n = \frac{Sp_n}{R_{ar}T_n} \quad (2.14)$$

Substituindo a equação 2.13 e 2.14 na equação 2.12, pode-se escrever a equação 2.15.

$$-pdp = \frac{32}{\pi^2} \frac{fSZT}{R_{ar}D^5} Q_n^2 \left( \frac{p_n}{T_n} \right)^2 dx + \frac{p_{av}^2 S}{ZR_{ar}T} g dz \quad (2.15)$$

Integrando a equação 2.15 nos seguintes limites de integração:  $x = 0; p = p_1$ , para  $x = L, p = p_2$  e  $z = h$ , obtém-se a equação 2.16.

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{64}{\pi^2 R_{ar}} \frac{fSLZT}{D^5} \left( \frac{p_n}{T_n} \right)^2 Q_n^2 + \frac{2p_{av}^2 S}{ZR_{ar}T} gh \quad (2.16)$$

Isolando  $Q_n$ , pode-se escrever a equação 2.17, que é a equação geral de escoamento de gás em regime permanente, segundo Osiadacz (1987).

$$Q_n = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar}}{64} \frac{T_n}{p_n}} \sqrt{\frac{\left[ (p_1^2 - p_2^2) - \frac{2 p_{av}^2 Sgh}{ZR_{ar}T} \right] D^5}{fSZLT}} \quad (2.17)$$

Se o duto for horizontal, a equação geral do escoamento pode ser escrita de forma reduzida como é mostrado na equação 2.18, segundo Osiadacz (1987).

$$Q_n = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar}}{64} \frac{T_n}{p_n}} \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2) D^5}{fSZLT}} \quad (2.18)$$

na qual,  $R_{ar}$  é dado em (N.m.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>),  $p$  em (N.m<sup>-2</sup>),  $D$  em (m),  $L$  em (m),  $T$  em (K) e  $Q_n$  em (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).

A obtenção da equação geral do escoamento envolve hipóteses de simplificações, tais como: escoamento permanente e isotérmico, mudança de energia cinética desprezível, compressibilidade constante do gás ao longo do escoamento, validade das perdas por fricção de Darcy e coeficiente de fricção constante ao longo do duto.

Para baixa pressão, uma nova forma para a equação do escoamento pode ser obtida, envolvendo a simplificação do termo  $p_1^2 - p_2^2$  para  $2p_{av}(p_1 - p_2)$  e a pressão absoluta  $p$  igual a pressão  $p_n$ . Assim, considerando que a pressão  $p_n$  é igual a pressão média  $p_{av}$  e ainda  $T_n \cong T$  e  $Z \cong 1$ , a equação 2.18, após simplificações, pode ser escrita como a equação 2.19, Osiadacz (1987).

$$Q_n = \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{2T_n R_{ar} D^5 (p_1 - p_2)}{p_n fSL}} \quad (2.19)$$

Variantes da equação (2.19) de escoamento de gás são obtidas quando diferentes considerações no fator de fricção  $f$  é adotado, Vianna (1993).

O escoamento de gás em dutos pode resultar em pequenos valores à baixa pressão nos sistemas de distribuições e altos valores em altas pressões. Para pequenos escoamentos aplica-se as propriedades do escoamento laminar, ao passo que para grandes escoamentos aplica-se as leis do escoamento turbulento. Contudo, a maioria dos sistemas de distribuição de gás operam na região parcialmente turbulenta.

Na região laminar, o fator de fricção pode ser dado pela equação 2.20, denominada relação de Hagen – Poiseuille, segundo Osiadacz (1987).

$$f = 16 / Re \quad (2.20)$$

na qual,  $Re$  é o número de Reynolds, definido como  $Re = Dw\rho/\mu$ , considerando  $\mu$  o coeficiente de viscosidade dinâmica do gás (N.s.m<sup>-2</sup>).

### 2.1.2 Fator de eficiência

O volume de escoamento de gás em dutos pode apresentar-se menor do que aquele obtido analiticamente, pelo fato de existir uma perda devido uma fricção extra ou pelas perdas por arrasto, produzidas pelos grânulos de solda, curvaturas nos encaixes e sujeiras provocadas pela oxidação, todas nas paredes internas dos dutos. Assim, na expressão do coeficiente de fricção é conveniente introduzir um novo fator  $E$ , denominado fator de eficiência, compensando essas perdas extras. O fator de eficiência  $E$  varia com a taxa de escoamento, mas pode ser considerado constante visto que as variações são pequenas. Na região laminar praticamente não existem perdas extras, conseqüentemente, não requerendo o uso do fator de eficiência. Nos escoamentos parcialmente turbulentos e totalmente turbulentos o seu uso é necessário, cada um deles com seu coeficiente de eficiência apropriado.

O fator de eficiência normalmente varia no intervalo de 0.8 a 1.0 para a maioria dos dutos: 1 representa 100% de eficiência para dutos perfeitamente lisos; 0.8 representa 80% daquele escoamento previsto quando é usada a equação de escoamento sem um fator de

eficiência. Contudo, alguns dutos de aço podem ter fator de eficiência em torno de 0.7, ou até menos.

Introduzindo o fator de eficiência na equação 2.20 do fator de fricção, obtém-se a equação 2.21.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = E \cdot \sqrt{\frac{1}{f_t}} \quad (2.21)$$

sendo que:

$f$  é o fator de fricção atual usado em equações de escoamento gerais, e  $f_t$  o fator de fricção teórico.

Substituindo a equação 2.21 na equação 2.18, pode-se escrever uma nova equação geral de escoamento que incorpora as perdas extras no escoamento de gás natural, a equação 2.22.

$$Q_n = \sqrt{\frac{\pi^2 R_{ar}}{64} \frac{T_n}{p_n}} E \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2) D^5}{fSZLT}} \quad (2.22)$$

Observa-se que o escoamento  $Q_n$  é diretamente proporcional ao fator de eficiência  $E$ . Rearranjando a equação 2.22, obtém-se a equação 2.23.

$$(p_1^2 - p_2^2) = \left[ \sqrt{\frac{64}{\pi^2 R_{ar}} \frac{p_n}{T_n}} \right]^2 \frac{f_t SLTZ}{D^5} \frac{1}{E^2} Q_n^2 \quad (2.23)$$

Para um dado escoamento, o termo  $(p_1^2 - p_2^2)$  é inversamente proporcional ao quadrado do fator de eficiência. Esse termo é um bom indicador das perdas físicas de pressão

ao longo do duto. O fator de eficiência pode ter um efeito muito significativo sobre as quedas de pressões ao longo do duto.

### 2.1.3 Equações usuais do escoamento do gás em dutos

#### 2.1.3.1 Equação para baixa pressão

Em termos práticos, quando a rede opera em baixa pressão, entre 0 e 75 mbar, usa-se a equação de Lacey, segundo Osiadacz (1987).

$$Q_n = 5,72 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)D^5}{fSL}} \quad (2.24)$$

sendo que:

$p$  é dada em (mbar),  $D$  em (mm), e  $Q_n$  em (m<sup>3</sup>/h).

O valor de  $f$  é determinado pela equação 2.25.

$$f = 0,0044 \left( 1 + \frac{12}{0,276D} \right) \quad (2.25)$$

Alternativamente, o valor de  $f = 0,0065$  pode ser usado para todos os dutos, obtendo-se a equação 2.26, denominada de equação de Pole, Osiadacz (1987).

$$Q_n = 7,1 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)D^5}{SL}} \quad (2.26)$$

Considerando  $S = 0.589$ , segundo Osiadacz (1987), a equação 2.26 pode ser escrita na forma da equação 2.27.

$$p_1 - p_2 = KQ_n^2 \quad (2.27)$$

sendo que:

$K$  pode ser calculado pela equação 2.28.

$$K = 11,7 \times 10^3 \frac{L}{D^5} \quad (2.28)$$

### 2.1.3.2 Equação para média pressão

Para redes operando à média pressão, entre 75 mbar e 7.0 bar, pode-se usar a equação 2.29, denominada Polyflo, segundo Osiadacz (1987).

$$Q_n = 7,57 \times 10^{-4} \frac{T_n}{P_n} \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2) D^5}{fSLT}} \quad (2.29)$$

O fator de fricção  $f$  pode ser dado pela equação 2.30.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 5,338 \text{Re}^{0,076} E \quad (2.30)$$

Considerando  $T = 288 \text{ K}$  e  $S = 0.589$ , segundo Osiadacz (1987), pode-se escrever a equação 2.29 como a equação 2.31.

$$p_1^2 - p_2^2 = KQ_n^{1,848} \quad (2.31)$$

sendo que:

$K$  pode ser calculado como é mostrado na equação 2.32.

$$K = 27,24 \frac{L}{E^2 D^{4,848}} \quad (2.32)$$

### 2.1.3.3 Equação para alta pressão

Em redes operando a altas pressões, acima de 7.0 bar usa-se a equação 2.33, denominada de Panhandle, Osiadacz (1987).

$$Q_n = 7,57 \times 10^{-4} \frac{T_n}{p_n} \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2) D^5}{fSLTZ}} \quad (2.33)$$

O fator de fricção  $f$  pode ser dado pela equação 2.34.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 6,872 (\text{Re})^{0,073} E \quad (2.34)$$

Considerando  $Z = 0.95$ ,  $T = 288 \text{ K}$  e  $S = 0.589$ , a equação 2.33 pode ser escrita como a equação 2.35.

$$p_1^2 - p_2^2 = KQ_n^{1,854} \quad (2.35)$$

sendo que:

$K$  pode ser calculado pela equação 2.36.

$$K = 18,43 \frac{L}{E^2 D^{4,854}} \quad (2.36)$$

Utilizando as equações 2.27, 2.31 e 2.35 para dutos comuns, a equação de escoamento pode ter uma forma geral. Para qualquer duto  $k$ , a equação de escoamento de um nó  $i$  para um nó  $j$  pode ser escrita como é mostrado na equação 2.37.

$$\phi[(Q_n)_k] = K_k (Q_n^{m_1})_k \quad (2.37)$$

sendo que:

$\phi[(Q_n)_k]$  = função de escoamento para o duto  $k$ ;  $K_k$  = constante do duto, para o duto  $k$ ;  $[(Q_n)_k]$  = escoamento no duto  $k$ ;  $m_1$  = expoente de escoamento, com  $m_1 = 2$  para redes em baixas pressões;  $m_1 = 1,484$  para redes em médias pressões e  $m_1 = 1,854$  para redes em altas pressões, Osiadacz (1987).

Para baixa pressão uma versão da equação de escoamento é mostrada na equação 2.38.

$$\phi[(Q_n)_k] = K_k (Q_n^2)_k = p_i - p_j = \Delta p_k \quad (2.38)$$

sendo que:

$\Delta p_k$  = queda de pressão no duto  $k$ ;  $p_i$  = a pressão absoluta no nó  $i$ ;  $p_j$  = a pressão absoluta no nó  $j$ ;  $i$  = nó de remessa do duto  $k$  e  $j$  = nó de recebimento do duto  $k$ .

Para médias e altas pressões, uma versão da equação 2.37, é mostrada na equação 2.38.

$$\phi[(Q_n)_k] = K_k (Q_n^{m_1})_k = P_i - P_j = \Delta P_k \quad (2.38)$$

sendo que:

$$P_i = p_i^2 \text{ e } P_j = p_j^2.$$

As equações de escoamento para baixa pressão, média e alta pressões podem ser rearranjadas e escritas como a equação 2.39 e a equação 2.40.

$$\phi'(\Delta P_k) = (Q_n)_k = \left( \frac{\Delta P_k}{K_k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.39)$$

$$\phi'(\Delta P_k) = (Q_n)_k = \left( \frac{\Delta P_k}{K_k} \right)^{\frac{1}{m1}} \quad (2.40)$$

Levando-se em conta o fato da mudança na direção do escoamento, as equações 2.39 e 2.40 podem ser rearranjadas e escritas, respectivamente como as equações 2.41 e 2.42, segundo Osiadacz (1987).

$$(Q_n)_k = S_{ij} \left( \frac{S_{ij}(p_i - p_j)}{K_k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.41)$$

$$(Q_n)_k = S_{ij} \left( \frac{S_{ij}(P_i - P_j)}{K_k} \right)^{\frac{1}{m1}} \quad (2.42)$$

sendo que:

$$S_{ij} = 1 \text{ se } P_i > P_j \text{ (} p_i > p_j \text{)}, \text{ e } S_{ij} = -1 \text{ se } P_i < P_j \text{ (} p_i < p_j \text{)}.$$

## 2.2 MODELAGEM DO ESCOAMENTO DO GÁS EM REDES DE DUTOS

Existe uma importante analogia entre as leis de Kirchhoff para circuitos elétricos e as leis que regem o comportamento dinâmico do escoamento do gás em uma rede de dutos, simplificando extraordinariamente o seu estudo. Tal analogia se aplica a qualquer fluido escoando em uma rede de dutos. Neste tópico será apresentada a modelagem por nós e por malhas de uma rede de distribuição de gás.

### 2.2.1 Topologia das redes de gás

Toda rede de gás pode ser descrita por um conjunto de matrizes construído em função da topologia da própria rede. Na figura 2.3 é apresentada uma rede de gás composta por 04 nós e 05 ramos.

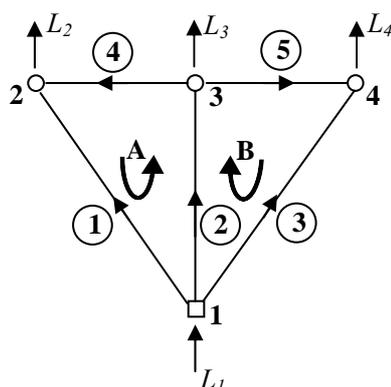


Figura 2.3 – Topologia de uma rede de gás.

Os nós 2, 3 e 4 representam os nós de cargas, ou saídas do sistema. O nó 1, por possuir parâmetros conhecidos, representa o nó de referência, ou nó fonte. Contudo, qualquer nó que tenha a pressão definida pode ser usado como nó de referência. Uma rede pode, ainda, ter vários nós de referência, desde que tenham suas pressões definidas. Os nós de carga são partes da rede onde as cargas  $L_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) são entregues.

A interconexão de uma rede pode produzir um caminho fechado de ramos, conhecido como malha. Na figura 2.3, a malha “A” consiste dos ramos 1, 2 e 4, e a malha “B” consiste dos ramos 3, 2 e 5. Uma terceira malha pode ser definida pelos ramos 3, 1, 4 e 5, mas é redundante diante das malhas “A” e “B”.

A direção do escoamento em todo o ramo é definida arbitrariamente e essa direção é considerada positiva para o escoamento. Se o valor do escoamento resultar negativo, então a direção do escoamento é oposta àquela considerada.

### **2.2.1.1 Matriz de incidência: ramo-nó**

A interconexão de uma rede pode ser descrita por uma matriz de incidência representada pela equação 2.43.

$$A = [a_{ij}]_{n \times m} \quad (2.43)$$

sendo que:

$n$  representa o número de nós, incluindo o nó de referência,  $m$ , o número de ramos, e  $a_{ij}$  representa o elemento da linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz  $A$ , correspondendo ao nó  $i$  e o ramo  $j$  e é definido conforme a equação 2.44.

$$a_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{se o ramo } j \text{ entra no nó } i, \\ -1, & \text{se o ramo } j \text{ deixa o nó } i, \\ 0, & \text{se o ramo } j \text{ não está conectado ao nó } i. \end{cases} \quad (2.44)$$

### **2.2.1.2 Matriz de incidência: ramo-malha**

Analogamente à matriz de incidência ramo-nó, define-se a matriz de incidência ramo-malha, como é apresentada na equação 2.45.

$$B = [b_{ij}]_{k \times m} \quad (2.45)$$

sendo que:

$k$  representa o número de malhas independentes,  $m$ , o número de ramos, e  $b_{ij}$  representa o elemento da linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz  $B$ , correspondendo a malha  $i$  e o ramo  $j$ , e é definido conforme a equação 2.46.

$$b_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{se o ramo } j \text{ tem a mesma direção daquela da malha } i, \\ -1, & \text{se o ramo } j \text{ tem a direção oposta à malha } i, \\ 0, & \text{se o ramo } j \text{ não está na malha } i. \end{cases} \quad (2.46)$$

### 2.2.2 Formulação nodal de uma rede de gás

A analogia entre a 1ª lei de Kirchhoff, referente à corrente elétrica em um circuito, e o escoamento de gás em uma rede de dutos, facilita bastante a obtenção das equações do escoamento do gás nos dutos em redes. A soma algébrica dos escoamentos em qualquer nó da rede pode ser considerada zero.

Tomando como referência a rede de distribuição de gás apresentada na figura 2.4, e considerando  $Q_i$  ( $i=1, 2, 3$  e  $4$ ) os escoamentos de gás nos ramos.

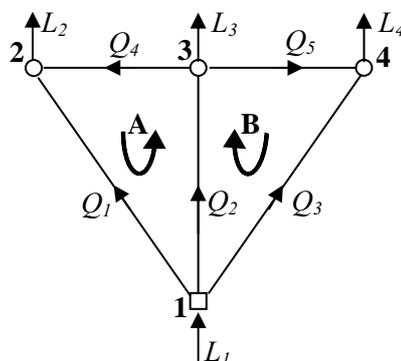


Figura 2.4 – Dutos em rede com escoamento de gás.

A analogia dessa rede de distribuição de gás com um circuito elétrico, relativamente a 1ª lei de Kirchhoff, permite a representação da equação 2.47 para os nós 1, 2, 3 e 4.

$$\begin{aligned}
\text{Nó 1: } & L_1 - Q_1 - Q_2 - Q_3 = 0 \\
\text{Nó 2: } & -L_2 + Q_1 + Q_4 = 0 \\
\text{Nó 3: } & -L_3 + Q_2 - Q_4 - Q_5 = 0 \\
\text{Nó 4: } & -L_4 + Q_3 + Q_5 = 0
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Que pode ser escrita em forma do sistema linear apresentado na equação 2.48.

$$\left\{ \begin{array}{l}
- Q_1 - Q_2 - Q_3 = -L_1 \\
+ Q_1 + Q_4 = L_2 \\
+ Q_2 - Q_4 - Q_5 = L_3 \\
+ Q_3 + Q_5 = L_4
\end{array} \right. \tag{2.48}$$

Deve-se considerar ainda  $L_1 = L_2 + L_3 + L_4$ .

O sistema de equações lineares representado pela equação 2.48 é linearmente dependente, pois a soma das equações é igual a zero. Eliminando-se a parcela do nó de referência, o sistema se torna linearmente independente, podendo ser escrito conforme demonstrado na equação 2.49.

$$L = A_1 \cdot Q \tag{2.49}$$

sendo que:

$A_1$  representa a matriz reduzida de incidência ramo – nó,  $Q$  o vetor dos escoamentos nos ramos, de dimensão  $m$ , e  $L$  o vetor de cargas nos nós.

As quedas de pressões nos ramos podem ser relacionadas à pressões nodais. Considerando a rede da figura 2.4, como uma rede de alta pressão, as pressões nos nós podem ser representadas pela equação 2.50, segundo Osiadacz (1987).

$$\Delta P = -A^T P \quad (2.50)$$

sendo que:

$\Delta P$  representa o vetor queda de pressão nos ramos, de dimensão  $m$ ,  $P$  representa o vetor pressão nodal, de dimensão  $n$ , e  $A^T$ , a matriz transposta nodal.

Com base nas equações 2.38, 2.49 e 2.50, obtém-se a formulação apresentada pela equação 2.51, que representa a formulação nodal de uma rede de distribuição de gás.

$$L = A_1 [\phi'(-A^T P)] \quad (2.51)$$

Resolvendo a equação 2.51 determinam-se as pressões nodais.

### 2.2.3 Formulação de uma rede de gás por malha

Através da analogia com a 2ª lei de Kirchhoff, referente às quedas de tensões em uma malha do circuito elétrico, pode-se considerar que a soma algébrica das quedas de pressões em uma malha de dutos é sempre zero. Tomando como base a topologia de rede apresentada na figura 2.4, pode-se representar a formulação proposta pela equação 2.52.

$$\begin{aligned} \text{Malha A: } & -\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_4 = 0 \\ \text{Malha B: } & +\Delta P_2 - \Delta P_3 + \Delta P_5 = 0 \end{aligned} \quad (2.52)$$

As quedas de pressões  $\Delta P$  podem ser consideradas positivas se os escoamentos nos ramos tiverem as mesmas direções das malhas de escoamento, e negativas, em caso contrário.

Considerando as equações 2.45 e 2.52, pode-se escrever a formulação geral das malhas de uma rede de distribuição de gás como é mostrado na equação 2.53.

$$B.\Delta P = 0 \quad (2.53)$$

sendo que:

$\Delta P$  representa o vetor quedas de pressões nos ramos, de dimensão  $m$ ,  $0$  representa um vetor nulo de dimensão  $k$ , e  $B$ , a matriz incidência do malha-ramo.

Considerando  $\phi(Q)$  o vetor de funções vetoriais de escoamentos de dimensão  $m$ , e com base nas equações 2.40 e 2.53 obtém-se a equação 2.54, que pode ser resolvida pelo método de análise de malhas para a obtenção dos escoamentos nos ramos.

$$B[\phi(Q)] = 0 \quad (2.54)$$

## 2.3 CONCLUSÃO

Verifica-se através da modelagem estudada, que o escoamento do gás em redes de gasodutos pode ser representado por um conjunto de equações algébricas geralmente não-lineares, cujas incógnitas são os valores das pressões nos nós de saída de gás nos pontos de consumo e dos escoamentos nos ramos, com base na pressão de entrada da rede e valores das cargas nas respectivas saídas. O equacionamento matemático utiliza modelos de escoamento de gás em dutos desenvolvidos com base nas leis da Física (Mecânica dos Fluidos e Circuitos Elétricos), possibilitando o controle do processo.

No capítulo III serão apresentados os principais métodos de resolução das formulações descritas.

## **CAPÍTULO III: MÉTODOS DE SOLUÇÃO NUMÉRICA DE REDES DE ESCOAMENTO DE GÁS EM REGIME PERMANENTE**

Uma rede de distribuição de gás pode ser considerada em estado de regime permanente quando os valores das quantidades caracterizando o escoamento do gás no sistema são independentes do tempo, sendo o sistema descrito por um conjunto de equações algébricas não-lineares. O problema da simulação de redes de gás em regime permanente é geralmente aquele do cálculo dos valores das pressões nos nós e dos escoamentos nos dutos individuais para valores das pressões de entrada conhecida e do consumo de gás nos nós de entrega.

O objetivo da simulação estática é o de estimar os valores das pressões nos nós e as taxas de escoamento nos dutos, que devem satisfazer a equação de escoamento e, juntamente, com os valores de saídas e entradas, devem satisfazer a 1ª e a 2ª leis de Kirchhoff.

A importância do problema de eficiência dos métodos vem da grande dimensão das redes a serem simuladas. Isso requer um custo computacional relativamente elevado, levando-se em conta o tempo de computação envolvido bem como o armazenamento dos dados, justificando a escolha de um bom método. Nos itens 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 estão apresentados os principais métodos de resolução do problema de escoamento de gás em redes de distribuição.

### **3.1 MÉTODO NODAL DE NEWTON: CASO MULTI-DIMENSIONAL**

O conjunto de equações nodais que descreve a rede de gás é uma matriz representada pela equação 2.51.

No método nodal de Newton a aproximação inicial é feita para as pressões nodais, e essa aproximação é sucessivamente corrigida, até que a solução final seja encontrada. O desequilíbrio em um nó é o erro nodal, que é uma função de todas as pressões nodais, exceto as do nó de referência, que são fixados, que é denotada por  $f(P_1)$ , sendo  $P_1$  um vetor de dimensão  $n_1$  dos quadrados das pressões para altas e médias pressões nas saídas dos nós. Há um erro nodal para cada nó e esse conjunto de erros é representado pela equação 3.1.

$$F(P_1) = \begin{bmatrix} f_1(P_1, P_2, \dots, P_n) \\ f_2(P_1, P_2, \dots, P_n) \\ \dots \\ f_{n_1}(P_1, P_2, \dots, P_n) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

sendo que:

$F$  representa um vetor de funções.

Os erros nodais estão incorporados na equação 2.51 e descritos conforme a equação 3.2.

$$F(P_1) = A_1 [\phi'(-A^T P)] - L \quad (3.2)$$

Os erros  $F(P_1)$  tendem a zero quando as pressões se aproximam de seus verdadeiros valores.

O método Nodal de Newton resolve a equação 3.2 iterativamente, até que o erro nodal se torne menor que os especificados na tolerância. O esquema de iteratividade para a correção das aproximações das pressões nodais pode ser expresso pela equação 3.3.

$$P_1^{k+1} = P_1^k + (\delta P_1)^k \quad (3.3)$$

sendo que:

$k$  representa o número de iterações.

O termo  $(\delta P_1)^k$  é calculado pela equação 3.4.

$$J^k (\delta P_1)^k = -[F(P_1)]^k \quad (3.4)$$

A matriz  $J$  é a matriz nodal de Jacobi expressa pela equação 3.5.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial P_1} & \frac{\partial f_1}{\partial P_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{n_1}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial P_1} & \frac{\partial f_2}{\partial P_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial P_{n_1}} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{n_1}}{\partial P_1} & \frac{\partial f_{n_1}}{\partial P_2} & \cdots & \frac{\partial f_{n_1}}{\partial P_{n_1}} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Devido ao fato da matriz jacobiana  $J$  ser negativa ( $-1/m_1$ ), as correções nodais das pressões deverão ser positivas se o erro no nó for positivo, e serão negativas se os erros nodais forem negativos.

Um erro nodal positivo significa que o escoamento para o nó é maior do que o escoamento para fora do nó. O resultado positivo da correção  $(\delta P_1)$  aumentará a pressão no  $i$ -ésimo nó. Isso terá o efeito de reduzir o escoamento para dentro do nó. O oposto é verdadeiro quando o erro nodal for negativo.

A principal desvantagem do método nodal é a lenta convergência do método. As equações nodais possuem raízes quadradas ou termos com expoentes  $1/2$  ou  $1/m_1$ . São termos ineficientes computacionalmente e o método é extremamente sensível para valores iniciais, se as estimativas iniciais para o processo iterativo estiverem longe da solução, o processo computacional diverge.

Na figura 3.1 é apresentado um fluxograma da solução numérica do problema do escoamento pelo Método Nodal de Newton.

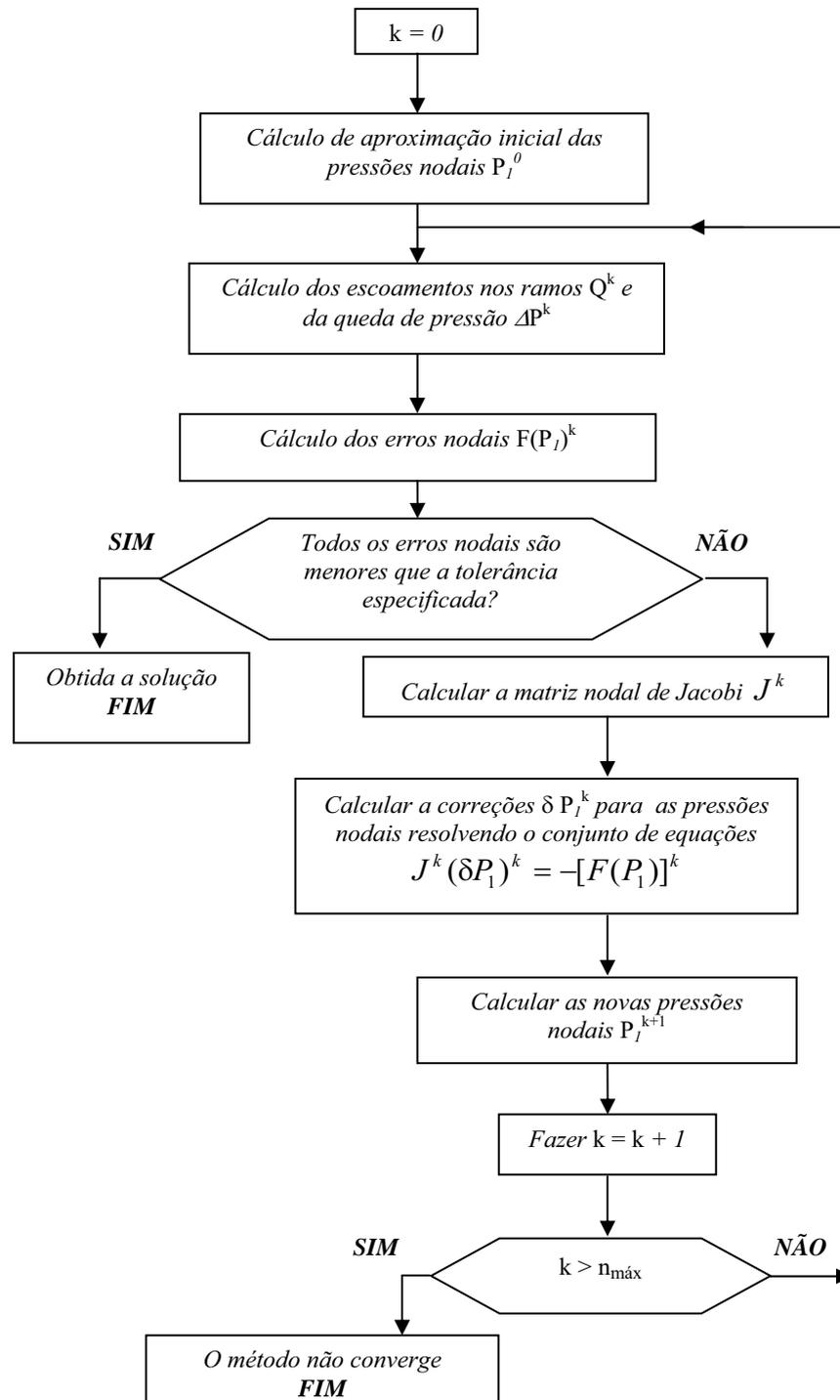


Figura 3.1 – Fluxograma do método nodal de Newton.

### 3.2 MÉTODO NODAL DE NEWTON: CASO UNI-DIMENSIONAL (*HARDY-CROSS*)

O método nodal de Newton, caso uni-dimensional, também denominado de método de *Hardy-Cross*, resolve o mesmo conjunto de equações nodais como no método de Newton, caso multi-dimensional, isto é, um conjunto de equações como mostrado na equação 3.2.

Contudo, o presente método determina a solução de cada equação do conjunto individualmente, já o método multi-dimensional determina a solução do conjunto de equações como um todo.

Uma aproximação inicial é feita para as pressões nodais, e essa aproximação é corrigida para cada nó, para uma melhor aproximação. Esse processo é repetido até que todos os erros nodais sejam menores que uma tolerância especificada.

Para todo nó fonte  $i$ , o erro nodal de pressão  $f_i(P_1)$ , pode ser calculado pela equação 3.5.

$$f_i(P_1) = \sum_{j=1}^m a_{ij} [\phi'(-A^T P)] - L_i \quad (3.5)$$

O esquema iterativo para a correção da aproximação da pressão no nó  $i$  é apresentado na equação 3.6.

$$P_i^{k+1} = P_i^k + \delta P_i^k \quad (3.6)$$

sendo que:

$\delta P_i^k$  pode ser calculado como é mostrado na equação 3.7.

$$\delta P_i^k = -(J_{ii}^k)^{-1} f_i(P_1)^k \quad (3.7)$$

O termo  $J_{ii}$  não é uma matriz, mas uma simples variável representada pela equação 3.8.

$$J_{ii} = \frac{\partial f_i}{\partial P_i} \quad (3.8)$$

sendo que:

$f_i$  se entende por  $f_i(P_1)$ .

Comparando a equação 3.8 com a equação 3.5, observa-se que  $J_{ii}$  é a diagonal da matriz nodal de Jacobi correspondente ao nó  $i$  do método nodal de Newton, caso multidimensional. O método nodal *Hardy-Cross*, simplesmente ignora os elementos fora da diagonal principal da matriz nodal de Jacobi. Ele trata cada nó individualmente sem consideração de qualquer conexão com outros nós.

Na aplicação prática anterior, durante uma iteração simples, a melhor aproximação para todas as pressões é calculada independentemente, considerando cada nó sucessivamente. As correções para as pressões nodais são calculadas usando o escoamento dos ramos que são dependentes das pressões nodais. Os escoamentos nos ramos permanecem sem mudança nessa mesma iteração enquanto as pressões nodais são sucessivamente corrigidas.

O número de iterações requeridas para obter a solução pode ser reduzido recalculando os escoamentos dos ramos após cada pressão nodal individual ter sido corrigida durante uma iteração. Pelo fato dos elementos fora da diagonal serem ignorados, na matriz nodal de Jacobi, no método nodal de *Hardy-Cross*, a convergência é mais lenta do que o método nodal de Newton, caso multidimensional. A curva da função  $f(P_1)$  versus  $P_1$  para alta e média pressão ou  $f_i(p_1)$  versus  $p_1$  para rede de gás a baixa pressão para qualquer nó tem a forma de um S, como na figura 3.2:

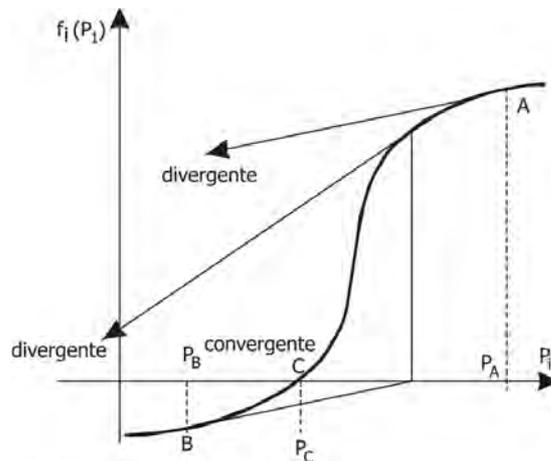


Figura 3.2 – Características da convergência para o método nodal de Newton.

Isso pode resultar em fracasso para encontrar a solução se a solução inicial estimada para o processo iterativo é do tipo  $P_A$  ou  $P_B$ . Para a garantia da convergência para a solução  $P_C$ , a aproximação inicial deve ser próxima da solução.

O método nodal pode ser melhorado por uma interpolação ou processo da média se o processo iterativo diverge da solução, como mostrado na figura 3.3.

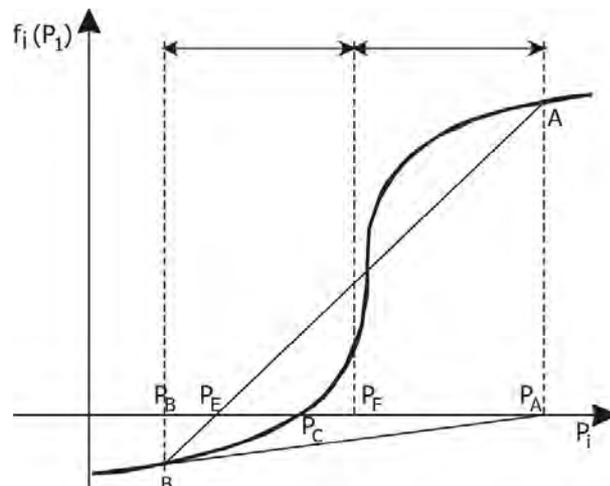


Figura 3.3 – Interpolação e processo da média.

Se duas aproximações consecutivas,  $P_B$  e  $P_A$ , para a solução  $P_C$  ter resíduos,  $f_B$  e  $f_A$ , de sinais opostos, então uma melhor aproximação pode ser obtida tomando um valor de  $P$ , entre  $P_A$  e  $P_B$ . A interpolação liga os pontos  $A$  e  $B$  por uma linha reta e uma nova

aproximação  $P_E$  é encontrada onde a linha cruza o eixo ( $OP$ ), na figura (3.3). Uma nova aproximação  $P_F$  é tomada como a média dos valores de  $P_B$  e  $P_A$ .

A figura 3.4 apresenta o fluxograma para o método nodal *Hardy-Cross*.

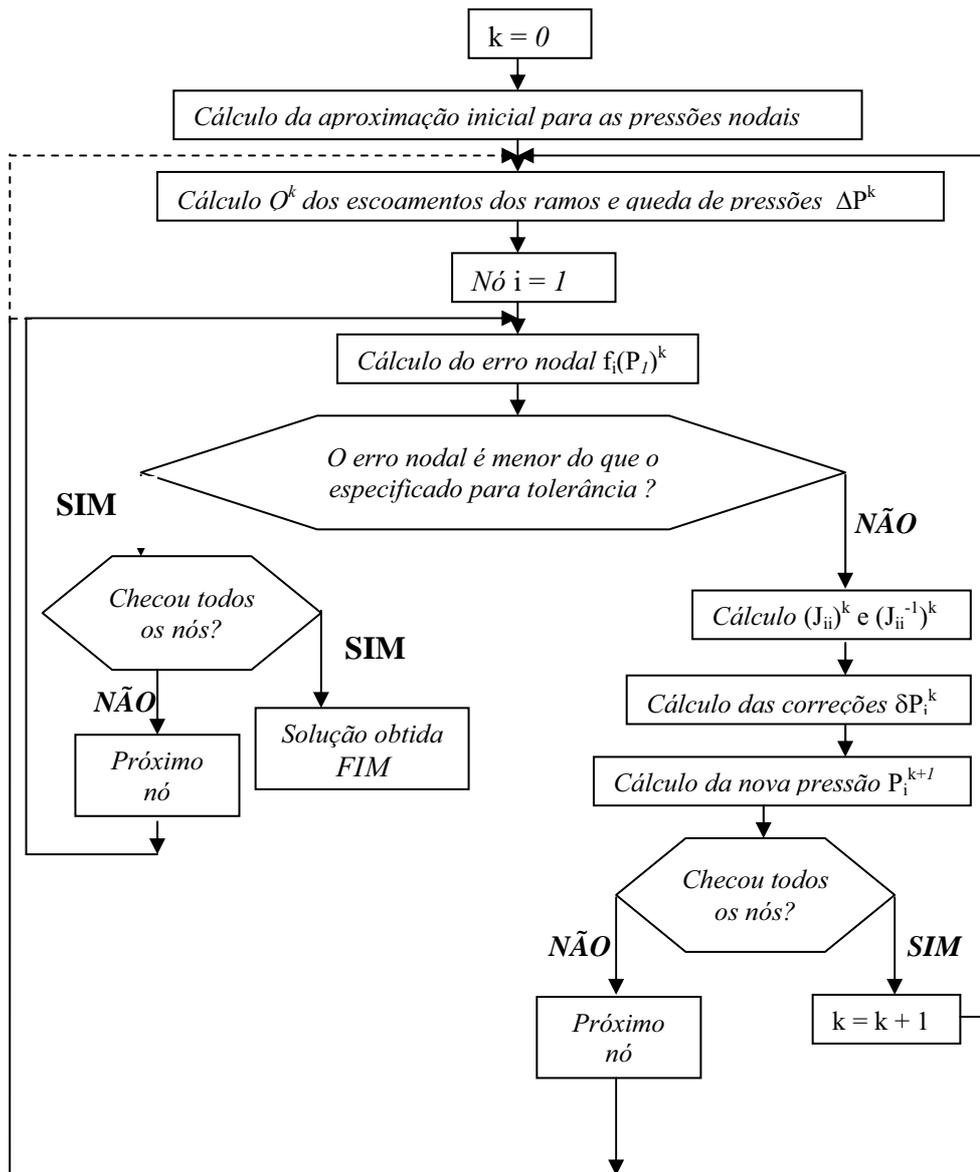


Figura 3.4 – Fluxograma método nodal *Hardy-Cross*.

### 3.3 MÉTODO DE MALHA DE NEWTON: CASO MULTI-DIMENSIONAL

A equação 2.54 representa um conjunto de equações de malha que descreve uma rede de fluxo de gás. Essas equações têm uma representação matemática simples, usando a 2ª lei de Kirchhoff que afirma que a soma das quedas de pressões em torno de qualquer malha é zero. O método da malha requer que o conjunto de malhas na rede esteja definido.

Uma aproximação inicial para escoamentos nos ramos assegura que o balanço dos escoamentos existe para cada nó. Visto que os escoamentos nos ramos são aproximações para os seus valores verdadeiros, uma malha de escoamento é obtida.

A malha de escoamento é a correção do escoamento para ser adicionado aos escoamentos aproximados dos ramos e convergir aos verdadeiros valores. Considerando uma rede de malha simples como a apresentada na figura 3.5.

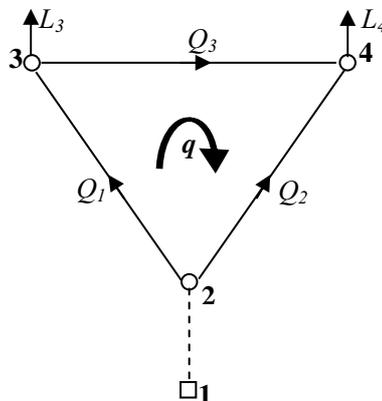


Figura 3.5 – Rede de distribuição de gás, malha simples.

A malha de ramos conectando os nós 2, 3 e 4, é a parte de uma rede conectada por um conjunto de outros ramos para o nó fonte 1.  $L_3$  e  $L_4$  são cargas de saídas dos nós 3 e 4.  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$  são os escoamentos nos ramos. Se a aproximação inicial consiste em fazer  $Q_3 = 0$ , então as aproximações iniciais para os escoamentos nos ramos podem ser representadas pelas equações 3.10.

$$\begin{aligned}
Q_1^0 &= L_3 \\
Q_2^0 &= L_4 \\
Q_3^0 &= 0
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

A malha de correção de escoamento é denotada por  $q$  e especifica a direção horária em torno da malha. Os verdadeiros valores para os escoamentos nos ramos são então obtidos das aproximações iniciais e das direções da malha, como apresentado no sistema de equações 3.11.

$$\begin{aligned}
Q_1 &= Q_1^0 + q = L_3 + q \\
Q_2 &= Q_2^0 - q = L_4 - q \\
Q_3 &= Q_3^0 + q = q
\end{aligned}
\tag{3.11}$$

Um particular escoamento de ramo pode ser influenciado por mais do que um escoamento de malha, ou seja, o ramo conectando os nós 1 a 3 na figura 3.5. Assim, em geral, os escoamentos de ramos são funções de suas aproximações iniciais e de todas as malhas de escoamentos, como apresentado na equação 3.12.

$$Q = Q^0 + B^T q \tag{3.12}$$

sendo que:

$q$  = vetor dos escoamentos de malha de dimensão  $k$ , e  $k$  = número de malhas.

No método de malha, em cada iteração, a equação 3.11 será diferente de zero. Os escoamentos nos ramos são somente aproximações de seus verdadeiros valores e, portanto, as quedas de pressões calculadas desses escoamentos terão somatório diferente de zero em torno de uma malha. Isso introduz um erro de malha em cada malha que é uma função de todos os ramos de escoamentos, sendo denotado por  $f(q)$ . Existe um erro de malha para cada malha, sendo o conjunto de erro representado pela equação 3.13.

$$F(q) = \begin{bmatrix} f_1(q_1, q_2, \dots, q_k) \\ f_2(q_1, q_2, \dots, q_k) \\ \dots\dots\dots \\ f_k(q_1, q_2, \dots, q_k) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

sendo que:

$F$  é uma função vetorial.

Os erros de malha são incorporados na equação 3.11.

Segundo Osiadacz (1987),  $F(q)$  pode ser calculada como apresentado na equação 3.12.

$$F(q) = B[\phi(Q^0 + B^T q)] \quad (3.12)$$

O método de malha de Newton resolve a equação 3.12 iterativamente até que os erros de malha sejam menores do que uma tolerância especificada.

O esquema iterativo para correção das aproximações para os escoamentos de malha pode se representado pela equação 3.13.

$$q^{k+1} = q^k + \delta \cdot q^k \quad (3.13)$$

As correções para os escoamentos de malhas são computadas pela equação 3.14.

$$J^k \delta q^k = -[F(q)]^k \quad (3.14)$$

A matriz  $J$  é a matriz jacobiana em malha dada ela equação 3.15.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_k} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_k}{\partial q_1} & \frac{\partial f_k}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_k}{\partial q_k} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

sendo que:

$f_i$  significa  $f_i(q)$ .

As aproximações teóricas são ilustradas em termos de redes na figura 3.6.

As correções para os escoamentos na malha são encontradas na equação 3.14. Visto que a matriz de Jacobi é positiva, a correção para o escoamento na malha será negativa se o erro na malha for positivo e será positivo se o erro for negativo. Um erro positivo na malha significa que a soma das quedas de pressões em torno da malha, na direção do fluxo da malha é maior que zero. Os resultados das correções  $\delta q$  decrescerão no escoamento de ramos na mesma direção do escoamento na malha e cresce os escoamentos nos ramos em direção oposta do fluxo na malha. Isso causará uma redução da soma das quedas de pressões em torno da malha. O oposto é verdadeiro quando o erro em malha for negativo.

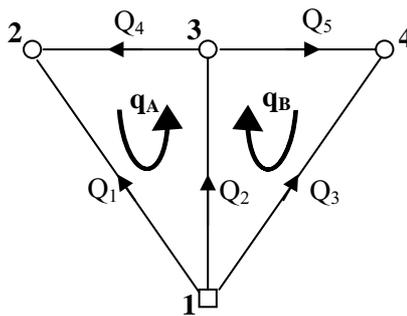


Figura 3.6 – Grafo da rede de distribuição de gás.

Na figura 3.7 é apresentado o fluxograma para o método de malha de Newton.

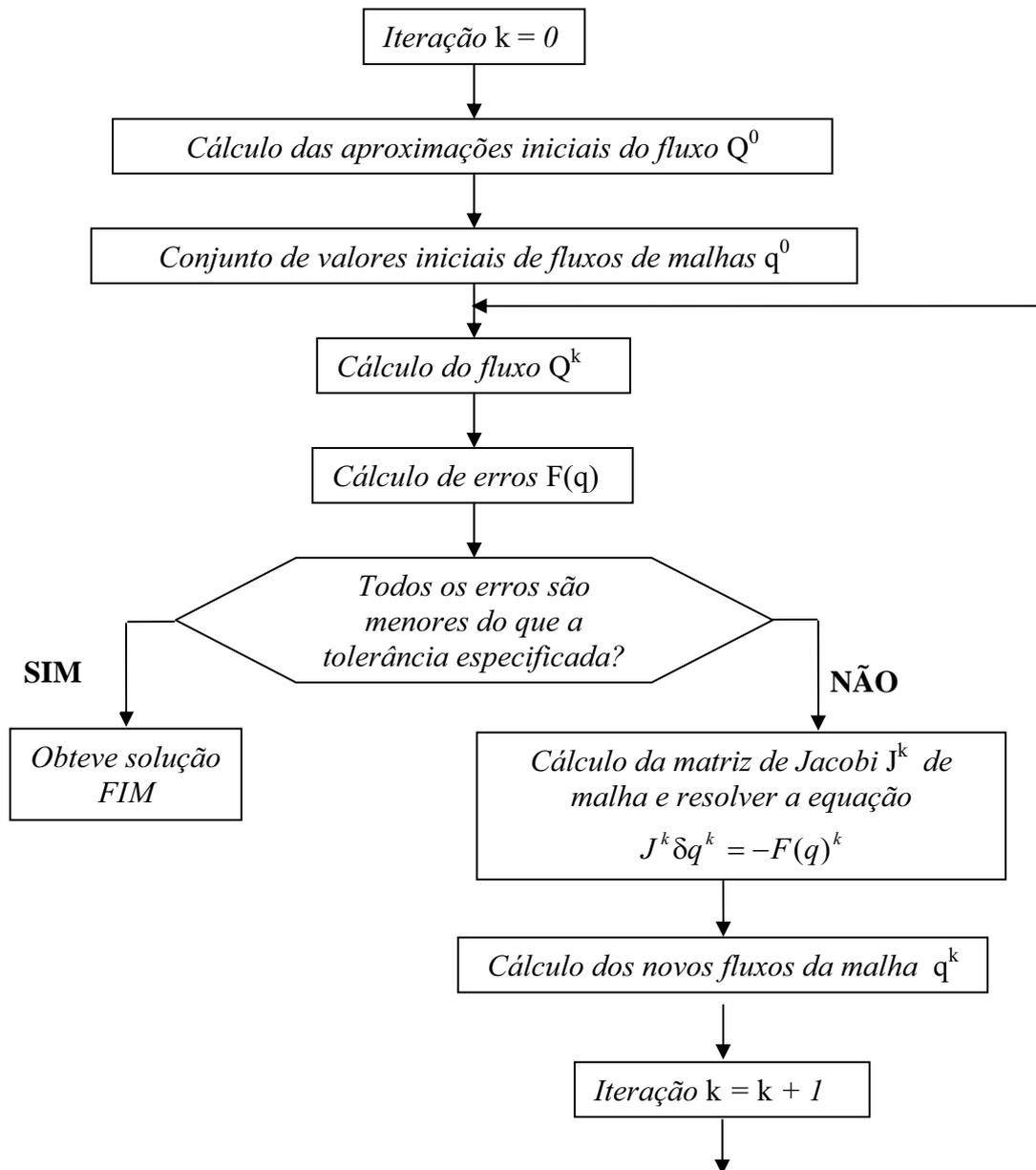


Figura 3.7 – Fluxograma do método de malha de Newton.

### 3.4 MÉTODO DE MALHA DE NEWTON: CASO UNI-DIMENSIONAL (HARDY-CROSS)

O método de malha de *Hardy-Cross* soluciona o mesmo problema do conjunto de equações em malha, como no método de malha de Newton multi-dimensional, isto é, o conjunto de equações representado pela equação 3.12.

O método *Hardy-Cross* soluciona cada equação do conjunto individualmente, ao passo que o método de Newton resolve o conjunto de equações como um todo.

Uma aproximação inicial é feita para os escoamentos nos ramos  $Q$  e os escoamentos de malha  $q$ . Para cada malha, a aproximação do escoamento em malha é sucessivamente corrigido para um melhor valor. Esse processo é repetido até todos os erros em malha serem menores que uma tolerância especificada.

Para qualquer ramo  $j$ , o erro em malha é calculado pela equação 3.15.

$$f_j(q) = \sum_{i=1}^m b_{ji} [\phi(Q^0 + B_q^T)] \quad (3.15)$$

O esquema iterativo para as correções das aproximações para o escoamento em malha para a malha  $j$  pode ser representado pela equação 3.16.

$$\begin{aligned} q_j^{k+1} &= q_j^k + \delta \cdot q_j^k \\ \delta \cdot q_j^k &= -(J_{jj}^k)^{-1} \cdot f_j(q)^k \end{aligned} \quad (3.16)$$

O termo  $J_{jj}$  é uma variável simples que pode ser calculada como representado na equação 3.17, e representa o termo da diagonal na matriz de Jacobi de malha de Newton  $J$ , correspondendo ao ramo  $j$ .

$$J_{jj} = \frac{\delta \cdot f_j}{\delta \cdot q_j} \quad (3.17)$$

sendo que:

$f_i$  representa  $f_i(q)$ .

O método em malha de *Hardy-Cross* simplesmente ignora os elementos fora da diagonal da matriz malha de Jacobi, tratando cada malha individualmente, sem consideração com qualquer interconexões com outras malhas.

O método possui boas características de convergência, como mostrado na figura 3.8, contudo, não considerando os elementos fora da diagonal da matriz de Jacobi, o método resulta numa convergência lenta e de grande sensibilidade para as condições iniciais em comparação com o método de malha de Newton, caso multi-dimensional.

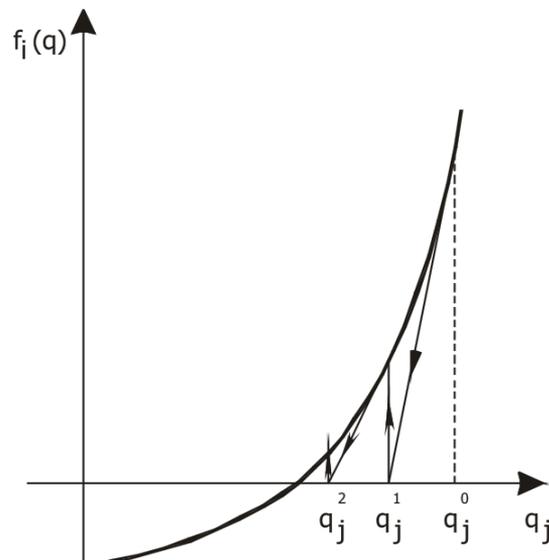


Figura 3.8 – Características de convergência para o método de malha.

Na figura 3.9 é apresentada um fluxograma do método de malha de Newton, caso unidimensional.

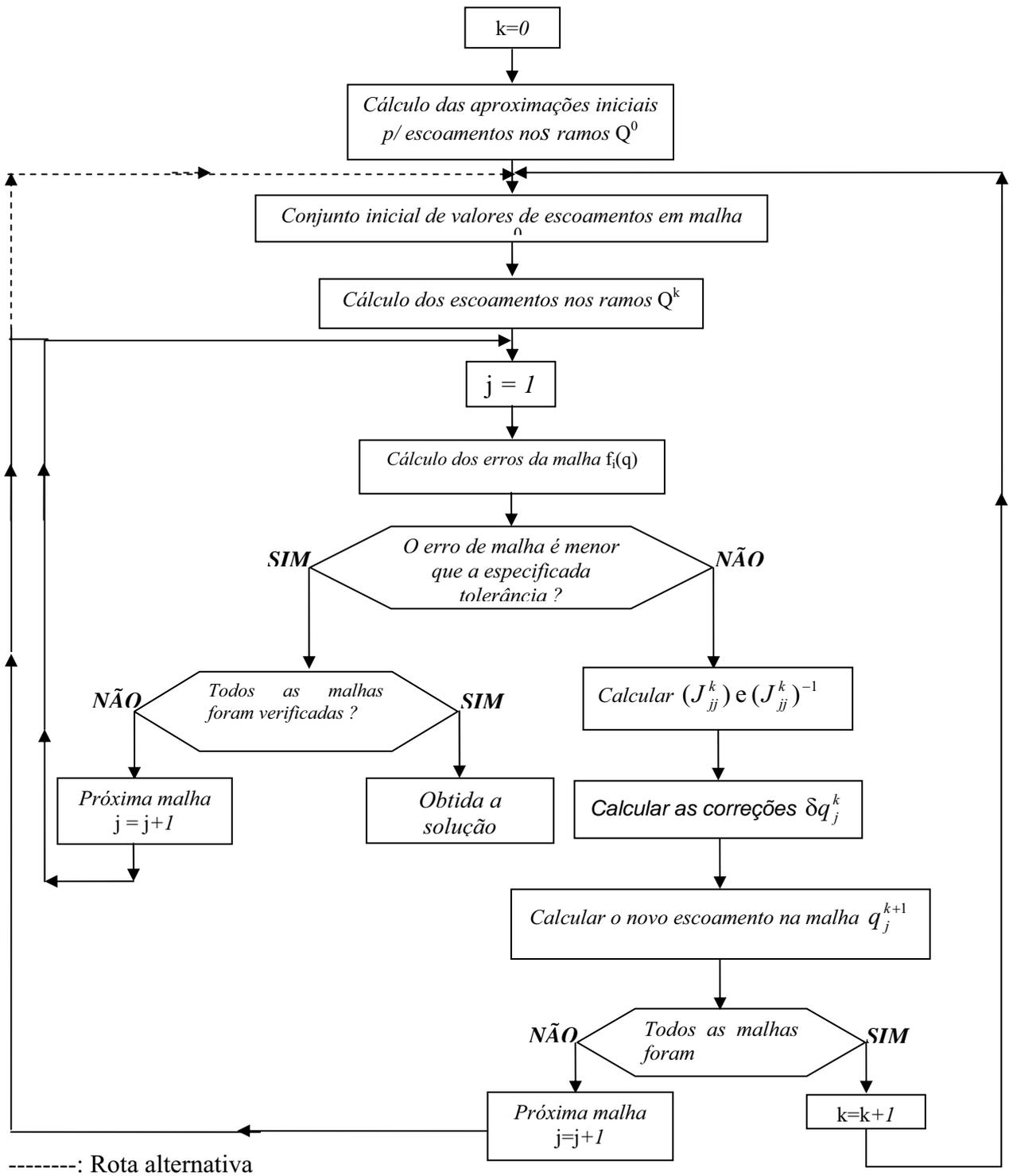


Figura 3.9 – Fluxograma do método de malha de Newton - *Hardy-Cross*.

### 3.5 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS DE NEWTON

Aplicando os métodos de Newton para a rede apresentada na figura 3.10, o objetivo é determinar a pressão em cada nó para manter constantes as vazões de saída  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ .

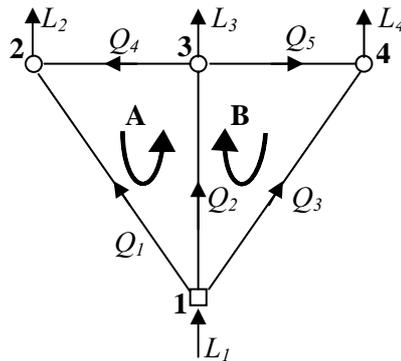


Figura 3.10 – Rede de escoamento de gás em regime permanente.

Na tabela (3.1) são apresentadas as vazões de saída nos nós 2, 3 e 4, e a pressão de entrada no nó 1, e na tabela (3.2), os diâmetros, comprimentos e sentido convencional de fluxo de gás nos dutos. Denomina-se nó de remessa o nó de entrada do fluxo de gás no duto, e nó de recebimento o respectivo nó de saída.

Tabela 3.1 – Dados de vazão e pressão da rede proposta.

Nó	Vazões ( $m^3/h$ )	Pressão (mbar)
1	—	30
2	250	—
3	100	—
4	180	—

Tabela 3.2 – Dados de diâmetro e comprimento dos dutos da rede proposta.

Duto ( $k$ )	Nó de Remessa	Nó de Recebimento	Diâmetro ( $mm$ )	Comp. ( $m$ )
1	1	2	150	680
2	1	3	100	500
3	1	4	150	420
4	3	2	100	600
5	3	4	100	340

Utilizando programas implementados em MATLAB, que estão apresentados no Anexo “A”, ao final deste trabalho, e utilizando uma tolerância de  $10^{-4}$ , comparou-se os vários métodos de solução de Newton para a rede de distribuição de gás natural em regime permanente expressa na figura 3.10, obtendo-se os resultados demonstrados na tabela (3.3).

Tabela 3.3 – Resultados comparativos dos métodos de Newton.

Métodos de Newton Utilizados	Iterações ( $k$ )	Pressão ( $mbar$ )			
		P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
Nodal: Caso Multi-Dimensional	5	30.0000	25.0349	25.7682	26.6572
Nodal: Caso Uno-Dimensional	11	30.0000	25.0348	25.7682	26.6572
Malha: Caso Multi-Dimensional	5	30.0000	25.0349	25.7682	26.6572
Malha: Caso Uno-Dimensional	24	30.0000	25.0348	25.7682	26.6572

### 3.6 CONCLUSÃO

Na solução do problema de rede de gás, o modelamento utilizou conceitos de circuitos elétricos, relativamente à aplicação as leis de Kirchhoff, com relação às correntes nos nós e tensões em malhas. Assim, como em redes elétricas, o cálculo de determinados parâmetros para redes de gás, podem resultar em equações não-lineares, dificultando a implementação numérica.

Nos métodos de Newton avaliados, foi utilizado como sub-rotina, o método de Gauss-Seidel para a solução dos sistemas lineares obtidos em cada iteração. Os resultados da implementação numérica podem ser considerados bons para todos os métodos, visto que a convergência foi obtida em um número pequeno de iterações, não havendo diferenças significativas entre eles. Isso se dá pelo bom comportamento das características do fluxo do gás em regime permanente no interior dos dutos.

Porém é bom ressaltar que, devido ao fato das equações de malha serem quadráticas ou próximas de quadráticas em função do expoente  $m_1$  (equação 2.42), o seu grau de convergência aumenta com uma menor sensibilidade relativa às condições iniciais.

Na implementação da rotina de simulação do sistema proposto no capítulo VII desse trabalho, foi utilizado o método Nodal de Newton, caso multi-dimensional.

## **CAPÍTULO IV: ISOLAMENTO DE DUTOS COM VÁLVULAS PROPORCIONAIS ELETRO-HIDRÁULICAS CONTROLADAS VIA CONTROLADORES PID**

Os sistemas pneumáticos de posicionamento têm inúmeras aplicações, tanto em equipamentos móveis quanto na indústria, direcionando fluidos para partes distintas de um circuito, controlando a pressão e o escoamento. Atualmente, uma aplicação destacada destes sistemas é no controle e interrupção de fluxo de gás natural em dutos de redes de distribuição.

Quando existe uma variação em qualquer ponto de demanda de gás, uma nova pressão de entrada deve ser aplicada para atender à nova conformação da rede, provocando um transitório na rede. Enquanto as novas pressões de saída não forem atingidas, sistemas pneumáticos de posicionamento devem atuar no sentido de estabilizar o sistema. Se por qualquer motivo, deseja-se isolar determinada secção de uma rede, interrompendo o fluxo de gás, sistemas pneumáticos de posicionamento são usados para este fim, ou para evitar o retorno de gás em dutos.

A estrutura básica dos sistema pneumáticos de posicionamento, para análise, é a de um equipamento cuja entrada é um sinal de tensão elétrica  $Vr$  e a saída é o posicionamento  $Xa$  de uma carga, correspondendo a uma abertura ou fechamento do sistema.

Levando-se em conta que a redução do tempo de estabilização do sistema é importante, um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) é incorporado ao sistema, com a finalidade de minimizar a tempo de resposta da válvula quando solicitada.

Nesse capítulo será apresentada a modelagem matemática de um sistema pneumático de posição, com um controlador PID acoplado. Na seqüência utilizou-se o modelo proposto para o controle de fluxo de gás natural em uma rede de distribuição de 36 dutos para simulação em computador.

## 4.1 MODELAMENTO MATEMÁTICO DE VÁLVULAS ELETRO-PNEUMÁTICAS

Os modelos matemáticos dos elementos que fazem parte de uma malha de controle são necessários para a análise e controle de sistemas dinâmicos. Tais modelos são representados por equações matemáticas que relacionam a entrada com a saída dos sistemas. A base para esses modelos matemáticos é dada pelas leis da física que regem o comportamento dinâmico de cada elemento deste sistema.

### 4.1.1 Sistema pneumático de posicionamento

Os sistemas pneumáticos são sistemas fluidos que usam principalmente o ar como meio para a transmissão de sinais e de potência. Assim como os sistemas hidráulicos, também os sistemas pneumáticos são largamente empregados na automação industrial, sendo que vários tipos de controladores pneumáticos são encontrados em sistemas de controle.

Um sistema pneumático de posicionamento consiste de uma servo-válvula proporcional eletro-hidráulica cuja entrada é um sinal de tensão elétrica  $V_r$ , e a saída é o deslocamento  $X_a$ , de uma carga acoplada ao sistema. O diagrama de blocos simplificado deste mecanismo está representado na figura 4.1.

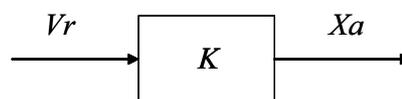


Figura 4.1 – Sistema pneumático de posição.

sendo  $K$  a constante de proporcionalidade do mecanismo.

A relação entre a entrada e a saída deste sistema pode ser dada pela equação 4.1.

$$Xa = K \cdot Vr \quad (4.1)$$

A análise deste mecanismo quanto à estabilidade e tempo de resposta é apresentado com um melhor detalhamento em três novos blocos, representando, respectivamente, o mecanismo do sistema pneumático de posicionamento, o sensor de posição que transforma o deslocamento  $Xa$  em um sinal de tensão elétrica e um bloco comparador e amplificador do erro entre o tensão de posição e a tensão de referência, como é mostrado na figura 4.2.

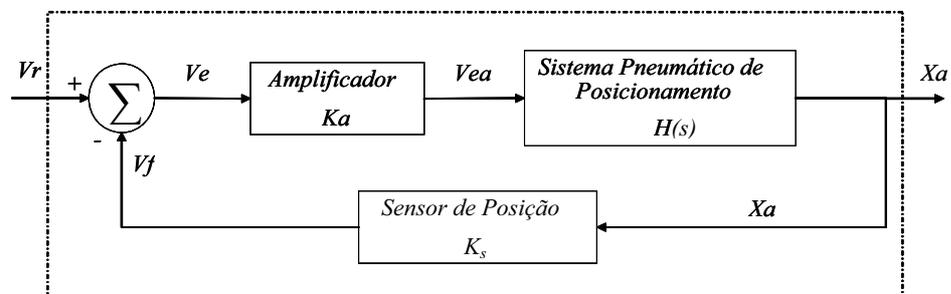


Figura 4.2 – Diagrama do sistema pneumático de posicionamento.

sendo que:

$K_s$  = constante de realimentação,  $Ka$  = constante de amplificação e  $H(s)$  = função de transferência do sistema pneumático de posicionamento. O sinal de tensão amplificado  $Vea$ , promove no bloco do sistema de posicionamento o deslocamento  $Xa$  da carga acoplada à servo-válvula. A tensão de realimentação pode ser representada pela equação 4.2, a tensão de erro pela equação 4.3 e a tensão de erro amplificada pela equação 4.4.

$$Vf = K_s \cdot Xa \quad (4.2)$$

$$Ve = Vr - Vf \quad (4.3)$$

$$Vea = Ka \cdot Ve \quad (4.4)$$

A planta pode ser representada pelo sistema pneumático de posicionamento representado na figura 4.3, que apresenta uma configuração composta de uma servo-válvula eletro-hidráulica de simples estágio, tipo carretel, de quatro vias e um cilindro hidráulico de duplo efeito com carga acoplada. A figura apresenta a configuração básica dessa válvula.

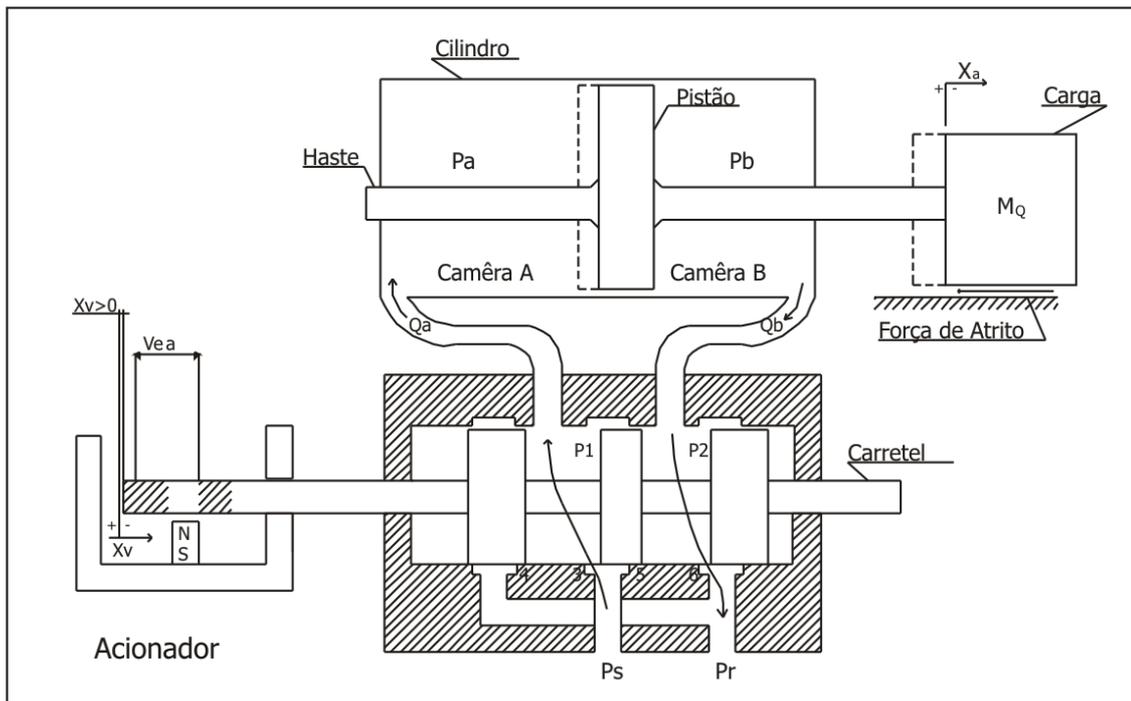


Figura 4.3 – Sistema pneumático de posicionamento.

Existe um componente eletro-mecânico que converte sinal de tensão ( $V_{ea}$ ) num deslocamento mecânico do carretel da válvula. Quando a pressão  $P_a$  da câmara  $A$  for superior à pressão  $P_b$  da câmara  $B$ , ocorrerá um deslocamento  $X_v$  da carga de massa  $M_a$  para a direita, caso a sua inércia seja vencida, dando origem a uma vazão  $Q_a$  entrando na câmara  $A$  e uma vazão de saída  $Q_b$  na câmara  $B$ , com  $Q_a = Q_b = Q_c$ , sendo  $Q_c$  denominada vazão de controle.

Para manter as pressões constantes, e dependendo do sinal de  $X_v$ , um fluido hidráulico é introduzido nas câmaras  $A$  ou  $B$ , para manter o cilindro em movimento.

O diagrama de blocos da figura 4.4 representa o mecanismo completo do comportamento do sistema, composto pela função de transferência da válvula proporcional

eletro-hidráulica e cilindro hidráulico em série com uma constante de amplificação  $K_a$  do erro  $V_e$  e em paralelo com uma constante de realimentação  $K_s$  da tensão de saída  $V_f$ .

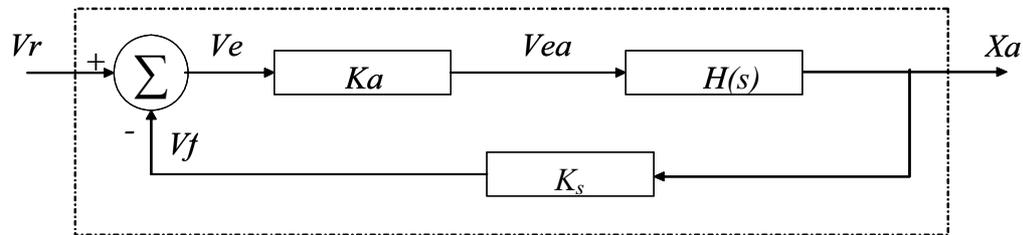


Figura 4.4 – Diagrama do mecanismo completo.

O bloco da planta  $H(s)$  da válvula proporcional eletro-hidráulica pode ser desmembrado em vários blocos, levando-se em conta os parâmetros da válvula. A figura 4.5 apresenta o diagrama de blocos completo desta válvula, De Negri, et al. (1997).

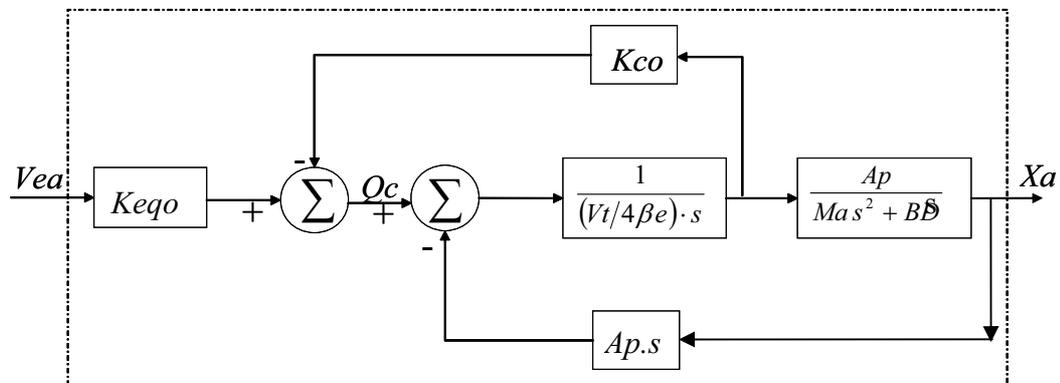


Figura 4.5 – Descrição do bloco da válvula proporcional eletro-hidráulica.

sendo que:

$A_p$  = área da coroa do pistão ( $m^2$ );  $B$  = coeficiente de atrito viscoso;  $K_{co}$  = variação da vazão quando se varia a pressão próxima do ponto de operação;  $K_{eqo}$  = variação da vazão obtido experimentalmente;  $\beta e$  = módulo de elasticidade efetivo;  $V_t$  = volume total de óleo contido em ambas as linhas ( $m^3$ ).

A função de transferência do diagrama apresentado na figura 4.5, representando a válvula proporcional eletro-hidráulica pode ser descrita pela equação 4.5.

$$H(s) = \frac{Xa(s)}{Vea(s)} = \frac{Keqo \cdot Ap}{(Ma \cdot Vt/4\beta e)s^3 + (Ma \cdot Kco + B \cdot Vt/4\beta e)s^2 + (B \cdot Kco + Ap^2)s} \quad (4.5)$$

A determinação da função de transferência é importante para o estudo do comportamento dinâmico da válvula, como o tempo de resposta e a estabilidade do sistema.

Com o auxílio da equação 4.2 pode-se, agora, obter a função de transferência em malha fechada do diagrama da figura 4.4, representada pela equação 4.6, em que a planta  $H(s)$  está em série com o ganho  $Ka$  e, em paralelo com o ganho de realimentação  $Ks$ .

$$G(s) = \frac{Xa(s)}{Vr(s)} = \frac{Ka \cdot Ap \cdot Keqo}{A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4} \quad (4.6)$$

sendo que:

$$A_1 = (Ma \cdot Vt/4\beta e), \quad A_2 = (Ma \cdot Kco + B \cdot Vt/4\beta e), \quad A_3 = (B \cdot Kco + Ap^2) \quad e$$

$$A_4 = (Ks \cdot Ka \cdot Ap \cdot Keqo).$$

As constantes  $Kco$  e  $Keqo$  podem ser obtidas experimentalmente e  $Ks$ , ganho do sensor de posição, é obtido do catálogo do fabricante. Assim, variando a constante  $Ka$  na equação 4.6 é possível obter as respostas do sistema e analisar a sua estabilidade.

Emprestando os valores dos parâmetros da válvula proporcional eletro-hidráulica contidos em De Negri et al. (1997), e apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de válvula eletro-hidráulica.

$Ap = 10^{-3} \text{ m}^2$	$Ks = 10\text{V}/0,25\text{m} = 40 \text{ V/m}$	$B = 1,2 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$	$Ps = 2,0 \cdot 10^7 \text{ Pa}$
$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$Kco = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ (m}^3/\text{s)/Pa}$	$\beta e = 7,0 \cdot 10^8 \text{ Pa}$	$Vt = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
$Ma = 150 \text{ Kg}$	$Keqo = 2 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)/V}$		

Considerando o mecanismo com condições iniciais nulas, isto é,  $V_r = V_e = V_{ea} = V_f = X_a = 0$ , e, desejando aplicar uma entrada  $V_r = 10 V$  a fim de atingir o deslocamento máximo de  $0,25m$  na carga.

As respostas à entrada  $V_r = 10 V$  na equação 4.5, para ganhos hipotéticos  $K_a = 3, 5, 7$  e  $9$ , estão representadas pelos deslocamentos da carga  $X_a$  na saída, conforme a figura 4.6.

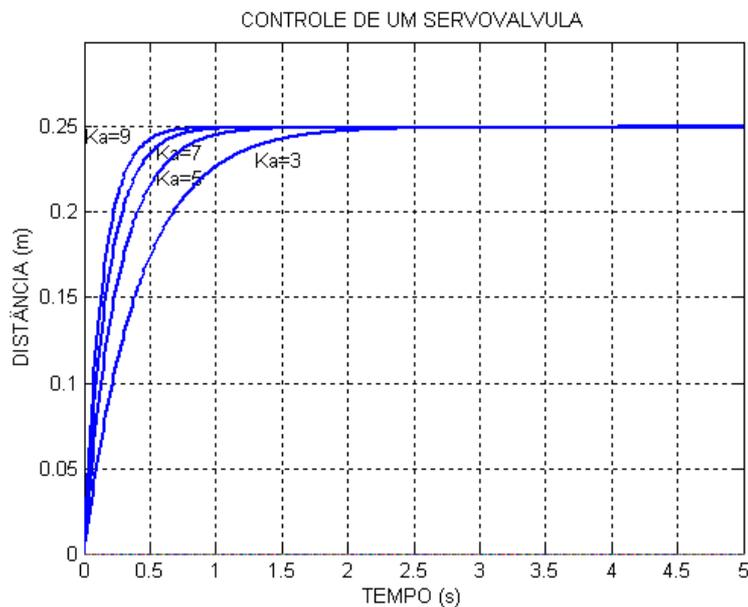


Figura 4.6 – Gráfico da abertura da válvula proporcional x tempo, com ganhos  $K_a = 3, 5, 7$  e  $9$ .

No gráfico da figura 4.6 observa-se que as quatro curvas atingem a posição desejada, com a precisão estabelecida, dependendo somente do tempo transcorrido. Quanto maior for o valor de  $K_a$ , mais rapidamente a válvula é aberta. Acontece que o aumento do valor de  $K_a$  é limitado, pois, para um valor muito alto de  $K_a$ , o sistema pode entrar em oscilação, atingindo, até mesmo a instabilidade. Por outro lado, a variação dos parâmetros também não melhora o desempenho do sistema, devido a baixa sensibilidade a essas variações. A sensibilidade será tanto mais baixa quanto maiores forem os ganhos, De Negri, et al. (1997).

O acoplamento de um controlador PID à essa válvula melhora o seu desempenho, impondo maior rapidez de abertura com estabilidade. Assim, no diagrama de blocos da figura 4.6, a caixa correspondente ao ganho  $K_a$  é substituída pela função de transferência do

controlador PID, como é apresentado na figura 4.7.

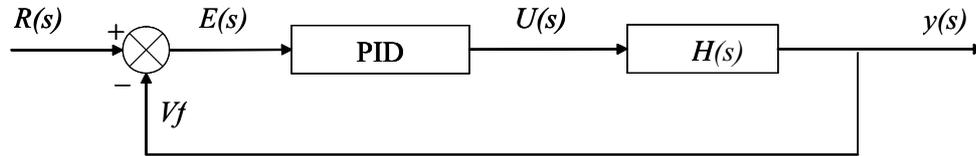


Figura 4.7 – Controlador PID em série com a Planta  $H(s)$ .

### 4.1.2 Controlador PID

Nesta seção trata-se da família dos controladores PID por se mostrarem mais eficientes no desempenho do sistema de controle para válvulas proporcionais eletro-hidráulicas, controlando-as mais satisfatoriamente, com estabilidade.

Na figura 4.7 é apresentada a representação de um sistema de controle em malha fechada de uma entrada e uma saída (SISO) de um grau de liberdade, Bolton (1995), de um controlador PID em série com a planta  $H(s)$  a ser controlada.

Os membros da família de controladores PID incluem três ações: proporcional (P), integral (I) e derivativa (D). A combinação dessas ações dá origem aos controladores denominados P, I, PI, PD e PID.

A ação sobre a planta do controlador PID reúne as vantagens de cada uma das três ações de controles individuais. A equação diferencial que rege o comportamento dinâmico deste controlador é dada por Bolton (1995), e é apresentada pela equação 4.7.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p \cdot \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

A função de transferência do controlador PID pode ser representada pela equação 4.8.

$$C_{PID}(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} + \tau_d \cdot s \right) \quad (4.8)$$

sendo que:

$Kp$  = ganho proporcional ajustável,  $\tau_i$  = tempo integral,  $\tau_d$  = tempo derivativo,  $e(t)$  = erro entre a saída real para a saída de referência e  $u(t)$  = a saída do controlador.

Existem algumas dificuldades nos ajustes dos ganhos do controlador PID para que este possa apresentar um bom desempenho. Os métodos clássicos de ajuste de Ziegler e Nichols (Z-N) são bastante utilizados para esse fim. Dentre os vários métodos de Ziegler e Nichols existentes, neste trabalho realizou-se os ajustes desses ganhos utilizando o Método de Oscilação.

## 4.2 MÉTODO DE OSCILAÇÃO DE AJUSTE DE ZIEGLER E NICHOLS DO CONTROLADOR PID

Neste método, toma-se como base na malha de controle somente o ganho proporcional e, de acordo com o valor do ganho utilizado, o sistema entra em oscilação. Utilizando o período de oscilação, os ganhos do controlador PID podem ser ajustados. Este procedimento é válido somente para plantas estáveis em malha aberta, levando-se em conta os seguintes passos:

- utilizando somente o controle proporcional  $Kp$ , começando com um valor pequeno do ganho, incrementá-lo até que o sistema comece a oscilar (oscilações lineares observadas na saída do controlador).
- registrar o ganho crítico do controlador  $Kp = Kc$  e o período de oscilação na saída do controlador,  $\tau_c$  ( no diagrama de Nyquist, corresponde o valor de  $Kc \cdot G(j\omega)$  cruzando o ponto (-1,0) para  $Kp = Kc$  );
- ajustar os parâmetros do controlador segundo a tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros de ajuste pelo método de oscilação de Ziegler-Nichols.

Controlador	$Kp$	$\tau i$	$\tau d$
P	$0,50 Kc$		
PI	$0,45 Kc$	$\tau_c / 1,2$	
PID	$0,60 Kc$	$0,5 \tau_c$	$0,25 \tau_c$

No modelo adotado, considerando uma planta hipotética estável, com função de transferência representada pela equação 4.9.

$$G_o(s) = \frac{1}{(s+2)^3} \quad (4.9)$$

Utilizando-se o método de oscilação proposto, pode-se determinar os parâmetros do controlador PID como apresentado nas equações 4.10 e 4.11.

$$Kc \cdot G_o(j\omega_c) = -1 \Leftrightarrow Kc = -(j\omega_c + 2)^3 \quad (4.10)$$

$$Kc = 6\omega_c^2 - 8 + j(\omega_c^3 - 12\omega_c) \quad (4.11)$$

sendo que:

$$\omega_c = \sqrt{12} \text{ e } Kc = 64.$$

O período crítico pode ser dado pela equação 4.12.

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\omega_c} \cong 1,81 \quad (4.12)$$

Utilizando a tabela 4.1, obtêm-se os valores:  $K_p = 38,4$ ,  $\tau_i = 0,91$  e  $\tau_d = 0,45$ .

A função de transferência em malha aberta pode ser dada pela equação 4.13.

$$G_o(s) \cdot C_{PID}(s) = K_p \cdot \frac{\tau_d s^2 + s + 1/\tau_i}{s(s+2)^3} = \frac{17,28s^2 + 38,4s + 42,20}{s(s+2)^3} \quad (4.13)$$

Aplicando a equação 4.13 no sistema da figura 4.5, em malha fechada, obtêm-se a saída representada pela figura 4.8.



Figura 4.8 – Saída do sistema controlado com um PID.

Pode-se ainda melhorar a saída do sistema ajustando através de simulação, um melhor valor para  $\tau_d$ . Por exemplo, para  $\tau_d = 1$ , a saída fica sensivelmente melhorada.

Na seção 4.3 será analisado o comportamento dinâmico da válvula proporcional acoplado a ela um controlador PID.

### 4.3 CONTROLADOR PID ACOPLADO À VÁLVULA PROPORCIONAL

A figura 4.9 representa o diagrama de blocos de um controlador PID em série com a planta representando a função de transferência da válvula proporcional eletro-hidráulica.

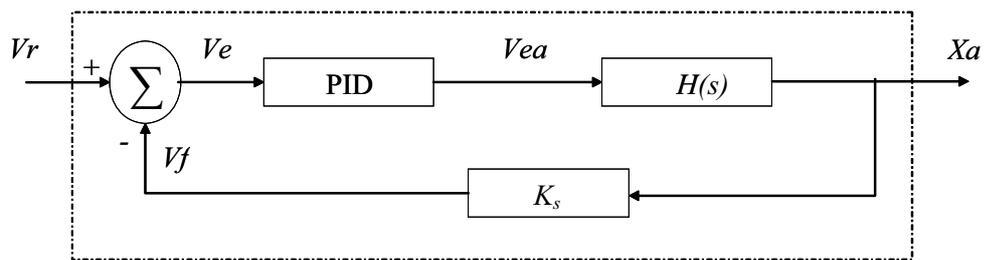


Figura 4.9 – Controlador PID em série com a válvula proporcional.

A função de transferência em malha aberta do sistema representado pela figura 4.9, é obtida das equações 4.6 e 4.8, tendo sido substituído o bloco do amplificador ( $K_a$ ) pelo controlador PID.

$$G_{PID}(s) = \frac{K_p \cdot A_p \cdot K_{eqo} \cdot (\tau_d \cdot s^2 + s + 1/\tau_i)}{A_1 s^4 + A_2 s^3 + A_3 s^2 + A_4 s} \quad (4.14)$$

Os parâmetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$ , são calculados conforme é apresentado nas equações 4.15 a 4.18.

$$A_1 = (Ma \cdot Vt/4\beta e) \quad (4.15)$$

$$A_2 = (Ma \cdot Kco + B \cdot Vt/4\beta e) \quad (4.16)$$

$$A_3 = (B \cdot K_{co} + Ap^2 + K_s \cdot K_p \cdot Ap \cdot Keqo \cdot \tau_i \cdot \tau_d) \quad (4.17)$$

$$A_4 = (K_s \cdot K_p \cdot Ap \cdot Keqo) \quad (4.18)$$

Para a determinação dos valores de  $A_i, (i = 1, 2, \dots, 5)$ , deve-se, antes de mais nada, determinar os valores dos parâmetros do controlador PID, usando o método de ajuste de Ziegler e Nichols. Os valores adotados estão apresentados na seção 4.2.

Fechando a malha de realimentação e admitindo os mesmos valores dos parâmetros da válvula considerada na tabela 4.1, bem como os parâmetros do PID apresentados na tabela 4.2. Para uma entrada degrau unitário obtém-se a saída  $X_a$ , representada no gráfico da figura 10.



Figura 4.10 – Gráfico da abertura da válvula proporcional com o controlador PID.

Comparando os gráficos das figuras 4.8 e 4.10, nota-se que nesta última a o tempo de estabelecimento é de 0,1 segundos, bem menor do que o tempo gasto no gráfico da primeira figura, justificando o uso do controlador PID no controle desta válvula.

#### 4.4 ISOLAMENTO DE DUTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL UTILIZANDO SISTEMA DE POSICIONAMENTO COM CONTROLADOR PID ACOPLADO À VÁLVULA ELETRO-PNEUMÁTICA

Nos sistemas de distribuição de gás existem sistemas de posicionamento, representado por válvulas proporcionais eletro-hidráulicas, fixadas em pontos estratégicos da rede. As válvulas têm as funções de isolar trechos da rede, impedir o refluxo do gás, controlar fluxos de gás nos pontos de entrega, etc. A ação desses equipamentos é independente do funcionamento natural da rede. Para a rede funcionando em regime permanente, a ação de uma válvula pode provocar um transitório, atingindo, novamente, o regime permanente com novas adequações nos parâmetros de entrada e saídas do sistema. O procedimento de isolamento de duto é realizado através de válvulas proporcionais eletro-hidráulicas, designadas como válvulas bloqueio, controladas manualmente ou por um sistema remoto de supervisão. Nessas válvulas são acoplados controladores PID para permitir um melhor desempenho no seu funcionamento, impondo maior rapidez de resposta.

##### 4.4.1 Implementação numérica

Na implementação numérica utilizou-se uma rede de distribuição de gás de dezenove dutos, doze nós de saída, ou seja, pontos de demanda de gás natural e um nó de entrega, conforme demonstrado na figura 4.10. Na rede adotada o valor da pressão de entrada é de 40 *mbar*, de forma a manter constante a pressão nos pontos de entrega de gás para o consumo.

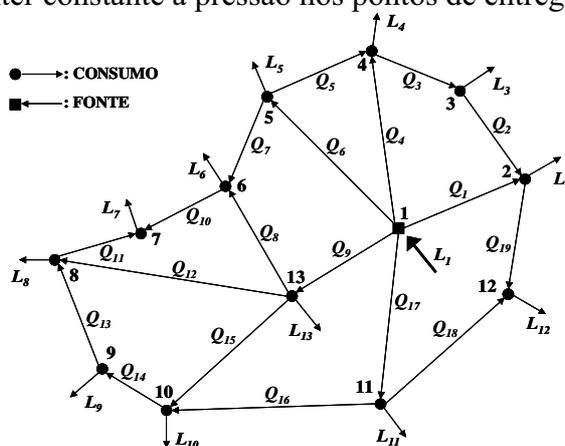


Figura 4.11 - Rede de distribuição de gás.

Os dados da rede estão representados nas tabelas 4.3 e 4.4. Na tabela 4.3, são apresentados os dados das demandas de gás para cada nó e na tabela 4.3, os parâmetros dos dutos. Aplicando o Método Nodal de Newton na rede sem vazamento, portanto, sem nenhum isolamento, obteve-se os resultados que estão descritos na tabela 4.4. Os escoamentos negativos indicam que os sentidos convencionados na figura 4.11 são contrários aos escoamentos reais da rede em operação. Simulou-se um vazamento no duto 12, detectado pelo software computacional que verifica constantemente os escoamentos medidos em cada módulo de supervisão.

No exemplo adotado, as leituras obtidas pelos medidores de vazão dos módulos de supervisão  $MS_e$  e  $MS_s$  instalados nos nós de entrada e saída do duto 12, foram, respectivamente,  $Q_e = 2.851,86 \text{ [m}^3/\text{h]}$  e  $Q_s = 2.809,08 \text{ [m}^3/\text{h]}$ . Em regime de escoamento a vazão na entrada e saída do duto podem ser consideradas iguais. O vazamento provocou uma perda de 1,5% do escoamento de entrada do duto, considerando a constante de proporcionalidade  $m=1$ . A constatação dessa diferença pelo software dispara um alarme, acionando automaticamente o algoritmo neural de localização do vazamento, a ser apresentado no Capítulo 6.

Através da RNA, a localização do ponto do vazamento no duto 12 foi de 30.878 metros do nó de entrada do duto. Neste instante as válvulas de bloqueio instaladas nos nós de entrada ( $MS_e$ ) e saída ( $MS_s$ ) do duto 12, são acionadas para que se fechem, executando assim a terceira fase do sistema. Após esse procedimento, aplicando o Método Nodal de Newton na rede com o duto isolado, obteve-se os resultados apresentados também na tabela 4.4, que servirão para continuidade do monitoramento dessa rede até que o duto 12 seja novamente liberado.

Tabela 4.3 - Dados de vazão e pressão nos nós.

Nó (k)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Pressão [bar]
1	-	40
2	4500	-
3	3200	-
4	12000	-
5	2800	-
6	4200	-
7	1800	-

8	3500	-
9	2900	-
10	5500	-
11	4100	-
12	8000	-
13	8500	-

Tabela 4.4 - Dados dos dutos e resultados obtidos antes e após vazamento no duto 12.

DUTO (k)	Nó (Rem.)	Nó (Rec.)	Diâm. (m)	Comp. (m)	Q Antes Vazam. (m <sup>3</sup> /h)	Do Q Após (m <sup>3</sup> /h)	O Vazam.
1	1	2	0,7	50000	14.201,3		14.248,0
2	3	2	0,6	40000	-2.668,85		-2.601,96
3	4	3	0,7	35000	531,14		598,03
4	1	4	0,7	66000	12.726,6		12.746,4
5	5	4	0,6	40000	-195,29		-148,07
6	1	5	0,7	68000	12.540,0		12.558,7
7	5	6	0,7	35000	9.935,51		9.907,17
8	13	6	0,6	47000	-2.143,0		-1.009,8
9	1	13	0,6	45000	12.258,0		12.110,0
10	6	7	0,6	35000	3.592,46		4.697,32
11	8	7	0,6	32000	-1.792,4		-2.897,3
12	13	8	0,7	90000	2.851,86		0,00
13	9	8	0,7	45000	-1.144,3		602,67
14	10	9	0,6	28000	1.755,68		3.502,67
15	13	10	0,7	65000	3.049,24		4.619,93
16	11	10	0,6	82000	4.206,43		4.382,74
17	1	11	0,6	65000	9.273,95		9.336,63
18	11	12	0,6	63000	967,51		853,90
19	2	12	0,7	43000	7.032,49		7.146,10

## 4.5 CONCLUSÃO

Analisado os resultados obtidos nas simulações da válvula proporcional eletro-hidráulica antes e após a introdução do controlador PID, percebe-se claramente a redução do tempo de abertura da válvula após a colocação desse controlador.

A dificuldade encontrada foi à determinação das constantes do controlador PID, sendo necessária a introdução neste trabalho do método de ajuste de Zeigler e Nichols do controlador PID, o que facilitou a tarefa para a determinação dos parâmetros do controlador.

A saída do sistema em malha fechada da válvula em série com o controlador PID, representando a abertura da válvula proporcional eletro-hidráulica, teve um intervalo de tempo muito reduzido para atingir regime permanente, com estabilidade.

Por outro lado, a ação dessa válvula, com controlador PID, sobre o sistema de distribuição de gás, isolando um nó de saída de gás (consumidor 22), teve resposta imediata do sistema de aquisição e supervisão de dados da rede, calculando novos valores para as pressões de saída e fluxo de entrada de gás na rede, no sentido de atingir novamente o regime permanente em um intervalo de tempo que depende da inércia da rede.

Deve-se considerar que com a introdução do controlador PID houve um aumento dos valores de pico na região transitória do deslocamento, como mostra a figura 4.10, o que deverá ser considerado na escolha da válvula a ser utilizada. Na região de fechamento total, tais variações deverão estar de acordo com as condições operacionais de cada fabricante.

Outro fator que deve ser levado em consideração em um rápido fechamento de válvulas de controle de fluxo é o golpe de Ariet provocado pela interrupção brusca do escoamento na tubulação, que pode causar danos a outras válvulas instaladas nas proximidades, devido a violações de padrões de pressão.

## **CAPÍTULO V: MÉTODOS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL**

A detecção de vazamentos vem ganhando importância com o aumento das restrições legais para o manuseio de produtos que apresentem riscos ambientais. Tais produtos, de extrema importância para o modelo atual de desenvolvimento, devem continuar sendo transportados e distribuídos, sem o que tal desenvolvimento não se faz possível. Apesar do gás natural não apresentar riscos de poluição do meio ambiente, uma vez que o mesmo dissipar-se-ia no caso de um vazamento, há risco de explosão e incêndio nas cercanias do gasoduto.

Nesse capítulo serão apresentados os métodos mais usuais de detecção de vazamentos em dutos.

### **5.1 MÉTODOS UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE VAZAMENTO DE GÁS NATURAL EM DUTOS E REGIME PERMANENTE DE ESCOAMENTO**

Para a detecção do vazamento de gás natural em dutos, existem vários métodos, baseados nas equações apresentadas no Capítulo 2. Cada um destes métodos apresentam vantagens e desvantagens, devendo portanto ser analisado o estágio de desenvolvimento e a aplicabilidade a cada caso. Também, o nível de sucesso da aplicabilidade de um método pode variar com condições que nada tem a ver com o método, quais sejam, a manutenção do duto, a calibração dos instrumentos de medição, e o sistema de comunicação de dados, levando em alguns casos a atrasos significativos para a detecção do vazamento do fluido em questão.

Outro aspecto importante para o sucesso de um método é o tipo de fluido escoando pela tubulação. Para os líquidos, considerações como incompressibilidade são usadas com

muita frequência e com boa qualidade dos resultados obtidos. Tal consideração em muito simplifica as equações do escoamento, possibilitando que os cálculos sejam feitos mais rapidamente que quando se consideram as equações completas para o escoamento. Entretanto, para os gases, tal consideração leva a erros elevadíssimos, não devendo ser feita na grande maioria dos casos. Assim, gases devem levar em conta variações da massa específica com a pressão, o que leva o sistema de equações à não-linearidade, aumentando em muito complexidade e tempo envolvidos nos cálculos de escoamento. Neste tópico são apresentados os principais métodos computacionais usados para a detecção de vazamentos de fluidos em dutos, tomando-se como base o trabalho apresentado por Whaley et al. (1992).

### 5.1.1 Balanço de volume

Um dos primeiros métodos computacionais para a detecção de vazamentos de fluidos é o método que considera o balanço de volume no duto.

O princípio deste método é o da conservação da massa do sistema, ou seja, o volume de fluido que entra menos o volume de fluido que sai deve ser igual a variação da quantidade de fluido dentro do duto para o mesmo intervalo de tempo. Esta relação é mostrada na equação 5.1.

$$\beta = \sum_{\text{entrada}} \int_{t_1}^t Q_{\text{entrada}} \cdot dt - \sum_{\text{saída}} \int_{t_1}^t Q_{\text{saída}} \cdot dt - \frac{\Delta m}{\rho} \quad (5.1)$$

sendo que:

$\beta$  representa o balanço de volume e deve ser zero para um sistema sem vazamento. Em caso de vazamento, seu valor será igual ao total perdido até o instante do cálculo. O termo  $\frac{\Delta m}{\rho}$  representa a variação do volume de fluido no duto.

Os termos  $Q_{\text{entrada}}$  e  $Q_{\text{saída}}$  são normalmente medidos nas entradas e nas saídas dos dutos, denominadas na rede de distribuição de gás natural de estações de entregas.

Assim, as integrais da equação 5.1 podem ser substituídas pelos somatórios apresentados na equação 5.2.

$$\int_{t_1}^t Q .dt = \sum_k Q_k (t_k - t_{k-1}) \quad (5.2)$$

sendo que:

o índice  $k$  está relacionado com o tempo de leitura do sistema de aquisição de dados empregado.

Para o caso do duto conter acumuladores de volume ao invés de medidores de vazão instantâneos, substitui-se as integrais pela subtração dos volumes acumulados no final e no início da medição, chegando-se ao volume durante a medição.

O método de balanço de volumes apresenta implicitamente a hipótese de escoamento permanente no duto, ou seja, a massa introduzida no duto durante um certo intervalo de tempo será igual aquela sendo entregue na saída do duto para o mesmo intervalo de tempo. O menor volume de vazamento que pode ser detectado usando esta técnica simplificada será igual à incerteza no empacotamento do duto, ou seja, somente serão detectados vazamentos maiores que o valor possível de ser estocado no duto durante o empacotamento em regime de fluxo. Esta hipótese não funciona bem para gasodutos desde que o empacotamento do duto possa variar rapidamente a depender das condições de fluxo. Também, para escoamento bifásico ou trifásico este método apresenta limitações de aplicação. Uma vez que o cálculo leve em conta o termo relativo à variação da massa no duto, ocorre a melhoria dos resultados de detecção, mas para isso torna-se necessário o conhecimento do perfil de pressão e temperatura no duto. Simplificadamente pode-se considerar as condições na entrada e na saída do duto e, assim, computar-se a massa específica média do escoamento e, portanto, conhecendo-se o volume do duto, a massa interna ao sistema. Mesmo assim este método ainda apresenta sérias restrições para a detecção de vazamento em fluidos muito compressíveis. Além do mais, o volume do duto é função da temperatura, trazendo mais um complicador à análise.

A sensibilidade do método aumenta com o aumento do tempo de análise. Isto se deve em parte ao empacotamento do duto. Também, ruído na instrumentação do duto leva ao aumento do tempo de detecção, uma vez que ruído implica em erro associado à medição. Também, os erros provenientes das medições de pressão e temperatura, e ainda composição do fluido escoando no duto, levam ao aumento do erro da quantidade de massa sendo

empacotada no duto, fazendo com que diminua assim a sensibilidade do método ao vazamento.

Tais fatores tendem a prejudicar a resposta do sistema de detecção de vazamento baseado em balanço de volume, levando muitas vezes a tempos significativos, dependendo dos volumes de vazamento. Outro problema detectado é a existência de transientes normais à operação de dutos, que podem levar constantemente a alarmes falsos, inviabilizando o método.

### 5.1.2 Análise de pressão em um ponto do duto

Outro método de detecção de vazamento que já foi bastante empregado é o que faz uso de medições de pressão para acompanhar a despressurização do duto que segue o fenômeno de vazamento. Mais recentemente, análise estatística vem sendo aplicada para a determinação das variações de pressão relevantes que possam ser consideradas relacionadas com vazamentos.

O princípio por trás do método é que a pressão decrescerá no duto com o aparecimento de um vazamento. Também, métodos estatísticos podem ser aplicados para definir se o decréscimo de pressão é devido a vazamentos ou não. Aqui também se aplicam técnicas de inteligência artificial. Outro fato importante é que, qualquer outra ocorrência que leve à diminuição da pressão no duto deve ser conhecida pela operação do sistema de detecção, qual seja, operação no duto, e então deve ser esperado novamente que o regime permanente seja alcançado para a aplicação do método.

A operação do método consiste em armazenar um histórico das pressões medidas e dividi-las em dois períodos, um chamado de antigo e outro de recente, e calcular as médias para os dois conjuntos conforme apresentado nas equações 5.3 e 5.4.

$$\bar{P}_a = \frac{1}{k_a} \sum_{i=1}^{K_a} P_i \quad (5.3)$$

sendo que:

$\bar{P}_a$  representa a média de pressão no período antigo e  $k_a$  o número de pressões armazenadas no respectivo período.

$$\bar{P}_r = \frac{1}{k_t - k_r} \sum_{i=k_a+1}^{K_t} P_i \quad (5.4)$$

sendo que:

$\bar{P}_r$  representa a média de pressão no período recente,  $k_t$  e  $k_r$  o número total de pressões armazenadas e o número de pressões armazenadas no período recente, respectivamente.

Calcula-se as variâncias para os dois conjuntos como é apresentado nas equações 5.5 e 5.6.

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{k_a - 1} \sum_{i=1}^{K_a} (P_i - \bar{P}_a)^2 \quad (5.5)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{k_t - k_a - 1} \sum_{i=k_a+1}^{K_t} (P_i - \bar{P}_r)^2 \quad (5.6)$$

Suspeita-se do vazamento quando a média do conjunto dos pontos recentes é significativamente menor que a média do conjunto dos pontos antigos, levando-se em conta as variâncias calculadas. Com os resultados, pode-se aplicar a distribuição de *Student* para analisar a relevância ou não de um vazamento.

A implementação da técnica é direta. Os valores medidos para a pressão são colocados em forma de lista, sendo os mais recentes colocados na última posição, fazendo com que o mais antigo seja descartado. Assim, para cada nova pressão obtida da medição, um novo cálculo deve ser efetuado, considerando agora novos conjuntos de valores antigos e recentes.

Também, um mesmo conjunto de dados pode ser particionado de várias maneiras, e todas podem ser analisadas consecutivamente, aumentando assim a velocidade e a sensibilidade do método.

Outro aspecto interessante é o fato de um conjunto muito grande de dados de pressão levar a uma detecção demorada e, em contrapartida, um conjunto muito pequeno pode apresentar falsos alarmes devidos aos erros de medição da pressão. Além do mais, quando se usa um conjunto muito grande de dados, estes dados podem ser particionados de várias formas. Caso se divida o conjunto pela metade, ter-se-á um sub-conjunto para os dados recentes muito grande, levando a uma detecção demorada. Para uma divisão que leve a um sub-conjunto pequeno dos dados recentes, erros de medição poderão afetar a detecção. O que deve ser feito então é considerar cada caso separadamente, sem soluções generalizadas.

Um fator crítico de um sistema de detecção de vazamento que considere tomadas de pressão é a identificação de variações devidas a regimes transientes de fluxo. Assim, o sistema deve analisar a existência do transiente e aguardar para alarmar somente quando tal transiente esteja terminado. Isso limita o método a operar somente em condições de fluxo permanente, quando na ocorrência de vazamento durante um regime transiente, o mesmo será desprezado.

A performance de um sistema que usa o método da análise de pressão num ponto do duto pode ser ajustada pela variação do número de pontos do conjunto de medição, número e tamanho do particionamento dos pontos, precisão do método de identificação dos transientes e limite de alarme da probabilidade de vazamento.

## 5.2 MÉTODOS UTILIZADOS NA DETECÇÃO DE VAZAMENTO DE GÁS NATURAL EM DUTOS EM TRANSIENTES

Um problema dos métodos apresentados nos itens 5.1.1 e 5.1.2 é o fato dos mesmos não tratarem de resultados durante os transientes comumente encontrados nas operações normalmente presentes em dutos. Também, o fato de ter-se um vazamento num duto levará o perfil de pressões e velocidades no mesmo a uma condição transiente, fazendo com que os métodos aqui se confundam com os transientes operacionais e o transiente devido ao vazamento. Para que tais transientes possam ser analisados, devem ser considerados métodos

que utilizam as equações da conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, apresentadas anteriormente no Capítulo 2 deste trabalho.

O uso de modelos que considerem tais equações faz com que seja previsto o perfil completo de pressões e velocidades ao longo do duto, permitindo então, por comparação ou balanço de materiais, que o vazamento possa ser identificado. Entretanto, tais modelos requerem numerosos cálculos, fazendo com que o acompanhamento real da condição do duto necessite de poderosas ferramentas computacionais, assim como computadores bastante velozes para a obtenção de suas soluções. Uma solução seria a simplificação dos modelos para o duto em questão, o que, sendo adotado, aumenta a incerteza da detecção do vazamento.

Outro problema para a adoção de tais modelos é o fato de existirem alguns parâmetros necessários a tais modelos que podem não estar diretamente disponíveis para o uso, podendo citar-se a rugosidade interna dos tubos, o atual empacotamento do duto e a calibração dos instrumentos de campo. Um modo de minimizar os erros na detecção dos modelos é a utilização de adaptatividade do modelo a operação para a determinação de parâmetros que caracterizem o duto, parâmetros estes que seriam únicos o duto em questão.

De uma forma geral os modelos utilizam a seguinte ordem para computar vazamentos em dutos: aquisição dos dados medidos no duto; uso de alguns dos dados medidos como condição de contorno para a integração das equações da continuidade, do momento e da energia; comparação dos resultados computados pelo modelo com aqueles adquiridos das medições e não utilizados na integração; execução dos cálculos de vazamento; se não existe vazamento, as discrepâncias são utilizadas para o ajuste do modelo ao duto (adaptatividade do modelo).

### **5.2.1 Método do desvio de pressão**

O Método do Desvio foi um dos pioneiros a serem baseados no uso de modelos para a determinação do perfil de pressões e velocidades no duto. Este método baseia-se na simulação da hidráulica do duto em tempo real, quando resultados para o término do trecho de duto são calculados pelo modelo e comparados aos valores medidos em campo. Desta forma, independentemente da ocorrência de transientes ao longo do duto, o modelo está apto a identificar variações das medições feitas no trecho final do duto como devidas a vazamentos

no mesmo. Desta forma, o acompanhamento completo do comportamento do escoamento através do duto, do empacotamento do mesmo, e das variações devidas a mudanças nas vazões dos diversos pontos de entrega do mesmo podem ser consideradas, obviamente que através de um custo computacional e monetário muito superior aquele obtido usando modelos não transientes. Entretanto para a análise de qual modelo utilizar, devem ser levadas em consideração várias condicionantes, o que faz tal escolha bastante difícil e complexa.

Para a demonstração da aplicação do método apresenta-se a figura 5.1, onde estão traçadas duas curvas representando o resultado do perfil de pressão no duto computado pelo método. A linha tracejada representa os valores previstos no modelo e a linha cheia o que realmente está sendo medido devido ao vazamento. O modelo utiliza a pressão na entrada do trecho  $P$  e a vazão na saída  $Q_m$  como condições de contorno para a solução das equações. Assim, chega a um resultado para a pressão na saída do trecho  $P_m$ . Desta forma, como a vazão medida na saída do trecho passa a ser menor que aquela da entrada do mesmo, o modelo prevê uma perda de carga menor do que a realmente existente na tubulação, ou seja, a pressão calculada na saída do trecho será maior que a medida pelo sistema. Assim sendo o sistema pode identificar que ocorreu vazamento na tubulação, sendo possível também a previsão do posicionamento de tal ocorrência.



Figura 5.1- Valores de pressão medidos e previstos pelo modelo transiente.

A vazão apresentada pelo vazamento será simplesmente a diferença  $Q_a - Q_m$ , sendo facilmente calculada. A determinação da posição aproximada do vazamento pode ser feita geometricamente pela análise do gráfico da figura 5.1, ou através de um sistema de redes neurais, como mostrado nos itens 5.3.

Para evitar que flutuações nas medições, fato normalmente encontrado em operação de dutos, façam com que o sistema de detecção alarme vazamento, define-se um *threshold* (limite aceitável de desvio do método), para o qual o método não alarmará. Entretanto, pequenos vazamentos podem apresentar-se dentro deste limite, fazendo com que sua detecção seja bastante dificultada ou até mesmo impossibilitada. A dimensão deste limite está diretamente relacionada com a qualidade da instrumentação utilizada, as dimensões do duto e a qualidade do modelo utilizado. Um problema para este método seria a presença de vários vazamentos consecutivos, o que geralmente não é considerado nestes tipos de sistemas. Uma divisão do duto em diversos trechos pode minimizar este problema para o caso de grandes tubulações.

Como pontos fortes deste método, pode-se citar: i) permite que vazamentos sejam identificados mesmo durante fortes transientes do escoamento no duto; ii) a detecção do vazamento é feita mais rapidamente do que quando se usa um modelo permanente; iii) pequenos vazamentos podem ser detectados em questão de poucos minutos, ou no pior caso, em poucas horas.

Como pontos fracos, pode-se citar: i) necessita maior investimento para a instrumentação do duto; ii) necessita medição de pressão e vazão na entrada e na saída do duto; iii) necessita medidas de temperatura nas injeções feitas no duto; iv) depende da adaptatividade do modelo ao duto em questão; v) e susceptível a erros de medição e incertezas na determinação das propriedades do fluido.

### **5.2.2 Modelo de compensação do balanço de volumes**

Esse método pode ser entendido como a extensão do método de balanço de volume, anteriormente considerado, à consideração do regime transiente de fluxo. O método permite que vazamentos possam então ser detectados pelo balanço de volume do duto mesmo sob condições transientes de fluxo no duto.

O modelo baseia-se na comparação, em tempo real, entre os balanços de fluxo apresentados por medições no duto, que podem ser representados pela equação 5.7, e as taxas de empacotamento no duto, gerados pelo modelo.

$$\phi = \Sigma Q_{entrada} - \Sigma Q_{saida} \quad (5.7)$$

As taxas de empacotamento do duto, considerando-se as pressões no início e no final do trecho, além da temperatura do escoamento podem ser representadas pela equação 5.8.

$$\varphi = f(P_{início}, P_{final}, T) \quad (5.8)$$

sendo que:

$P_{início}$  representa a pressão no início do duto,  $P_{final}$ , a pressão no final do duto e  $T$  a temperatura.

Baseado no modelo proposto, o balanço de volume no duto pode ser representada pela equação 5.9.

$$\beta = \phi - \varphi \quad (5.9)$$

Para o caso normal de operação do duto, na ausência de vazamento, o balanço apresentado em na equação 5.9 deve ser nulo. Este balanço nulo implica em dizer que a diferença entre as saídas e as entradas de massa no duto afeta diretamente a quantidade de massa interna ao sistema. Entretanto, quando o balanço deixa de ser nulo, tornando-se positivo, nota-se a existência de vazamento no duto. O caso do valor do balanço de volumes no duto ser negativo não pode ser atingido. Tal ocorrência significaria que estaria sendo acrescentada massa ao sistema sem que a mesma entrasse pelo balanço entre entradas e saídas do duto, o que definitivamente não é possível, podendo representar uma falha na modelagem do sistema. Aqui também, erros de medição no sistema trarão erros ao modelo, podendo levar a alarmes falsos de vazamento. Mais uma vez aplica-se um *threshold* para o qual o sistema não alarmará. Tal limite dependerá, entretanto, da qualidade da instrumentação e do sistema de medição empregado.

Como pontos fortes desse modelo pode-se citar: i) maior rapidez para a detecção de vazamento, quando comparada a métodos que não utilizam modelos transientes de escoamento; ii) grandes vazamentos podem ser, a depender dos tempos de análise do sistema, detectados rapidamente (questão de poucos minutos), e pequenos vazamentos são detectados em tempos que variam de trinta minutos a duas horas; iii) a precisão do modelo de cálculo do empacotamento não depende da adaptatividade do modelo.

Como pontos fracos da aplicação desse pode-se citar: i) o modelo necessita que as vazões nas entradas e saídas do trecho sejam medidas, assim como as pressões e temperaturas nestes pontos; ii) altamente dependente da incerteza de medição da vazão no duto; iii) necessita de alto esforço computacional para aplicação em intervalos de medição curtos.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

Uma componente bastante importante para a necessidade de sistemas de detecção de vazamento nos projetos de gasodutos é o desconhecimento, por parte da população, do baixo risco introduzido pelo duto na vizinhança de cidades e vilarejos. Aliado a esta componente está o fator econômico da detecção, que tem por objetivo minimizar as perdas do gás. Na maioria dos casos, os vazamentos são ocasionados por obras não autorizadas nos arredores do duto.

A grande maioria das aplicações de detecção de vazamento se dedica à detecção em oleodutos, que trazem maiores transtornos nos casos de vazamento. Isso também pode ser verificado pela grande cobertura que se dá atualmente aos casos de vazamento onde pesadas multas são aplicadas aos responsáveis. Para o gás, a dificuldade e o grande custo computacional para execução de modelos transientes faz com que os sistemas de detecção sejam menos aplicados no Brasil.

Para a detecção foram identificados e apresentados quatro modelos no trabalho, dois considerando escoamento permanente no duto, e, portanto, de simples implementação, e outros dois utilizando-se de modelagem transiente para a consideração do fenômeno. Estes últimos são os únicos capazes de fornecer informações relevantes sobre possíveis vazamentos,

mesmo em condições de forte transiente no duto. É certo que, quão mais complexo seja o sistema, mais tempo para identificação de vazamentos será necessário.

Outro aspecto importante para o bom comportamento dos sistemas de detecção é a qualidade das informações obtidas durante a operação do duto, quais sejam, medições de pressão, temperatura, vazão e composição do gás escoando no duto. Assim, é de se esperar que uma má qualidade das medições leve ao insucesso do sistema de detecção. Também é de extrema importância que as incertezas de medição sejam muito bem conhecidas e controladas, sem o que o sistema passe a fornecer alarmes falsos com uma frequência acima da esperada, caindo em descrédito.

Em um grande número de sistemas de detecção de vazamento, parâmetros do modelo devem ser ajustados para o duto em questão. Assim, a adaptatividade do modelo e dos parâmetros, com conseqüente aprendizagem do sistema de detecção a partir dos resultados e alarmes apresentados, são de extrema importância para o seu sucesso. Sistemas que não permitam tal aprendizagem e mudanças para as condições do duto tendem a perder espaço frente às novas tecnologias. Outra forma de aumentar a confiabilidade do sistema de detecção de vazamento é através da associação da modelagem à outra forma de detecção de vazamento, qual seja, monitoramento acústico, conseguindo assim, minimizar tempos de detecção, o que pode ser uma limitante à aplicação em questão.

A importância da minimização do tempo de detecção apresenta-se importante para a diminuição das perdas do produto transportado, e também para a redução do tempo de parada do duto (lucro cessante), o que para a companhia transportadora tem grande importância. Aqui cabe o comentário acerca das válvulas de bloqueio colocadas nos dutos, que normalmente encontram-se espaçadas de trinta quilômetros, mas que, a depender das condições do entorno do duto, podem necessitar de menor espaçamento.

Outra coisa importante é o conhecimento das variações das incertezas dos medidores com as condições ambientais do duto. Regiões que apresentem grande variação da temperatura ambiente durante o ano tendem a apresentar maior complexibilidade dos sistemas de detecção e maior susceptibilidade a alarmes falsos.

Por fim, repete-se aqui as sugestões feitas por Nicholas (1989) em seu trabalho, que diz ser necessário para o sucesso de um sistema de detecção: i) filtrar os dados antes de amostrá-los; ii) amostrar com uma frequência pelo menos duas vezes maior que a maior frequência de variação dos dados; iii) usar transmissores com incertezas de no máximo 0,25% para evitar efeitos de variação com a temperatura; iv) proteger os transmissores da ação direta do sol e da chuva; v) limitar a precisão esperada para a medição da vazão à máxima

sensibilidade do sistema; vi) reconhecer que o vazamento nada mais é que um fluxo de fluido não medido; vii) manter o sistema atuando 24 horas por dia; viii) lembrar que tais sistemas esperam informações consistentes todo o tempo.



## **CAPÍTULO VI: LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL UTILIZANDO REDES NEURAI ARTIFICIAIS**

Um dos grandes desafios dos sistemas de detecção de vazamentos de gás natural em dutos de distribuição é a determinação da localização do ponto de vazamento ao longo do duto. Sistemas com sensores instalados de forma conveniente nos gasodutos e com supervisão remota poderão ser utilizados para estimar, em função de parâmetros de pressão medidos e previstos, a localização da perda de carga provocada por vazamentos de gás nos dutos. No entanto tal procedimento é muito oneroso e inviável em termos práticos.

Neste trabalho está se propondo um método de localização de pontos de vazamentos em dutos, com base em parâmetros medidos de vazão e pressão na entrada e na saída das tubulações, utilizando um sistema de simulação de parâmetros de escoamento de gás natural e de redes neurais artificiais.

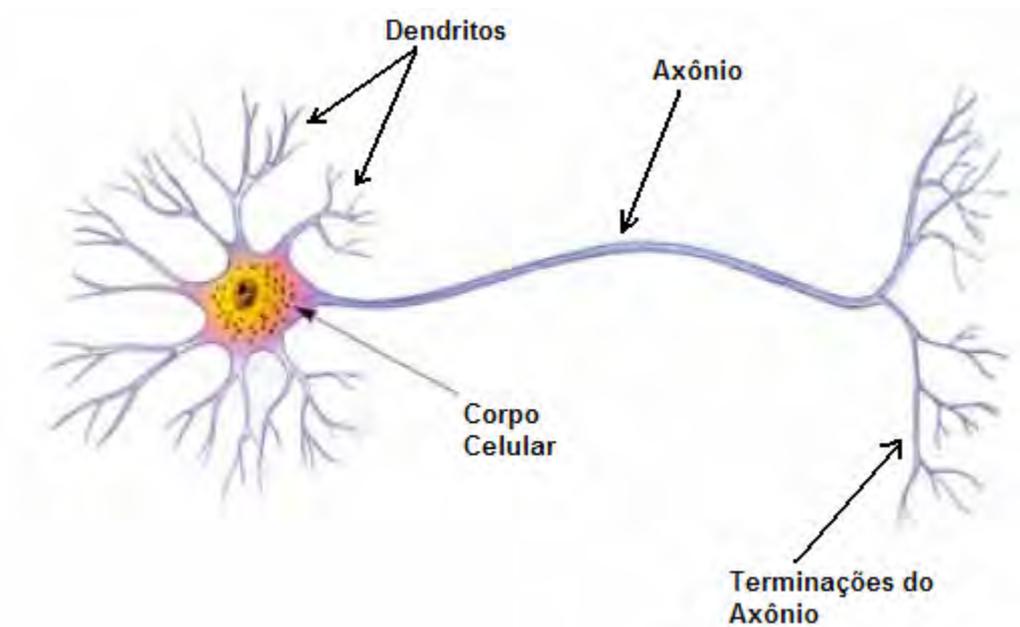
### **6.1 REDES NEURAI ARTIFICIAIS**

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência.

Baseado no funcionamento de cada neurônio foi desenvolvido um modelo matemático. A combinação de vários destes neurônios artificiais compõe uma rede neural artificial, capaz de aprender. Uma grande rede neural artificial pode ter centenas ou milhares

de unidades de processamento; já o cérebro de um mamífero pode ter muitos bilhões de neurônios.

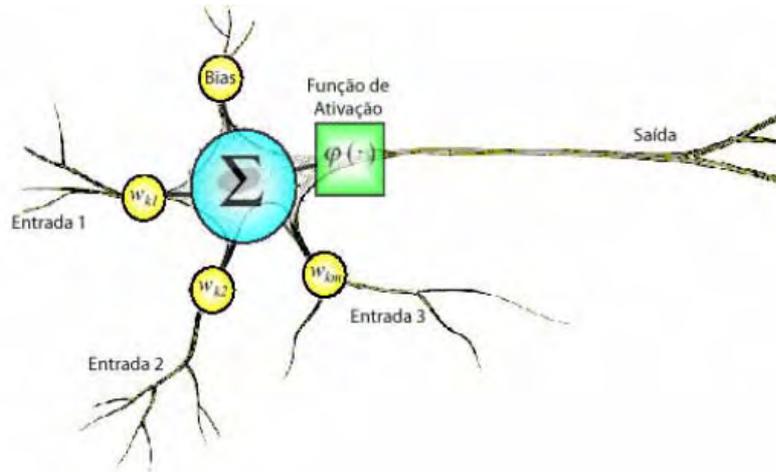
Um neurônio é composto basicamente por dendritos, corpo do neurônio e um axônio, como apresentados na figura 6.1. Os dendritos têm como função receber os estímulos emitidos por outros neurônios. O corpo do neurônio, também conhecido como *somma*, é responsável por coletar e combinar as informações vindas dos dendritos. O axônio é responsável por transmitir os estímulos a outros neurônios.



FONTE: MACHADO, 2005.

Figura 6.1 – Neurônio biológico.

Em 1943, McCulloch e Pitts fizeram os primeiros estudos com redes neurais. O modelo matemático escolhido para um neurônio artificial tenta reproduzir os elementos de uma célula neural. A figura 6.2 faz uma analogia entre uma célula neural e o modelo matemático proposto pelos pesquisadores.

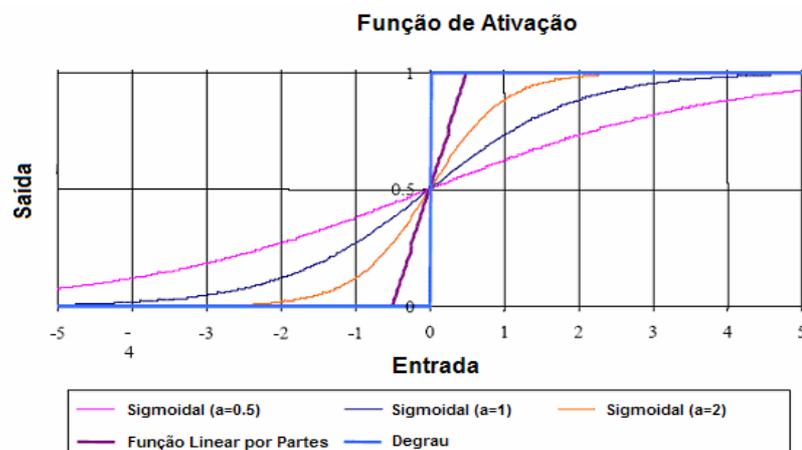


Fonte: MACHADO, 2005.

Figura 6.2 - Analogia entre neurônio e seu modelo matemático.

Nos neurônios, a comunicação é realizada através de impulsos. Quando um impulso é recebido, o neurônio o processa e, passado um limite de ativação, dispara um segundo impulso que produz uma substância neurotransmissora, a qual flui do corpo celular para o axônio (que por sua vez pode ou não estar conectado a um dendrito de outra célula). O neurônio que transmite o pulso pode controlar a frequência de pulsos aumentando ou diminuindo a polaridade na membrana pós sináptica.

Da mesma forma, um neurônio artificial recebe valores em suas diversas conexões de entrada, tendo cada conexão um peso próprio. As entradas são somadas e aplica-se uma função chamada “função de ativação” para limitar o valor da saída.



Fonte: MACHADO, 2005.

Figura 6.3 – Funções de ativação.

A função de ativação pode ser de diversos tipos, alguns deles mostrados na figura 6.3. O modelo de neurônio de McCulloch-Pits (1943) utiliza a função de ativação degrau, que é a função sigmoidal com  $\alpha = \infty$ . A função sigmoidal pode ser descrita como na equação 6.1.

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot x}} \quad (6.1)$$

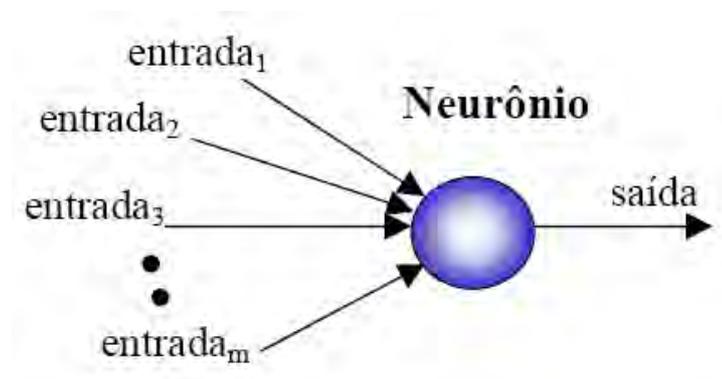
O modelo do neurônio pode ser representado pela equação 6.2.

$$y_k = \varphi\left(\sum_{i=1}^m w_{ki} x_i + b_k\right) \quad (6.2)$$

sendo que:

$y_k$  é a saída do  $k$ -ésimo neurônio,  $w_{ki}$  o peso entre o neurônio  $k$  e a entrada  $x_i$ ,  $b$  a polarização do neurônio e  $\varphi$  é a função de ativação.

Para facilitar a visualização das estruturas de redes neurais, a representação do neurônio é feita de forma simplificada como mostrado na figura 6.4.



Fonte: SCHÜHLI, 2005.

Figura 6.4 – Representação de um neurônio.

A conexão de vários neurônios forma uma rede neural. Uma rede neural artificial tem a capacidade de generalizar um problema, ou seja, é capaz de responder corretamente a uma entrada nunca vista antes por similaridade aos padrões já apresentados. Por isso é muito usada em aplicações de reconhecimento de padrões, classificação de dados e previsão.

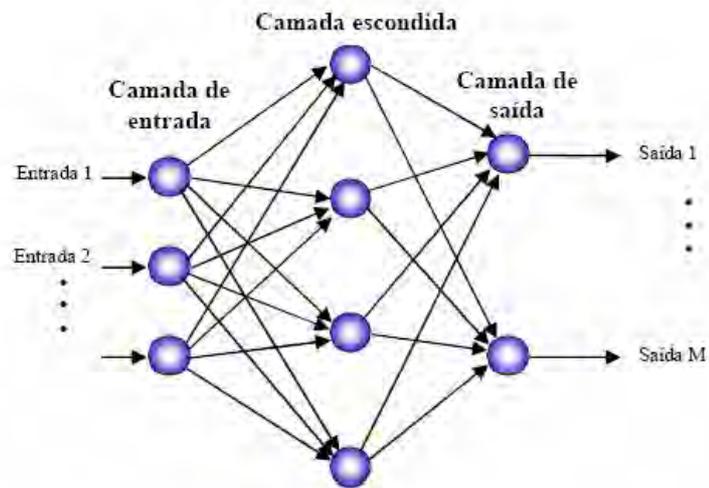
## 6.2 ESTRUTURAS DE REDES NEURAIIS

Um dos objetivos da pesquisa sobre redes neurais na computação é desenvolver morfologias neurais matemáticas, não necessariamente baseadas na biologia, que podem realizar o processamento de alguns dados de forma desejada. As diferentes formas de conexões dos neurônios fazem a diferenciação entre os tipos de redes neurais e suas diferentes aplicações.

### 6.2.1 Redes diretas (*Feedforward*)

As redes diretas são representadas em camadas, sendo formadas por uma camada de neurônios de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas intermediárias, conhecidas como camadas escondidas. A presença ou não de camadas escondidas, bem como o número de camadas escondidas é definido dependendo da complexidade e tipo do problema. Apenas uma camada intermediária é suficiente para aproximar qualquer função contínua e são necessárias no máximo duas camadas intermediárias, com um número suficiente de unidades por camada, para se produzir qualquer mapeamento.

Um exemplo de rede direta é a MLP (*Multi-Layer Perceptron*), cuja estrutura é mostrada na figura 6.5.

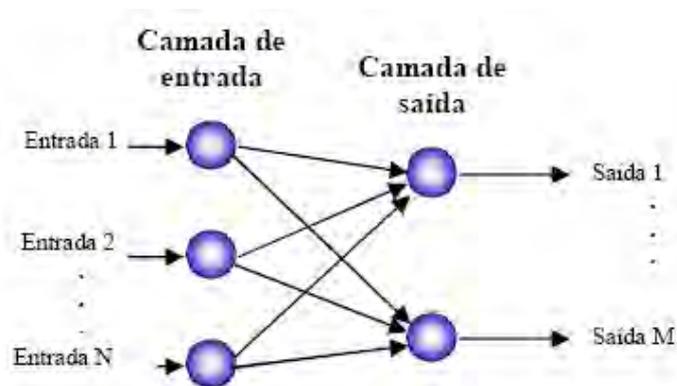


Fonte: SCHÜHLI, 2005.

Figura 6.5 - Rede neural direta MLP.

### 6.2.2 *Learning Vector Quantization (LVQ)*

Uma importante estrutura de rede neural é a LVQ proposta por Kohonen (1990). O objetivo da rede LVQ é através da quantização dos vetores de entrada classificá-los em um determinado número de classes baseado em suas similaridades. A LVQ é rede composta de duas camadas com  $N$  neurônios de entrada e  $M$  neurônios de saída, conforme mostrado na figura 6.6. Cada um dos  $N$  neurônios de entrada se conecta aos  $M$  neurônios de saída por conexões para frente. O número de classes em que a rede LVQ estará selecionando corresponde ao número de neurônios de saída.



Fonte: SCÜHLI, 2005.

Figura 6.6 - Estrutura da rede LVQ.

Os neurônios de saída da rede LVQ recebem idêntica informação na entrada, mas competem entre si para ser o único a ficar ativo. Cada neurônio se especializa numa área diferente do espaço de entrada e suas saídas podem ser usadas para representar a estrutura do espaço de entradas.

A função de ativação de cada neurônio é baseada na distância Euclidiana, como é mostrada na equação 6.3.

$$y_j = \sum_{i=1}^N (X_i - W_{ij})^2 \quad (6.3)$$

sendo que:

$Y_j$  é a saída do neurônio  $j$ ,  $X_i$  é o vetor de entrada,  $W_{ij}$  é o peso entre o neurônio de entrada  $i$  e o neurônio de saída  $j$ .

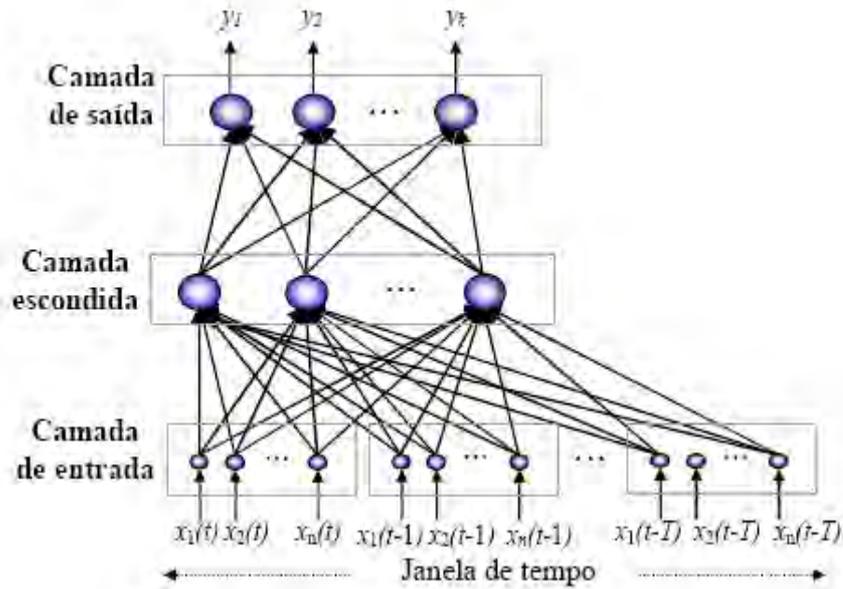
## 6.3 REDES NEURAIAS TEMPORAIS

As Redes neurais como a MLP e LVQ são estruturas capazes de processar de forma eficiente sinais não dependentes do tempo. No entanto, essas estruturas não são adequadas para processar seqüências de eventos temporais. Surgem estruturas neurais que permitam processar tais sinais temporais.

### 6.3.1 REDES NÃO RECORRENTES

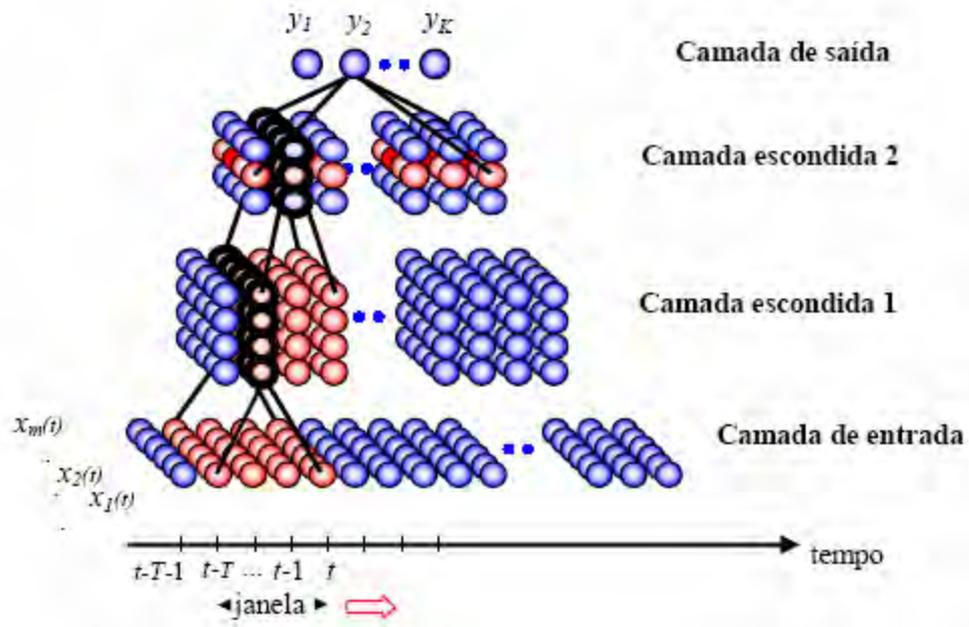
Uma das soluções para resolver problemas temporais é a utilização de redes não ecorrentes. Apesar de redes neurais como MLP e LVQ não terem bons resultados quando o problema é dependente do tempo, é possível adaptá-las para solucionar o problema. A solução

mais comum é fixar uma janela no tempo e excitar a rede com os valores desta janela, conforme a figura 6.7. O problema desta solução é que a janela no tempo é fixa, e seqüências com duração maior que a janela não são reconhecidas.



Fonte: SCHÜHLI, 2005.

Figura 6.7 - MLP com janela temporal.



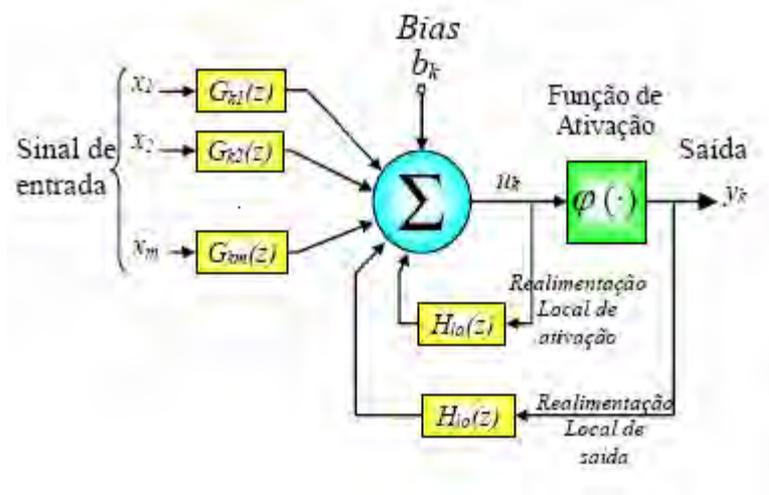
Fonte: SCHÜHL, 2005.

Figura 6.8 - Rede neural com atraso no tempo.

Para solucionar o problema do tamanho limitado da janela, a estrutura TDNN (*Time Delay Neural Network*), segundo Waibel et al. (1989) introduz uma segunda camada escondida, que recebe como entrada uma janela da primeira, assim como a camada de saída recebe os valores de uma janela da segunda camada escondida, como apresentado na figura 6.8.

### 6.3.2 Redes localmente recorrentes

Nas redes neurais localmente recorrentes a estrutura do neurônio é modificada para que a rede consiga responder corretamente a estímulos temporais, segundo Fransconi et al. (1992). Na figura 6.8, pode-se observar estágios de realimentação dentro da estrutura do neurônio, estes estágios funcionam como uma memória, armazenando o estado anterior do neurônio e utilizando-o em um próximo sinal de entrada.



Fonte: SCHÜHLI, 2005.

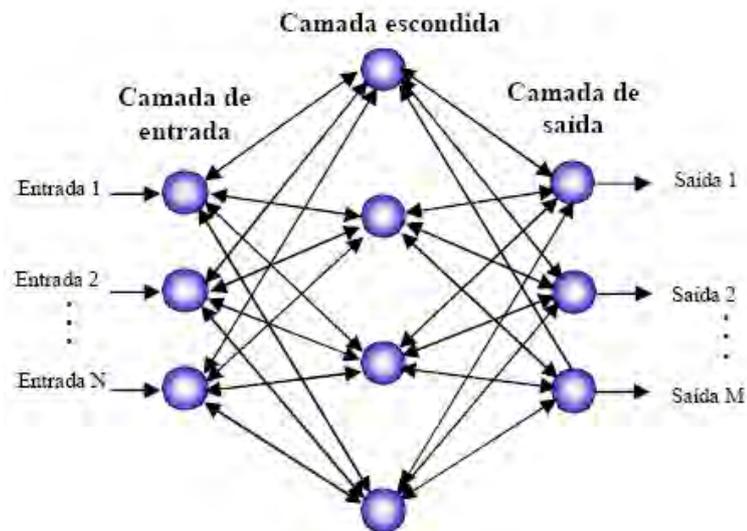
Figura 6.9 - Neurônio recorrente.

Nessa estrutura de rede o processamento temporal é executado pelo neurônio. Geralmente são utilizadas redes neurais diretas, porém o modelo é genérico e pode ser utilizado em qualquer estrutura de rede.

### 6.3.3 Redes totalmente recorrentes

As Redes totalmente recorrentes, também conhecidas como redes simétricas, caracterizam-se por ter as conexões entre os neurônios nos dois sentidos. Assim como as redes diretas elas podem ter camadas de entrada, saída e camadas escondidas. Um exemplo da topologia de uma rede simétrica pode ser representada pela figura 6.10.

O modelo de neurônio utilizado é o de McCulloch-Pitts (1943) usando função sigmoideal de ativação. Tank e Hopfield (1986) iniciaram os estudos com redes totalmente recorrentes e Williams e Zipser (1988) propuseram um novo tipo de aprendizado para a rede, porém ainda é difícil estabelecer critérios práticos para garantir a estabilidade da rede.



Fonte: SCHÜHLI, 2005.

Figura 6.10 - Topologia de uma rede simétrica.

### 6.3.4 Redes parcialmente recorrentes

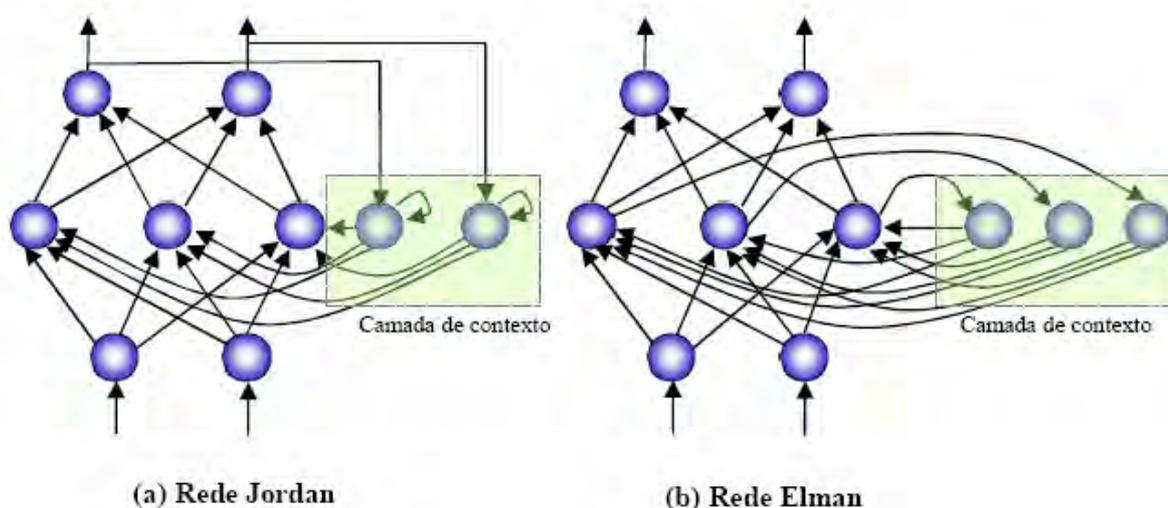
Tentando resolver os problemas de instabilidade e complexidade de treinamento das redes totalmente recorrentes foram feitos estudos utilizando *links* recursivos apenas em parte da rede. A solução proposta por Jordan e por Elman (1994) foi criar uma nova camada

chamada de camada de contexto, sendo tal camada responsável por guardar a informação temporal. A camada de contexto é uma das entradas da camada escondida.

Na solução proposta por Jordan a camada de contexto guarda informações da saída do instante anterior. Para o treinamento da rede Jordan é necessário a utilização de algoritmos específicos como o *backpropagation through time*.

Na rede de Elman a camada de contexto guarda a informação dos neurônios da camada escondida. Os neurônios da camada de contexto têm função de ativação linear, ou seja, funcionam como memória. O peso entre a camada escondida e a camada de contexto é fixado em 1, possibilitando a utilização do algoritmo comum de *backpropagation*.

As estruturas das redes de Jordan e Elman (1994) estão mostradas na figura 6.11(a) e figura 6.11(b), respectivamente.



Fonte: SCHÜHLI, 2005.

Figura 6.11 - Redes parcialmente recorrentes.

Esse tipo de rede se diferencia das demais soluções temporais por conseguir com que dados de todas as amostras anteriores influenciem no instante presente. Isso é possível devido à realimentação feita na camada escondida, que faz com que todas as amostras anteriores influenciem. Porém, quanto mais recente a amostra maior a influência no resultado. Por detectar o histórico temporal do sinal de forma mais completa que os outros tipos de redes, a estrutura parcialmente recorrente foi escolhida para o uso neste trabalho.

Em 1995, Kremer (1995) demonstrou que apesar da simplicidade estrutural da rede de Elman, ela é suficientemente capaz de modelar informações temporais utilizando o modelo de neurônio de MacCulloch-Pitts (1943) e o algoritmo de *backpropagation*.

## 6.4 TREINAMENTO DE REDE NEURAL

As redes neurais podem ser treinadas de forma supervisionada ou não supervisionada. Os dois métodos são descritos a seguir.

### 6.4.1 Treinamento supervisionado

A maioria das estruturas de redes neurais são treinadas de forma supervisionada. No treinamento supervisionado a rede recebe os vetores de entrada e os resultados desejados na saída da rede.

A tarefa do treinamento da rede é ajustar os pesos entre os neurônios de forma que a saída seja a desejada. Uma rede bem treinada é capaz de generalizar um problema, ou seja, não é necessário que a rede conheça todas as possibilidades de entrada para obter a saída. Nosso cérebro funciona de forma similar em muitos casos. Por exemplo, você consegue identificar que determinado ser vivo é uma árvore, mesmo nunca tendo visto aquele espécime em particular, uma vez que você já foi apresentado a outros tipos de árvores no passado. Este é o processo de generalização do aprendizado.

Para conseguir treinar a rede de forma a generalizar um problema é necessário escolher de forma cuidadosa o banco de dados de treinamento, ele deve abranger as diversas variações com algumas repetições. Um banco de dados pequeno pode não ser suficiente para o treinamento da rede e um banco de dados muito grande pode elevar demais o custo computacional para o de treinamento da rede.

Existem vários algoritmos para realizar o treinamento da rede e o mais conhecido deles é o de *backpropagation*.

### **6.4.1.1 Backpropagation**

O algoritmo *Backpropagation* foi desenvolvido de maneira independente por vários pesquisadores trabalhando em diferentes áreas aproximadamente na mesma época. Em 1974, Werbos (1974) apresentou o algoritmo enquanto desenvolvia sua tese de doutorado em estatística e o chamou de "Algoritmo de Realimentação Dinâmica". Parker (1982) redescobriu o algoritmo e chamou-o de "Algoritmo de Aprendizado Lógico". Porém, foi com o trabalho de Rumelhart, Hinton e Williams (1986) do grupo PDP ("*Parallel Distributed Processing*") do MIT em 1986 divulgou e popularizou o uso do *Backpropagation* para o aprendizado em redes neurais. O algoritmo *Backpropagation* é hoje em dia a técnica de aprendizado supervisionado mais utilizada para redes neurais unidirecionais multicamadas.

Durante o treinamento com o algoritmo *backpropagation*, a rede opera em uma seqüência de dois passos. Primeiro, um padrão é apresentado à camada de entrada da rede. A atividade resultante flui através da rede, camada por camada, até que a resposta seja produzida pela camada de saída. No segundo passo, a saída obtida é comparada à saída desejada para esse padrão particular. Se esta não estiver correta, o erro é calculado. O erro é propagado a partir da camada de saída até a camada de entrada, e os pesos das conexões das unidades das camadas internas vão sendo modificados conforme o erro é retropropagado.

Este processo é repetido para cada um dos padrões selecionados para treinamento e este ciclo completo é denominado de época. Várias épocas são necessárias para que a rede chegue aos resultados desejados. O treinamento é finalizado quando o erro de saída atinge valores abaixo de um valor estipulado ou quando atingir um pré-determinado número de épocas. A implementação matemática do algoritmo *backpropagation* pode ser vista em Haykin (2001).

### **6.4.2 Treinamento não-supervisionado**

No treinamento não-supervisionado somente os padrões de entrada estão disponíveis para o treinamento da rede.

O treinamento é feito por competição. O padrão é apresentado à camada de entrada da rede. A função de ativação calcula a distância Euclidiana entre o vetor de entrada e os pesos sinápticos. O neurônio que tiver a menor distância Euclidiana vence e tem seus pesos atualizados de forma a se aproximar mais do padrão de entrada.

## 6.5 LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS DE GÁS NATURAL EM DUTOS UTILIZANDO RNA

Como foi apresentado no Capítulo 5 desse trabalho, vários métodos foram e estão sendo estudados para a detecção de vazamentos de gás natural em dutos de distribuição, no entanto um grande gargalo nos sistemas de supervisão e controle da operação de distribuição de gás natural é a localização de pontos de vazamentos ao longo do duto. Simuladores de grande porte com modelos de escoamento pré-estabelecidos para uma determinada topologia de rede, através de avaliações de séries temporais de características de pressão e vazão do sistema, são utilizados em grandes gasodutos cujas características operacionais são bem definidas.

A proposta desse trabalho é apresentar um método de determinação da localização de vazamento em dutos utilizando redes neurais artificiais, para ser implantado em sistemas de pequeno porte com características de pressão e vazão variáveis.

### **6.5.1 Características de pressão e vazão em dutos sob vazamento em regime permanente**

Para se analisar o comportamento das vazões e pressões em um gasoduto sob vazamento, pode-se admitir o vazamento como um ponto de saída de carga, e considerar o gasoduto como uma rede de distribuição de 02 consumidores.

Considere o gasoduto apresentado na figura 6.12.

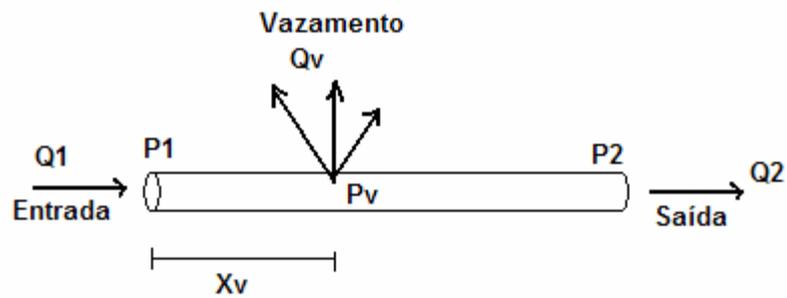


Figura 6.12 – Gasoduto sob vazamento.

sendo que:

$Q_1$  representa a vazão de entrada do gasoduto,  $P_1$  a pressão na entrada,  $Q_2$  e  $P_2$  a vazão e a pressão na saída do duto, respectivamente,  $Q_V$  a vazão de vazamento,  $P_V$  a pressão no ponto de vazamento e  $X_V$  a distância entre o ponto de entrada do gasoduto e o ponto de vazamento.

Após o estágio de transitório, os vazamentos provocam uma diminuição da vazão de saída e um conseqüente aumento da pressão neste ponto. Na figura 6.13 são apresentadas as diferentes curvas de pressão na saída do gasoduto para diferentes taxas e pontos de vazamentos em uma tubulação de 1200 m de comprimento, 150mm de diâmetro, 40 mbar de pressão de entrada e  $550\text{m}^3/\text{h}$  de vazão de entrada.

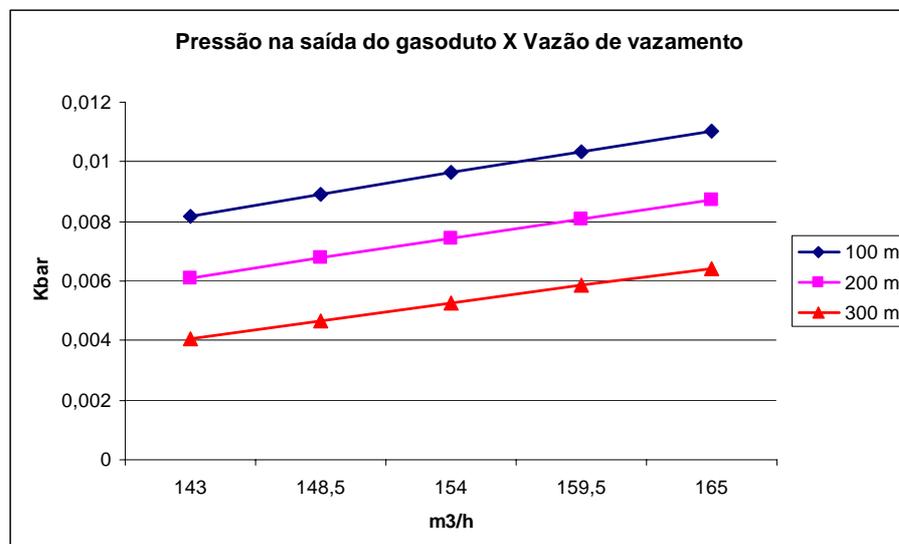


Figura 6.13 – Pressão x Vazamento.

A título de ilustração, considere um gasoduto de  $1200\text{ m}$  de extensão e  $150\text{ mm}$  de diâmetro, com vazão de entrada  $Q_1 = 550\text{ m}^3/\text{h}$ , e pressão  $P_1 = 0,04\text{ bar}$ , constantes, sob vazamento em  $X_V = 400\text{ m}$ . Efetuando simulações, através da modelagem descrita no Capítulo 2, e considerando a vazão de escape diminuindo linearmente no tempo, haverá um conseqüente aumento na vazão  $Q_2$  de saída. Após os estágios de transientes, a pressão de saída  $P_2$  em função do aumento da vazão  $Q_2$  é apresentada na figura 6.14.

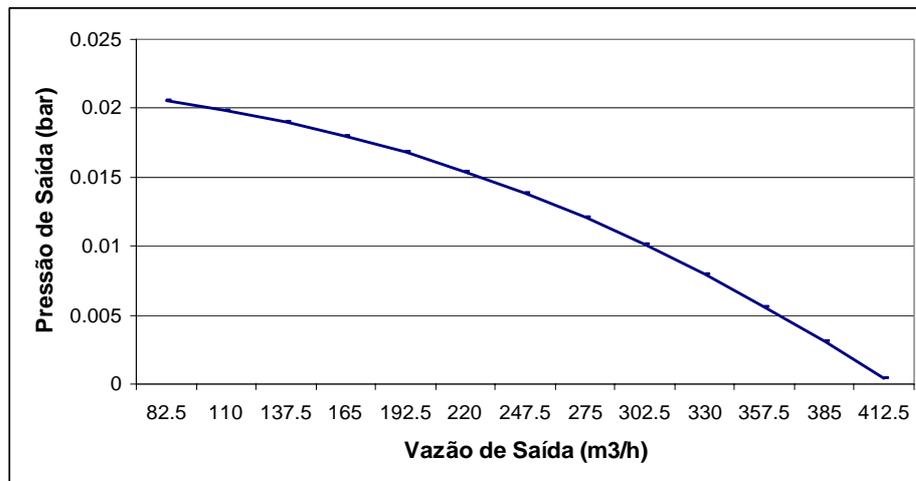


Figura 6.14 – Pressão de saída em gasoduto sob vazamento.

Outra característica a se considerar é o comportamento da pressão em função da posição do vazamento ao longo do duto. No gráfico da figura 6.15 é demonstrado que, para as mesmas condições de escoamento e de vazamento, a pressão na saída do duto é menor, quanto mais distante o vazamento estiver do ponto de entrada, ou mais próximo estiver da saída do duto.

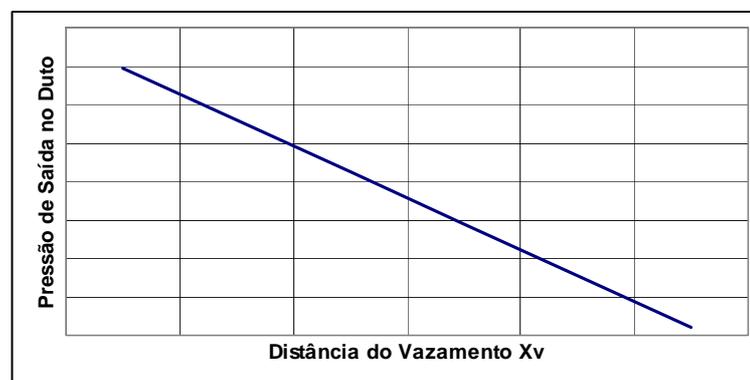


Figura 6.15 – Pressão de saída em função da posição de vazamento.

Avaliando o gasoduto da figura 6.12 com as modelagens propostas no Capítulo 2 e 3 desse trabalho, é possível determinar as características de pressão na saída do duto, em função das condições de entrada e de vazamento. O grande problema é determinar a posição de vazamento em função das características de vazão e pressão de entrada e saída de um gasoduto genérico.

Para cada topologia de duto e condições de escoamento, haverá, em função da sua magnitude, uma posição definida de vazamento.

A proposta é apresentar a aplicação de redes neurais na determinação da localização de vazamentos com perda de carga em gasodutos de forma que possa ser utilizada em sistemas de simulação e controle da operação de distribuição de gás natural.

### **6.5.2 Modelo proposto de localização de vazamento utilizando RNA**

A proposta do modelo é treinar uma RNA com dados obtidos de simulações de escoamento de gás natural em dutos, de forma que a mesma, uma vez treinada e com base em entradas de pressão e vazão na saída do duto, forneça a posição do vazamento ao longo do duto.

Foram treinadas e testadas várias redes MLP com arquiteturas diferentes, porém escolheu-se a que apresentou melhor performance na localização do vazamento apresentando um erro de até 2,0%. As características da arquitetura da rede MLP considerada são: dados de entrada, adquiridos do problema; uma camada oculta contendo cinco neurônios com função de ativação tangente hiperbólica; camada de saída com um neurônio e função de ativação linear; conexão do tipo *feed-forward*, direta; neurônios completamente conectados. Os dados de entrada foram previamente normalizados entre 0,1 e 0,9, assegurando que os diferentes pesos sinápticos aprendessem aproximadamente com a mesma velocidade, conforme descreve Haykin (2001) em fonte *sans serif*.

Para uma determinada topologia de duto, parâmetros de pressão e vazão de entrada, e com base na modelagem descrita por Osiadack (1987) e apresentada no Capítulo 2, gera-se por simulações um conjunto de dados  $\mathcal{A}(Q_2, P_2, X_V)$  que relaciona a vazão de saída, a

pressão de saída e a distância entre o ponto de vazamento e um ponto de referência na entrada do duto.

A cada alteração nos valores de pressão e vazão na entrada do gasoduto, a RNA deverá receber novo treinamento em função de novas simulações.

O modelo foi testado em vários dutos e sob várias condições de vazamento, obtendo-se um erro médio de 0.8%.

É importante se considerar que é um modelo válido para operação em regime permanente.

O modelo foi implementado em uma rotina computacional de forma a compor um sistema de supervisão e controle automático da operação de distribuição de gás natural em dutos, como será apresentado no Capítulo 7 desse trabalho.

### 6.5.3 Implementação numérica

Para sistemas à alta pressão, foram consideradas situações de diversas possibilidades de perda de carga de entrada. Utilizando a pressão no nó de entrada, em [bar], a carga de entrada no duto, em [m<sup>3</sup>/h], variando-se a taxa de vazamento de 0,1% a 5% da carga total de entrada, totalizando 25 variações, e considerando 29 pontos de vazamento ao longo do duto, formou-se um total de 725 dados, denominado de teste padrão, em regime permanente. Dos 725 dados, 500 dados foram utilizados no treinamento da rede e 225 dados utilizados para testes da rede treinada. Para cada local e condição de vazamento há um conjunto de pressão e vazão correspondentes. Uma vez a MLP treinada, a mesma monitora os parâmetros de saída do gás nos dutos indicando o ponto de vazamento, em unidades de distância, a partir do nó de entrada do gás no duto.

No quadro 6.1 estão apresentados alguns resultados da utilização desse modelo em um gasoduto em regime com extensão de 90000 Km, diâmetro de 700 mm, pressão de entrada  $P_1 = 39.99 \text{ bar}$  e vazão de entrada  $Q_2 = 2851.86 \text{ m}^3 / \text{h}$ .

Quadro 6.1 – Resultados da localização de ponto de vazamento por uma RNA.

Teste	Pressão Saída Normalizada	Vazão de Saída Normalizada	Ponto de Vazamento Desejado Normalizado	Ponto de Vazamento Obtido Normalizado	Erro (%)
1	0.51691	0.23333	0.414286	0.413633	0.158
2	0.14263	0.83333	0.500000	0.499363	0.127
3	0.51290	0.50000	0.100000	0.099460	0.540
4	0.22985	0.60000	0.585714	0.585978	0.045
5	0.200139	0.80000	0.757143	0.749572	1.000
6	0.417185	0.33333	0.471429	0.472156	0.154
7	0.841604	0.13333	0.500000	0.500197	0.039
8	0.111533	0.86667	0.728571	0.736354	1.068
9	0.149967	0.73333	0.700000	0.698236	0.252
10	0.396527	0.43333	0.414286	0.418067	0.913

O erro médio nessa aplicação foi de aproximadamente 0.5%, o que demonstra um bom desempenho da arquitetura de RNA proposta.

#### 6.5.4 Considerações práticas sobre RNA

Algumas recomendações práticas sobre os parâmetros que tangem o treinamento de uma RNA podem ser feitas para a maioria dos problemas envolvendo. Todavia, podem existir problemas em que a solução mais viável foge dos comentários aqui recomendados, isto é uma forte premissa que sugere que as redes neurais artificiais ainda precisam de uma análise matemática mais profunda.

Pode-se citar que os pesos devem ser inicializados com valores aleatórios e pequenos, geralmente no intervalo de  $[-0,1,0,1]$ . Isto é explicado pelo fato de que a utilização de pesos de grande magnitude pode levar a uma saturação nos neurônios da camada intermediária.

Deve-se também citar que quanto melhor a escolha dos exemplos, isto é, um equilíbrio entre quantidade e qualidade, melhor será a resposta da rede, pois ela terá um intervalo abrangente para interpolar.

O parâmetro taxa de aprendizado que é o valor do “passo” que o vetor gradiente irá dar na superfície de erro geralmente deve ficar entre 0,1 à 0,3 , pois valores muito grandes para este parâmetro pode fazer o vetor gradiente ficar “saltando” de um lado para o outro na superfície de erros.

O termo de momento deve ter um valor “alto” como 0,8 e 0,9 para que o vetor gradiente fuja de mínimos locais, bem como mantenha uma direção adequada a ser seguida.

O treinamento deve ser paralisado quando um erro médio quadrático aceitável for achado ou se um certo número de épocas (iterações) pré-fixadas forem atingidas.

É importante ressaltar que o exagero no treinamento pode levar a rede a piorar sua capacidade de generalização.

O número de camadas intermediárias e de neurônios geralmente é obtido por tentativa-e-erro, sendo a experiência a principal heurística do projetista da RNA.

Todavia, deve se levar em consideração que com um número muito pequeno de neurônios a rede pode não ter recursos suficientes para aprender. Além disso, a utilização de um número muito grande de neurônios e conexões pode fazer a rede perder sua capacidade de interpolação, pois ela decora os exemplos, ficando assim “cristalizada” (overfitting).

## **CAPÍTULO VII: SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE DA OPERAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Tecnologias emergentes, envolvendo a utilização do gás como combustível automotivo e em aplicações residenciais e comerciais, têm ampliado ainda mais a diversificação do uso do gás natural. O suprimento desta crescente demanda é limitado, em particular, pela ausência de uma adequada infra-estrutura de transporte. Dentre as opções disponíveis, os gasodutos representam a alternativa mais segura e econômica para o transporte de gás natural. Em todo mundo, grandes recursos têm sido investidos para o desenvolvimento de novas tecnologias para a atividade dutoviária, visando, principalmente, a melhoria dos níveis de segurança, eficiência e efetividade da operação. O controle da operação de um gasoduto é uma tarefa bastante complexa. A diversidade de componentes, aliada às grandes distâncias envolvidas, impõem a necessidade de uma permanente monitoração das condições operacionais. A obtenção de informação precisa e confiável representa um papel chave na operação dos gasodutos, não só no que se refere à manutenção da eficiência operacional, mas, em particular, para a minimização dos riscos associados a possíveis acidentes.

A utilização de sistemas de supervisão e controle tem facilitado esta atividade. Os sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) representam a principal ferramenta para o controle de um duto. Tais sistemas integram o conjunto de sensores e dispositivos de controle do gasoduto, proporcionando a supervisão das condições operacionais e o controle remoto dos equipamentos. Um Sistema SCADA com ferramentas de simulação do escoamento do Gás Natural em dutos de distribuição melhoraria as condições de fornecimento, os níveis de segurança, eficiência e efetividade da operação.

Essencialmente, os simuladores provêm informações relativas à evolução das propriedades do escoamento, englobando, principalmente, as variações de pressão, vazão, temperatura, densidade e composição do gás. As principais aplicações das ferramentas de simulação envolvem o desenvolvimento de procedimentos operacionais mais eficientes para a execução de tarefas rotineiras como, por exemplo, rotinas de partida e parada do sistema. Uma outra aplicação importante é a predição do comportamento do sistema. A simulação de condições de operações futuras permite verificar o atendimento das demandas de transporte, tornando possível a adoção de medidas corretivas.

Em um cenário de legislações ambientais cada vez mais rigorosas, a detecção e localização de vazamentos tornam-se imperativos. Neste sentido, os simuladores têm desempenhado um importante papel na redução do tempo de identificação dos vazamentos.

Nesse trabalho foi desenvolvido, com base na teoria e modelagens expostas nos capítulos anteriores, um simulador dinâmico em tempo real das operações de escoamento de gás natural em dutos, integrado a um sistema de supervisão e controle em tempo real.

O sistema proposto, composto de software e hardware, permite supervisão e atuação remota, com comunicação flexível via Internet, ethernet e intranet, cabo e fibra ótica, além de possuir capacidade de simulação do comportamento do gás nas tubulações, o que torna o sistema uma ferramenta útil nas tomadas de decisões, e detecção de vazamento. O sistema possui rotina de detecção e localização de vazamento, utilizando os métodos de balanço de volume e um sistema de RNA, apresentados nos Capítulo V e VI, respectivamente.

## 7.1 O SISTEMA PROPOSTO

Os desafios da pesquisa consistiram na determinação de uma modelagem adequada de cada componente e dispositivos pertencentes ao sistema, na definição de uma estratégia de controle confiável e inteligente, do desenvolvimento de um *software* com interface amigável, de fácil manuseio e com inteligência implantada, e de um hardware de baixo custo, alta precisão e confiabilidade e com flexibilidade para a comunicação de dados, como mostra a figura 7.1.



Figura 7.1 – Abordagem da pesquisa.

### 7.1.1 Modelagem e estratégia de controle

Para compor a modelagem das rotinas de simulação do sistema proposto utilizou-se o Método dos Nós de Newton, como apresentado no Capítulo 2 desse trabalho, para redes de baixa, média e alta pressão.

Elementos que compõem uma rede de distribuição de gás, como, gasodutos, sensores, medidores e válvulas atuadoras, foram equacionados de forma a integrarem o modelo global do sistema apresentado.

Através da tela gráfica do software desenvolvido e apresentado no Item 7.1.2 desse capítulo, acoplam-se os elementos pertinentes à rede de distribuição de gás natural. Após a estruturação da topologia da rede, atribuem-se parâmetros físicos e operacionais a cada elemento que a compõem.

Automaticamente à composição gráfica da rede e atribuição de parâmetros, estrutura-se a respectiva modelagem com base na teoria apresentada nos Capítulos II e III.

Pela simplicidade e eficiência da modelagem, utilizou-se nesse trabalho o Método Nodal de Newton: Caso Multi-Dimensional, abordado no Capítulo III.

A partir de valores obtidos de sensores e medidores em campo nos pontos de entrega de gás natural na rede (pontos de entrada), obtém-se através da rotina de simulação, as características de pressão e vazão nos demais nós da rede. Uma rotina de controle implantada compara com os demais valores obtidos em tempo real, indicando as discrepâncias, que podem significar anomalias na distribuição ou imprecisão dos sensores.

Todos os dutos com sensores de pressão e medidores de vazão em suas extremidades entram para um banco de dutos monitorados. A esses dutos são atribuídas rotinas de detecção e localização de vazamento. O processo é simples e dinâmico.

A rotina de detecção de vazamento utiliza o método de Balanço de Volumes, apresentado no Capítulo V. Através da avaliação das vazões nas extremidades, detecta-se, em regime permanente, a existência de vazamentos. Algoritmos de avaliação de perfil de escoamento e transientes poderão ser implantados para evitar alarmes falsos.

Detectado o duto com vazamento, a segunda etapa é localizar o ponto do vazamento no duto selecionado. Para isso, utilizou-se o método proposto no Capítulo VI desse trabalho, um algoritmo com uma RNA, cuja habilidade em aprender a partir de dados de entrada, tornou-a ferramenta inestimável em aplicações tão diversas como modelagem, análise dos dados, reconhecimento de padrões e no controle automático de sistemas, conforme Azevedo (1993).

Um aspecto de fundamental importância para o desenvolvimento da RNA foi a coleta do conjunto de dados que servem de alimentação para a rede. Na localização do vazamento, a informação a ser prevista é a distância do vazamento a partir do nó de entrada. Os parâmetros de entrada utilizados são as pressões e as cargas nos nós de recebimento e entrega do duto monitorado. Neste trabalho foi proposta uma rede Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP), capaz de informar o ponto do vazamento no duto com até 2% de erro.

O treinamento da rede MLP implementada, ocorre automaticamente pelo algoritmo *backpropagation* e modelagem proposta por Osiadacz (1987) a cada alteração operacional do escoamento do gás na entrada do duto monitorado. Os sensores instalados nas extremidades dos dutos informam em tempo real as condições operacionais de fluxo, e a cada variação de entrada um novo treinamento é feito. A rotina de simulação é iniciada com base nos novos valores, fornecendo um conjunto de sinais de entrada e saída para o treinamento da MLP. Foram consideradas situações de diversas possibilidades de perda de carga de entrada.

Utilizando a pressão no nó de entrada, em [bar], a carga de entrada no duto, em [m<sup>3</sup>/h], variando-se a taxa de vazamento de 0,1% a 5% da carga total de entrada e considerando 29 pontos de vazamento ao longo do duto, forma-se um total de 725 dados, denominado de teste padrão, em regime permanente. Para cada local e condição de vazamento, há um conjunto de pressão e vazão correspondentes. Uma vez a MLP treinada, a mesma monitora os parâmetros de saída do gás nos dutos. Com o alarme de vazamento disparado e as condições alteradas na saída, a MLP indica o ponto de vazamento no duto, em unidades de distância, a partir do nó de entrada do gás no duto.

Uma vez detectado o vazamento, o sistema poderá comandar remotamente válvulas de controle de fluxo de forma a conter o escape de gás.

### 7.1.2 O software desenvolvido

Para realizar as simulações, gerenciar a supervisão e exercer o controle da planta foi desenvolvido um sistema algébrico computacional com interface gráfica amigável em linguagem DELPHI, contendo componentes gráficos que representam os elementos de uma rede de distribuição de gás natural (válvula atuadora, duto, módulo de supervisão composto de sensores de temperatura, pressão e vazão, consumidores, etc.), como mostrado na figura 7.2.

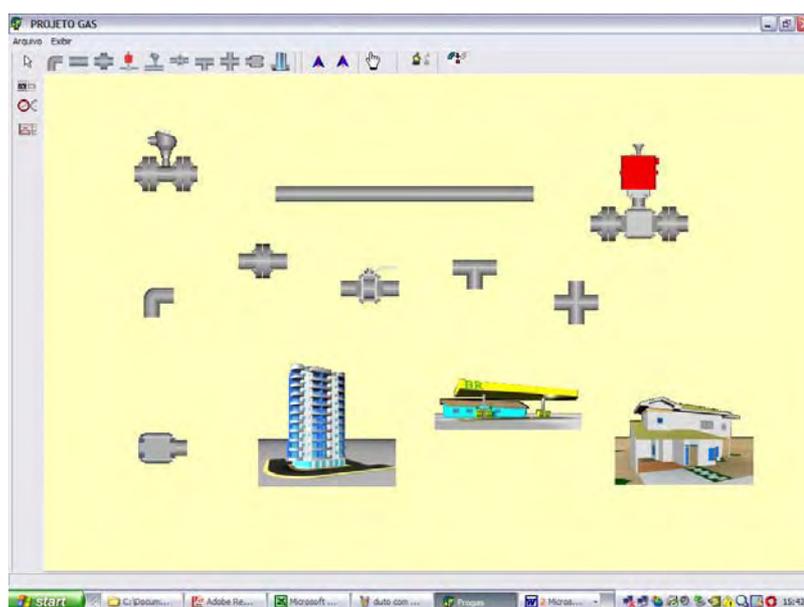


Figura 7.2 – Elementos da rede de distribuição de gás natural.

Em uma barra de ferramentas escolhe-se o elemento da rede, arrasta-o na tela de forma a compor a planta de distribuição a ser supervisionada e controlada. Os elementos ao se aproximarem uns dos outros se encaixam de forma automática incrementando o modelo matemático implícito, como mostrado na figura 7.3.

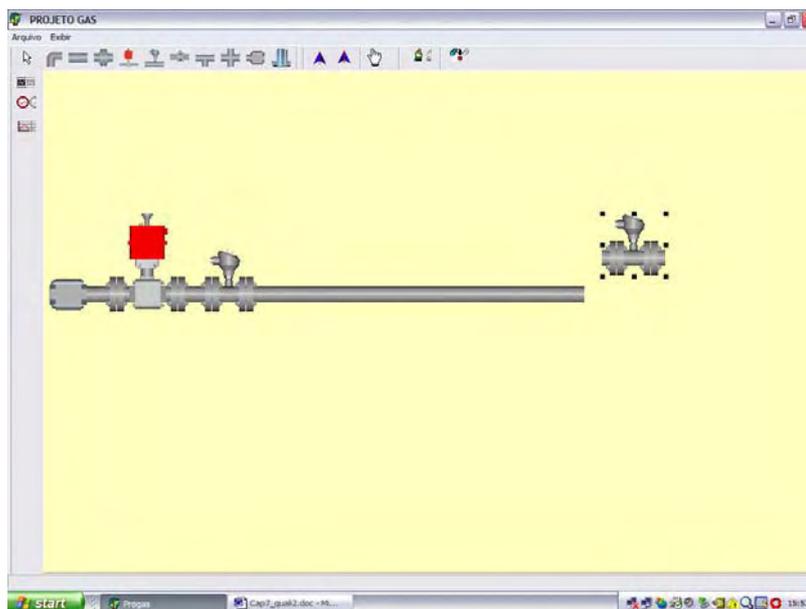


Figura 7.3 – Composição da rede de distribuição.

Após a construção da rede, atribuem-se os parâmetros físicos e operacionais de cada elemento, como apresentado na figura 7.4.

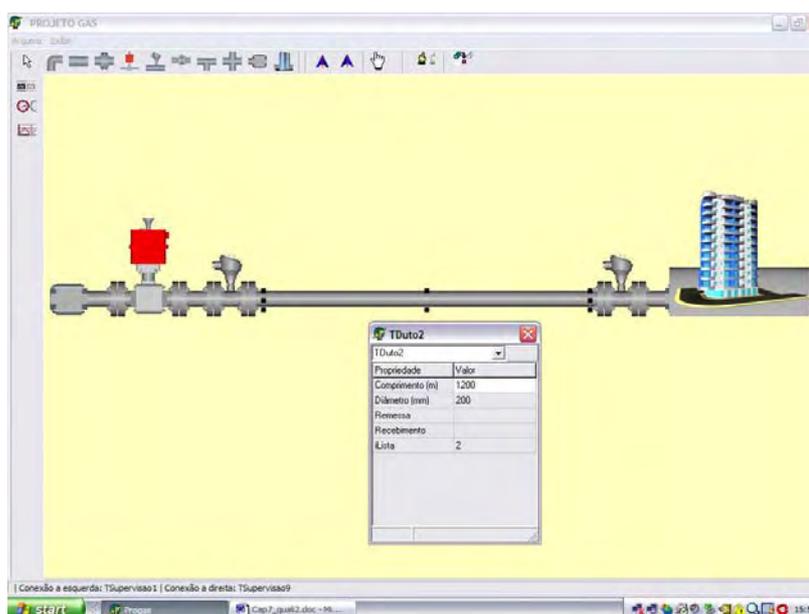


Figura 7.4 – Atribuição de parâmetros dos elementos.

Após a atribuição de parâmetros aos elementos da rede, é possível simular, em função das condições de operação, a pressão e a vazão em cada ponto do sistema, como é mostrado na figura 7.5.

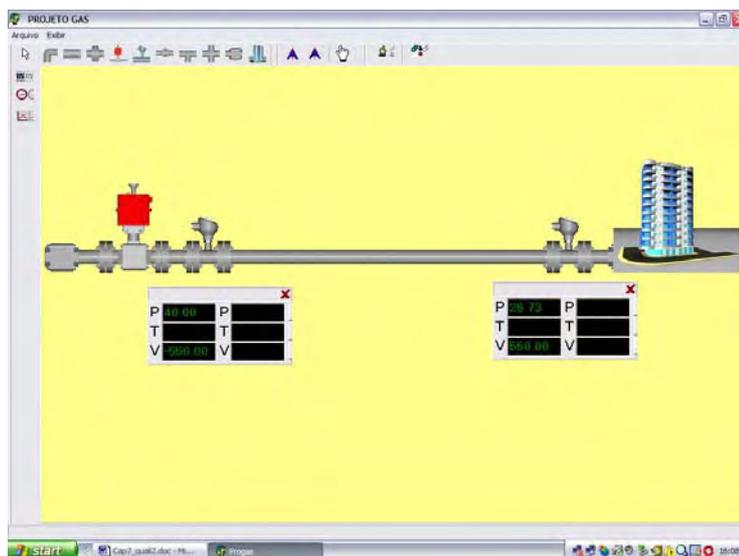


Figura 7.5 – Simulação de escoamento.

Ao se acrescentar um novo consumidor ao sistema, o modelo é automaticamente refeito e as novas pressões e vazões recalculadas em função das características do ramal acrescentado, como é apresentado na figura 7.6.

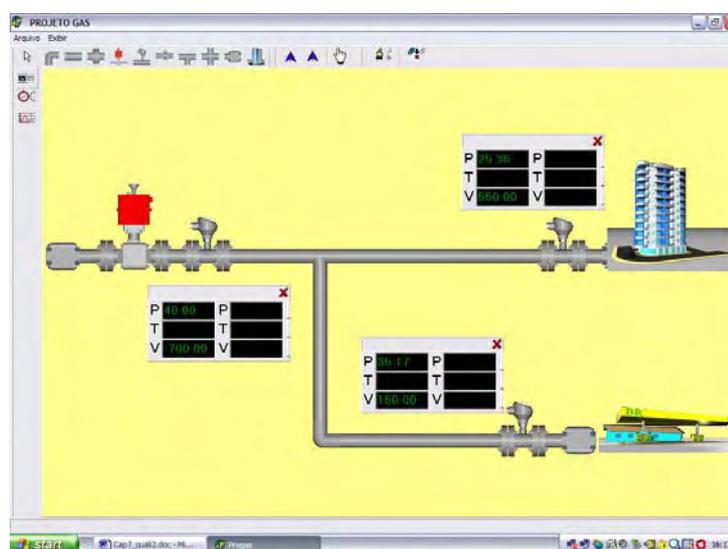


Figura 7.6 – Expansão da rede.

Para cada mudança na vazão de um determinado consumidor, as pressões na rede são recalculadas e o sistema de controle toma decisão sobre a forma que deve atuar sobre as válvulas para garantir as pressões de operação especificadas. Pode-se monitorar graficamente, em tempo real, as variações de temperatura, pressão e vazão em cada ponto da rede, como apresentado na figura 7.7.

A malha pode ser ampliada sempre que um novo consumidor vier a fazer parte da distribuição. Os valores de vazão em cada consumidor são obtidos em tempo real a partir dos medidores de vazão e pressão instalados na rede. O operador especifica as pressões de atendimento, e o sistema, em função das características de operação, pode controlar, através da atuação nas válvulas proporcionais, o fluxo de gás na malha de forma a garantir as condições especificadas de fornecimento. Pode-se, dessa forma, modelar toda a planta de distribuição de gás e simular as condições de operação para baixa, média e alta pressão.

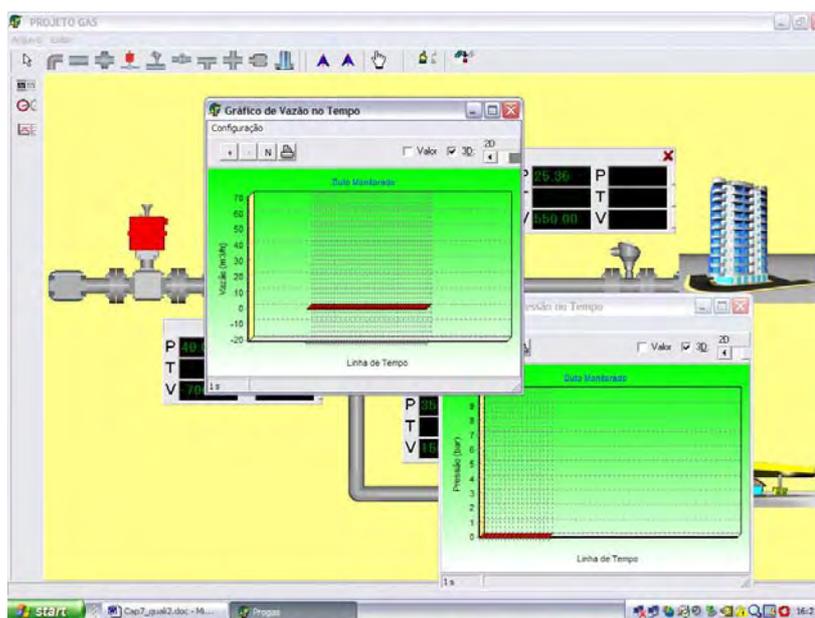


Figura 7.7 – Históricos de pressão e vazão.

O sistema pode fornecer em tempo real todas as condições de operação da rede, como os gráficos de pressão em cada ponto ao longo dos dutos, o histórico de consumo de cada cliente, por data ou período, o comportamento de pressão em cada nó ou vazão em cada duto.

Sempre que um duto estiver entre dois módulos de supervisão (conjunto de sensores de pressão, temperatura e vazão), este passa a ser monitorado automaticamente contra vazamento com perda de carga (figura 7.8).

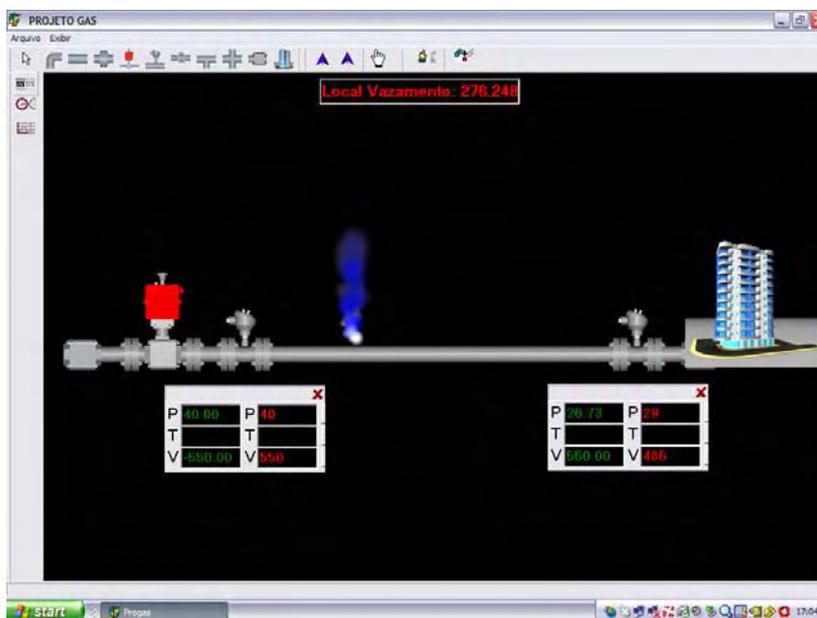


Figura 7.8 – Localização de vazamento pela RNA.

## 7.2 CONCLUSÃO

As decisões de controle são determinadas com base nos valores de simulação e obtidos em medições reais.

O sistema funciona como um cliente TCP/IP, habilitado para receber dados da rede Ethernet. Os transdutores de campo transmitem informações relativas a medições à rede e estas são entregues ao sistema para a supervisão. Utilizando o mesmo meio de transmissão o sistema desenvolvido poderá controlar o funcionamento de válvulas de fluxo e bloqueio.

Por ser concebido com uma plataforma modular e flexível, ao sistema poderão ser integradas inúmeras outras funcionalidades e modelagens, objetos de trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO VIII: CONCLUSÕES**

A proposta deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta computacional “inteligente” para subsidiar a automação da operação de distribuição de gás natural em dutos. Como resultado, obteve-se um sistema dinâmico com módulos de supervisão e controle integrados a simuladores de escoamento de gás natural munidos de algoritmos neurais, capaz de detectar, em regime permanente, e localizar pontos de vazamentos em dutos monitorados por sensores e medidores de vazão, com precisão razoável, além de possibilitar o isolamento de dutos com escape, através da atuação em válvulas de controle de fluxo. Para tanto avaliou-se as várias modelagens de redes de distribuição de gás natural e os vários métodos de Newton para solução. No software desenvolvido utilizou-se o Método Nodal de Newton e o método de Gauss-Seidel na solução dos sistemas de equações.

Os resultados podem ser considerados bons, visto que a convergência é obtida com poucas iterações. A dificuldade avaliada no método está no uso da matriz jacobiana do sistema, envolvendo as derivadas parciais de primeira ordem de funções não lineares, devido a sua grande sensibilidade com relação à aproximação inicial.

Devido a grande esparsidade da matriz jacobiana, optou-se pelo uso do método de Gauss-Seidel na solução dos sistemas lineares obtidos à cada iteração, visando a preservação da esparsidade da matriz jacobiana, o que é altamente vantajoso. Por outro lado, a grande sensibilidade do sistema com relação ao valor inicial induz à aplicação também de outros métodos na solução desse problema.

Analisado os resultados obtidos nas simulações da válvula proporcional eletro-hidráulica, antes e após a introdução do controlador PID, percebeu-se a redução do tempo de abertura da válvula após a implementação do controlador PID. Essa redução de tempo foi obtida com excelente estabilidade, não ocorrendo picos de tensões que pudessem comprometer o desempenho da válvula. A dificuldade encontrada foi à determinação das

constantes do controlador PID, sendo necessária a introdução neste trabalho do método de ajuste de Ziegler e Nichols do controlador PID, o que facilitou a tarefa para a determinação dos parâmetros do controlador.

Na detecção de vazamento, utilizou-se o método da compensação de volume. Tal método possui muitas desvantagens por tratar o problema apenas em regime permanente, o que pode ocasionar demora na detecção, principalmente em pequenos volumes. Rotinas de avaliação do perfil de consumo ainda deverão ser inseridas no sistema para diminuir a incidência de alarmes falsos e melhorar o tempo de resposta

O algoritmo de localização de vazamento implementado apresentou-se com bom desempenho e erros menores que 3%. A topologia de RNA utilizada mostrou-se satisfatória, no entanto outras configurações de RNA deverão ser avaliadas e testadas de forma a promover melhoria de performance e diminuição do erro.

No conjunto, apesar do sistema computacional proposto ainda estar em constante desenvolvimento, os resultados alcançados foram satisfatórios. Foi possível obter uma ferramenta funcional de fácil operação e muito poderosa, para auxiliar as distribuidoras de gás natural na operação de distribuição desse fluido.

O sistema desenvolvido poderá ser modificado para utilização no escoamento de outros fluidos. Inúmeros outros trabalhos poderão ser realizados para agregar mais inteligência aos processos, como por exemplo, a implementação no sistema de modelagens transientes; a introdução de compressores na rede; a implementação de algoritmos neurais de avaliação de perfil do escoamento de saída nos dutos para subsidiar na detecção de vazamentos; a avaliação do perfil de consumo dos clientes através de séries temporais para predição de vazamentos; a implementação de algoritmos interpoladores dinâmicos para localização de vazamentos; o desenvolvimento de algoritmos neurais para avaliação e crítica das medidas de sensores e medidores instalados na rede, dentre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, F. M. **Contribution to the study of neural networks in dynamical expert systems.** Ph.d. thesis, Institut d'Informatique, FUNDP, Belgium, 1993.

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

BELSITO, S.; BANERJEE, S.. **An innovative system for leak detection in pipelines.** Pipeline Industry Chemical Engineering, 1997.

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

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

BOLTON, W. **Engenharia de Controle.** São Paulo: Mac Graw-Hill. 1995.

BOWLES, E. B., MORROW, T. B., SPARKS, C. R., GREGOR, J. G.. **Gas pipeline rupture detection and control** – International Pipeline Conference ASME, v. 2, pp. 1129-1136, 1996.

CHUNG, W.-Y., LEE, D.-D. **Real time multi-channel gas leakage monitoring system using CPLD chip.** *Sensors and actuators B*, v. 77, p. 186-189, 2001.

DELARUE, V.. **Leak detection and location for gas transmission pipelines.** International Pipeline Conference ASME, v. 2, pp. 1109-1115, 1996.

DE NEGRI V.J., ATTÍE, S.S., TOLEDO L.B., **Controle de posição utilizando servoválvulas e válvulas proporcionais eletro-hidráulicas (parte I)**, Revista ABHP, 106 (1997) 15-18.

DEMPSEY, J., AL-HABIB, R. SCADA computer system controls major Saudi Aramco crude oil pipeline. *5th World Congress on Chemical Engineering*, v. 1, p. 973-980, San Diego, California, USA, 1996.

ELMAN, J.L. **Finding Structure in Time**. Cognitive Science vol.14, 1994.

ELLUL, I. R. MSc Dis. **Advances in pipeline leak detection techniques** – Pipe & Pipeline International, pp. 7-12, 1989.

FOX, R. W. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Trad. Alexandre Matos de Souza Melo. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995, 662 p.

FRANCONI, P., GORI, M. and SODA, G. **Local feedback multilayered networks**. Neural Computation, Vol.4, pp.120-130, 1992.

FUKUSHIMA, K., MAESHIMA, R., KINOSHITA, A., SHIRAISHI, H., KOSHIJIMA, I. Gas pipeline leak detection system using the online simulation method. *Computers and Chemical Engineering*, v. 24, n.2-7, p.453-456, 2000.  
*Gas Engineer's Handbook*, gráfico 1/30.

HAYKIN S. **Redes neurais: princípio e prática**. Trad. Paulo Martins Engel. 2ª. Ed. Porto Alegre: Bookman. 2001.

HIGGINS, P. **Advances in leak detection systems**. Pipeline Industry, v. 58, pp.55-56, 58, 1983.

HOPFIELD, J. J. AND TANK, D. W. **Computing with neural circuits: a model**, Science, Vol. 233, Aug. 1986.

IWATA, A., SUWA, Y., INO, Y., HOTTA, K. I. and SUZUMURA, N. **Hand-written japanese kanji character recognition by a structured self-growing neural network**, Artificial Neural Networks, Vol.2, I. Aleksander and J. Taylor (editors), Elsevier Science Publishers, pp.1189-1192, 1992.

JENÍČEK, T.; STERBA, J.. **Transient model based leak detection system** – 19th Int. Gas Union World Gas Conference, pp. 100-102, 1994.

JVARSHEISHVILI A. G., NAMGALADZE, D. P. **Investigation of a pipeline rupture accident** – International Journal of Engineering Fluid Mechanics, v. 4, pp. 267-283, 1991.  
OSIADACZ, A. J. **Simulation and analysis of gas networks**. London: E. & F.N.Spon, 1987, 273p.

KOHONEN, T. **Improved versions of learning vector quantization**, International Joint Conference on Neural Networks, San Diego, 1990.

KREMER S.C., **On the computational power of Elman-Style recurrent networks**, IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 6, No. 4, 1995.

MACIAS, I. B. **Detecção de vazamento em tubulações transportando gás**. Campinas, SP: [s.n.], 2004. (Tese de Mestrado)

MACHADO, F. W., **Modelagem chuva-vazão mensal utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR. 2005.

MCCULLOCH, W. S. AND PITTS, W. **A Logical calculus of the ideas immanent in nervous activity**. Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol5, pp.115-133, 1943.

MCKEE, R. J.. **Monitoring pipeline operation parameters for rupture detection** – ASME Petroleum Div. Fa. Workshop Pipeline & Leak Detection Seminar, pp.19-27, 1988.

MONTGOMERY, D. W. **Leak detection for multi-phase pipelines** – Pipes & Pipeline International, pp. 1-4, 1986.

MUKHERJEE, J., NARASIMHAN, S.. **Leak detection in networks of pipeline by the generalized likelihood ratio method** – Industrial Engineering Chem. Res., v. 35, pp. 1886-1893, 1996.

MURPHY, R. E., DEAN, P. D. **What we do to improve pipeline leak and rupture detection** – Annu. Pipeline Simulation Group, pp. 1-12, 1984.

NICHOLAS, R. E.. **Pipeline leak detection: how much is feasible?**– Oil & Gas Environment Safety, pp. 441-459, 1989.

\_\_\_\_\_. **Leak detection and location sensitivity analysis** – Pipeline Engineering, v. 46, pp. 11-18, 1992.

PARKER, D. **Learning logic**. Invention Report S81-64, File 1, Office of Technology Licensing, Stanford University, 1982.

PRINGLE, C. S.. **The pipeline monitor: An overview of software based leak detection** - ASME Petroleum Div. Fa. Workshop Pipeline & Leak Detection Seminar, pp.55-60, 1988.

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

RACHFORD Jr., WIKE, A. **How bulk modulus errors can affect leak detection** – International Pipeline Conference ASME, v. 2, pp. 1095-1099, 1996.

RUMELHART, D. E., MCCLELLAND J. L.. **Parallel Distributed Processing**, volume 1, Foundations. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1986.

SANDBERG, C., HOLMES, J., MCCOY, K., E KOPPITSCH, H. The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. *IEEE*

STREETER, V. L. e WYLIE, E.B. **Mecânica dos fluidos**. Trad. Milton Gonçalves Sanches. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982, 585 p.

THOMPSON, W. C.; SKOGMAN, K. D. **The application of real time flow modeling to pipeline leak detection** – Petroleum Div. Pipeline Engineering. pp. 39-45, 1984.

VAN REET, J. D., SKOGMAN, K. D.. **The effect of measurement uncertainty on Real Time pipeline Modeling applications** – ASME Pipeline Engineering Symposium, pp.29-33, 1987.

VERDE, C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice*, v. 9, p. 673-682, 2001.

VIANNA, M. R. **Instalações hidráulicas prediais**. Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada Editora, 1993.

WAIBEL, A. T., HANAZAWA, T., HINTON, G., SHIKANO, K. AND LANG, K. J. **Phoneme recognition using Time-Delay Neural networks**, IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.37, 1989.

WERBOS, P. J. **Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences**. PhD thesis, Harvard University, Cambridge, MA, 1974.

WHALEY, R. S.; NICHOLAS, R. E.; VAN REET, J. D.. **Tutorial on software based leak detection techniques**. Pipeline Simulations Interest Group, pp. 1 – 19, 1992.

WIKE, A. Liquid pipelines can use many varieties of SCADA-based leak detection systems. *Pipeline & Gas Journal*, v.213, n. 6, p.16-20, 1986.

WILLIAMS, R. J. and ZIPSER, D. **A Learning algorithm for continually running fully recurrent neural networks**, ics report 8805, Oct. 1988.

ZHANG, J. Statistical pipeline leak detection for all operating conditions. *Pipeline & Gas Journal Online*, Fev 2001.

### **Produção bibliográfica:**

#### **Artigos publicados em periódicos (Completo)**

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C. C.; et al. Controle da Distribuição de Gás Natural Através de Dutos com a Utilização de Válvulas Proporcionais Eletro-hidráulicas Controladas via Controladores PID. *Society of Petroleum Engineers – SPE*, Seccions Argentina, <http://www.spe.org.ar>, 2003.

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C. C.; et al. Cálculo em regime permanente da pressão de saída de redes de dutos de transporte e distribuição de gás natural à alta pressão pelo Método de Newton-Raphson generalizado. *Ensaios e Ciência*, Campo Grande - MS, v. 7, n. 3, p. 399-405, 2003.

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C. C. ; et al. Utilização do Método Nodal de Newton para o Cálculo de Parâmetros de Redes de Transporte e Distribuição de Gás Natural. *Ensaios e Ciências*, Campo Grande, v. 6, p. 137-154, 2002.

#### **Trabalhos em eventos (Completo)**

SCUCUGLIA, J. W.; SOUZA C. C., TEIXEIRA, M. C. M. ; et al. Sistema de Controle de Escoamento de Gás Natural em Dutos de Distribuição com Detecção de Vazamentos Utilizando Redes Neurais. *XVI Congresso Brasileiro de Automática (XVI CBA)*. Salvador, 2006.

SCUCUGLIA, J. W.; SOUZA C. C., TEIXEIRA, M. C. M. ; et al. Natural Gas Flow Control System with Leakage Detection and Location Using Neural Networks. *XII Congresso Latino-Americano de Controle Automático (XII CLCA)*. Salvador, 2006.

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA C. C., TEIXEIRA, M. C. M. ; et al. Restritor de fluxo de gás natural microcontrolado. In: Rio OIL & GAS 2004, 2004, Rio de Janeiro. Rio OIL & GAS 2004 Expo and Conference, 2004.

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C., TEIXEIRA, M. C. M. ; et al. Sistema inteligente de controle e automação da operação de distribuição de gás natural. In: Rio OIL & GAS 2004, 2004, Rio de Janeiro. Rio OIL & GAS 2004 Expo and Conference, 2004.

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C. C. ; et al. Utilização de Válvulas Proporcionais Eletro-hidráulica Controladas via Controladores PID 2003. In: GIMOR 2003 - Grupo de Interés en Modelado y Operación de Redes y Ductos, 2003, Buenos Aires. SPE Sección Argentina, 2003.

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C. C.; et al. Cálculo em Regime Permanente dos Valores das Pressões de Saídas e dos Escoamentos nos Ramos de Redes de Distribuição de Gás Natural Através de Dutos à Alta Pressão.. In: III Encontro de Pesquisa e Iniciação Científica da UNIDERP, 2003, Campo Grande. Ensaios e Ciências - ENPIC. Campo Grande: UNIDERP, 2003. v. 1. p. 29-37.

### **Trabalhos em eventos (Resumo)**

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C. C.; et al. Cálculo em Regime Permanente da Pressão de Saída de Redes de Dutos de Transporte e Distribuição de Gás Natural à Média Pressão Usando o Método de Newton Generalizado.. In: XXVI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2003, São José do Rio Preto. XXVI CNMAC, 2003. v. 1. p. 174.

SCUCUGLIA, J. W. ; SOUZA, C. C.; Controle de uma Válvula Pneumática em Tempo Real. In: XXVI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2003, São José do Rio Preto. XXVI CNMAC, 2003. v. 1. p. 111.

SOUZA, C. C.; SCUCUGLIA, J. W. ; et al. Análise e Modelamento de Redes de Transporte e Distribuição de Gás Natural Através de Dutos. In: 2º Congresso Nacional de Iniciação Científica, 2002, São Carlos. 2º CONIC SEMESP 2002, 2002. v. 02. p. 945.

### **Prêmio Internacional:**

Prêmio de melhor trabalho em automação aplicada ao Gás Natural, com o projeto “Controle da Operação de Distribuição de Gás Natural”, concedido pela Society of Petroleum Engineers, GIMOR 2003 - Grupo de Interés en Modelado y Operación de Redes y Ductos, Buenos Aires. SPE Sección Argentina, 2003.

**ANEXO A**  
**Rotinas em MATLAB**

- A1 MÉTODO NODAL DE NEWTON
- A2 MÉTODO NODAL DE NEWTON – MÉTODO HARDY-CROSS 1
- A3 MÉTODO NODAL DE NEWTON – MÉTODO HARDY-CROSS 2
- A4 MÉTODO DE NEWTON EM MALHA
- A5 MÉTODO DE NEWTON EM MALHA – 36 DUTOS
- A6 MÉTODO DE NEWTON EM MALHA – MÉTODO HARDY-CROSS 1
- A7 MÉTODO DE NEWTON EM MALHA – MÉTODO HARDY-CROSS 2
- A8 MÉTODO NODAL-MALHA DE NEWTON

**A1: MÉTODO NODAL DE NEWTON****PROGRAMA: NEWTON\_JACOBI**

```

function N1_Seidel(x,y,z,tol,nmax);
% N1_Seidel(x,y,z,tol,nmax)
icount=0;
y1=1.0;
y2=1.0;
y3=1.0;
P1=30;
while(sqrt(y1^2+y2^2+y3^2) > tol)
    icount=icount+1;
    a=feval('funf2x',x,y,z);
    b=feval('funf2y',x,y,z);
    c=feval('funf2z',x,y,z);
    d=feval('funf3x',x,y,z);
    e=feval('funf3y',x,y,z);
    f=feval('funf3z',x,y,z);
    g=feval('funf4x',x,y,z);
    h=feval('funf4y',x,y,z);
    k=feval('funf4z',x,y,z);
    A=[a b c;d e f;g h k];
    w=det(A);
    if (abs(w)<tol)
        error('O Jacobiano anula-se em uma das iterações, tente um novo ponto inicial x,y,z');
    end
    F1=feval('funf2',x,y,z);
    F2=feval('funf3',x,y,z);
    F3=feval('funf4',x,y,z);
    B=[F1;F2;F3];
    C=inv(A)*(-B);
    y1=C(1,1);
    y2=C(2,1);
    y3=C(3,1);
    D=[x;y;z];
    P=D+C;
    x=(P(1,1));
    y=(P(2,1));
    z=(P(3,1));
end
if (icount>nmax)
    ss1=sprintf('O processo nao convergiu em %5.0f iteracoes, tente um novo ponto
    inicial', nmax);
    disp(' ');
    disp(' ');
    disp(ss1);
    break;
    break
end
ss=sprintf(' Soluções do sistema encontradas pelo método Nodal de Newton são:');

```

```

ssA=sprintf('      Pressão: P1 = %10.7f',P1);
ssB=sprintf('      Pressão: P2 = %10.7f',x);
ssC=sprintf('      Pressão: P3 = %10.7f',y);
ssD=sprintf('      Pressão: P4 = %10.7f',z);
ssE=sprintf('      Após %5.0f iterações',icount);
disp(' ')
disp(' ')
disp(ss)
disp(ssA)
disp(ssB)
disp(ssC)
disp(ssD)
disp(ssE)

```

### SUB FUNÇÕES:

```

function z1=funQ1(x,y,z)
z1=[1*(sqrt(1*(30-x)/0.000104782))];

```

```

function z2=funQ2(x,y,z)
z2=[1*(sqrt(1*(30-y)/0.000585065))];

```

```

function z3=funQ3(x,y,z)
z3=[1*(sqrt(1*(30-z)/0.000064718))];

```

```

function z4=funQ4(x,y,z)
z4=[1*(sqrt(1*(y-x)/0.000702078))];

```

```

function z5=funQ5(x,y,z)
z5=[(-1)*(sqrt((-1)*((y-z)/0.000397844)))]];

```

```

function w=funf2(x,y,z)
w=[(feval('funQ1',x,y,z))+(feval('funQ4',x,y,z))-250];

```

```

function w22=funf2x(x,y,z)
a=feval('funQ1',x,y,z);
b=feval('funQ4',x,y,z);
w22=-1/2*[(a/(30-x))+(b/(-x+y))];

```

```

function w23=funf2y(x,y,z)
w23=1/2*[(feval('funQ4',x,y,z))/(y-x)];

```

```

function w24=funf2z(x,y,z)
w24=0;

```

```

function w3=funf3(x,y,z)
w3=[(feval('funQ2',x,y,z))-(feval('funQ4',x,y,z))-(feval('funQ5',x,y,z))-100];

```

```

function w32=funf3x(x,y,z)
w32=1/2*[(feval('funQ4',x,y,z))/(y-x)];

```

```
function w33=funf3y(x,y,z)
w33=-1/2*[(feval('funQ2',x,y,z))/(30-y)+(feval('funQ4',x,y,z))/(-
x+y)+(feval('funQ5',x,y,z))/(y-z)];
```

```
function w34=funf3z(x,y,z)
w34=1/2*[(feval('funQ5',x,y,z))/(y-z)];
```

```
function w4=funf4(x,y,z)
w4=[(feval('funQ3',x,y,z))+(feval('funQ5',x,y,z))-180];
```

```
function w42=funf4x(x,y,z)
w42=0;
```

```
function w43=funf4y(x,y,z)
w43=1/2*[(feval('funQ5',x,y,z))/(y-z)];
```

```
function w44=funf4z(x,y,z)
w44=-1/2*[(feval('funQ3',x,y,z))/(30-z)+(feval('funQ5',x,y,z))/(y-z)];
```

#### SOLUÇÃO DO PROGRAMA: NEWTON\_JACOBI

» N1\_Seidel (23.4511, 24.1493, 27.9031, 0.0001, 100).

Soluções do sistema encontradas pelo método Nodal de Newton são:

Pressão: P1 = 30.0000000

Pressão: P2 = 25.0348761

Pressão: P3 = 25.7681821

Pressão: P4 = 26.6571809

Após 5 iterações

**A2 : MÉTODO NODAL DE NEWTON – MÉTODO HARDY-CROSS****PROGRAMA: HARDY\_CROSS**

```

function Hardy_Cross(P2,P3,P4,tol,nmax)
%Hardy_Cross(P2,P3,P4,tol,nmax)
icount=0;
sP2=1.0;
sP3=1.0;
sP4=1.0;
L2=250;
L3=100;
L4=180;
P1=30;
K(1)=0.000104782;
K(2)=0.000585065;
K(3)=0.000064718;
K(4)=0.000702078;
K(5)=0.000397844;
while(sqrt(sP2^2+sP3^2+sP4^2) > tol);
    icount=icount+1;
    for I=1:5;
        DP(1)=P1-P2;
        DP(2)=P1-P3;
        DP(3)=P1-P4;
        DP(4)=P3-P2;
        DP(5)=P3-P4;
        if DP(I) > 0;
            Q(I)=(sqrt(DP(I)/K(I)));
        else
            Q(I)=(-1)*sqrt((-1*DP(I))/K(I));
        end
    end
    F2=Q(1)+Q(4)-L2;
    J2=-1/2*(Q(1)/DP(1)+Q(4)/DP(4));
    J22=1/(J2);
    sP2=-(J22)*F2;
    P2=P2+sP2;
    for I=1:5;
        DP(1)=P1-P2;
        DP(2)=P1-P3;
        DP(3)=P1-P4;
        DP(4)=P3-P2;
        DP(5)=P3-P4;
        if DP(I) > 0;
            Q(I)=(sqrt(DP(I)/K(I)));
        else
            Q(I)=(-1)*sqrt((-1*DP(I))/K(I));
        end
    end
    F3=Q(2)-Q(4)-Q(5)-L3;

```

```

J3=-1/2*(Q(2)/DP(2)+Q(4)/DP(4)+Q(5)/DP(5));
J33=1/(J3);
sP3=-(J33)*F3;
P3=P3+sP3;
for I=1:5;
    DP(1)=P1-P2;
    DP(2)=P1-P3;
    DP(3)=P1-P4;
    DP(4)=P3-P2;
    DP(5)=P3-P4;
    if DP(I) > 0;
        Q(I)=(sqrt(DP(I)/K(I)));
    else
        Q(I)=(-1)*sqrt((-1*DP(I))/K(I));
    end
end
F4=Q(3)+Q(5)-L4;
J4=-1/2*(Q(3)/DP(3)+Q(5)/DP(5));
J44=1/(J4);
sP4=-(J44)*F4;
P4=P4+sP4;
end
if (icount>nmax)
    ss1=sprintf('O processo não convergiu em %5.0f iterações, tente um novo ponto
    inicial',nmax);
    disp(' ');
    disp(' ');
    disp(ss1);
    break;
    break
end
ss=sprintf(' Soluções do sistema encontradas pelo método Hardy-Cross são:');
ssA=sprintf('     Pressão: P1 = %10.7f',P1);
ssB=sprintf('     Pressão: P2 = %10.7f',P2);
ssC=sprintf('     Pressão: P3 = %10.7f',P3);
ssD=sprintf('     Pressão: P4 = %10.7f',P4);
ssE=sprintf('     Após %5.0f iterações',icount);
disp(' ')
disp(' ')
disp(ss)
disp(ssA)
disp(ssB)
disp(ssC)
disp(ssD)
disp(ssE)

```

## SOLUÇÃO DO PROGRAMA: HARDY\_CROSS

» Hardy\_Cross (23.4511, 24.1493, 27.9031, 0.0001, 100)

Soluções do sistema encontradas pelo método Hardy-Cross são:

Pressão: P1 = 30.0000000

Pressão: P2 = 25.0348315

Pressão: P3 = 25.7681477

Pressão: P4 = 26.6571658

Após 11 iterações

**A3: MÉTODO DE MALHA DE NEWTON****PROGRAMA: NEWTON\_MALHA**

```

function Newton_Malha(qA,qB,tol,nmax);
% Newton_Malha(qA,qB,tol,nmax)
icount=0;
y1=1.0;
y2=1.0;
L2=250;
L3=100;
L4=180;
P1=30;
K(1)=0.000104782;
K(2)=0.000585065;
K(3)=0.000064718;
K(4)=0.000702078;
K(5)=0.000397844;
while(sqrt(y1^2+y2^2) > tol)
    icount=icount+1;
    for I=1:5;
        Q(1)=L2-qA;
        Q(2)=L3+qA+qB;
        Q(3)=L4-qB;
        Q(4)=qA;
        Q(5)=qB;
        if Q(I)>0;
            DP(I)=(K(I)*(Q(I))^2);
        else
            DP(I)=-(K(I)*(Q(I))^2);
        end
    end
    P2=-DP(1)+P1;
    P3=-DP(2)+P1;
    P4=-DP(3)+P1;
    FA=-DP(1)+DP(2)+DP(4);
    FB=DP(2)-DP(3)+DP(5);
    F=[FA;FB];
    a=K(1)*abs(Q(1));
    b=K(2)*abs(Q(2));
    c=K(3)*abs(Q(3));
    d=K(4)*abs(Q(4));
    e=K(5)*abs(Q(5));
    J=2*[(a+b+d) b;b (b+c+e)];
    C=inv(J)*(-F);
    y1=C(1,1);
    y2=C(2,1);
    D=[qA;qB];
    P=C+D;
    qA=P(1,1);
    qB=P(2,1);
end

```

```

end
if (icount>nmax)
    ss1=sprintf('O processo nao convergiu em %5.0f iteracoes, tente um novo ponto
    inicial',nmax);
    disp(' ');
    disp(' ');
    disp(ss1);
    break
end
ss=sprintf(' Soluções do sistema encontradas pelo método de malha de Newton são: ');
ssA=sprintf('     Pressão: P1 = %10.7f',P1);
ssB=sprintf('     Pressão: P2 = %10.7f',P2);
ssC=sprintf('     Pressão: P3 = %10.7f',P3);
ssD=sprintf('     Pressão: P4 = %10.7f',P4);
ssE=sprintf('     qA = %10.7f',qA);
ssF=sprintf('     qB = %10.7f',qB);
ssG=sprintf('     Após %5.0f iterações',icount);
disp(' ')
disp(' ')
disp(ss)
disp(ssA)
disp(ssB)
disp(ssC)
disp(ssD)
disp(ssE)
disp(ssF)
disp(ssG)

```

#### SOLUÇÃO DO PROGRAMA: NEWTON\_MALHA

» Newton\_Malha (0,0,0.0001,100)

Soluções do sistema encontradas pelo método de malha de Newton são:

Pressão: P1 = 30.0000000

Pressão: P2 = 25.0348766

Pressão: P3 = 25.7681822

Pressão: P4 = 26.6571805

qA = 32.3184079

qB = -47.2709327

Após 5 iterações.

**A6: MÉTODO DE MALHA DE NEWTON - MÉTODO HARDY-CROSS****PROGRAMA: HARDYCROSS\_MALHA**

```

function Hardycross_Malha(qA,qB,tol,nmax);
% Hardycross_Malha(qA,qB,tol,nmax)
icount=0;
y1=1.0;
y2=1.0;
L2=250;
L3=100;
L4=180;
P1=30;
K(1)=0.000104782;
K(2)=0.000585065;
K(3)=0.000064718;
K(4)=0.000702078;
K(5)=0.000397844;
while(sqrt(y1^2+y2^2) > tol)
    icount=icount+1;
    for I=1:5;
        Q(1)=L2-qA;
        Q(2)=L3+qA+qB;
        Q(3)=L4-qB;
        Q(4)=qA;
        Q(5)=qB;
        if Q(I)>0;
            DP(I)=(K(I)*(Q(I))^2);
        else
            DP(I)=-(K(I)*(Q(I))^2);
        end
    end
    P2=-DP(1)+P1;
    P3=-DP(2)+P1;
    P4=-DP(3)+P1;
    a=K(1)*abs(Q(1));
    b=K(2)*abs(Q(2));
    c=K(3)*abs(Q(3));
    d=K(4)*abs(Q(4));
    e=K(5)*abs(Q(5));
    FA=-DP(1)+DP(2)+DP(4);
    JA=2*(a+b+d);
    JA1=inv(JA);
    CA=JA1*(-FA);
    qA=CA+qA;
    FB=DP(2)-DP(3)+DP(5);
    JB=2*(b+c+e);
    JB1=inv(JB);
    CB=JB1*(-FB);
    qB=CB+qB;
    y1=CA;

```

```

    y2=CB;
end
if (icount>nmax)
    ss1=sprintf('O processo não convergiu em %5.0f iterações, tente um novo ponto
    inicial',nmax);
    disp(' ');
    disp(' ');
    disp(ss1);
    break;
    break
end
ss=sprintf(' Soluções do sistema encontradas pelo método Hardy-Cross ');
ssA=sprintf('      Pressão: P1 = %10.7f',P1);
ssB=sprintf('      Pressão: P2 = %10.7f',P2);
ssC=sprintf('      Pressão: P3 = %10.7f',P3);
ssD=sprintf('      Pressão: P4 = %10.7f',P4);
ssE=sprintf('      Escoamento no ramo qA = %10.7f',qA);
ssF=sprintf('      Escoamento no ramo qB = %10.7f',qB);
ssG=sprintf('      Após %5.0f iterações',icount);
disp(' ')
disp(' ')
disp(ss)
disp(ssA)
disp(ssB)
disp(ssC)
disp(ssD)
disp(ssE)
disp(ssF)
disp(ssG)

```

#### SOLUÇÃO DO PROGRAMA: HARDYCROSS\_MALHA

» Hardycross\_Malha(0,0,0.0001,100)

Soluções do sistema encontradas pelo método Hardy-Cross são:

Pressão: P1 = 30.0000000

Pressão: P2 = 25.0348721

Pressão: P3 = 25.7681864

Pressão: P4 = 26.6571822

Escoamento no ramo qA = 32.3183851

Escoamento no ramo qB = -47.2708812

Após 24 iterações

**A8: MÉTODO NODAL-MALHA DE NEWTON****PROGRAMA: NEWTON\_MALHA1**

```

function Newton_Malha1(qA,qB,tol,nmax);
icount=0;
y1=1.0;
y2=1.0;
L2=250;
L3=100;
L4=180;
P1=30;
K(1)=0.000104782;
K(2)=0.000585065;
K(3)=0.000064718;
K(4)=0.000702078;
K(5)=0.000397844;
while(sqrt(y1^2+y2^2) > tol)
    icount=icount+1;
    for I=1:5;
        Q(1)=L2-qA;
        Q(2)=L3+qA+qB;
        Q(3)=L4-qB;
        Q(4)=qA;
        Q(5)=qB;
        if Q(I)>0;
            DP(I)=(K(I)*(Q(I))^2);
        else
            DP(I)=-((K(I)*(Q(I))^2);
        end
    end
    for I=1:5;
        R(I)=(2*K(I)*abs(Q(I)))^-1;
        I=5;
    end
    DQ(1)=R(1)*(DP(1)-P1);
    DQ(2)=R(2)*(DP(2)-P1);
    DQ(3)=R(3)*(DP(3)-P1);
    DQ(4)=R(4)*DP(4);
    DQ(5)=R(5)*DP(5);
    J=-[(R(1)+R(4)) -R(4) 0;-R(4) (R(2)+R(4)+R(5)) -R(5);0 -R(5) (R(3)+R(5))];
    J1=inv(J);
    V1=DQ(1)+DQ(4);
    V2=DQ(2)-DQ(4)-DQ(5);
    V3=DQ(3)+DQ(5);
    V=[V1;V2;V3];
    C=J1*(V);
    P2=C(1,1);
    P3=C(2,1);
    P4=C(3,1);
    DQ4=R(4)*((P3-P2)-DP(4));

```

```

DQ(4)=DQ4;
DQ(4)=qA+DQ(4);
DQ5=R(5)*((P3-P4)-DP(5));
DQ(5)=DQ5;
DQ(5)=qB+DQ(5);
y1=DQ(4)-qA;
y2=DQ(5)-qB;
qA=DQ(4);
qB=DQ(5);
end
if (icount>nmax)
    ss1=sprintf('O processo não convergiu em %5.0f iterações, tente um novo ponto
    inicial',nmax);
    disp(' ');
    disp(' ');
    disp(ss1);
    break
end
ss=sprintf(' Soluções do sistema encontradas pelo método nodal-malha de Newton são: ');
ssA=sprintf('      Pressão: P1 = %10.7f',P1);
ssB=sprintf('      Pressão: P2 = %10.7f',P2);
ssC=sprintf('      Pressão: P3 = %10.7f',P3);
ssD=sprintf('      Pressão: P4 = %10.7f',P4);
ssE=sprintf('      qA = %10.7f',qA);
ssF=sprintf('      qB = %10.7f',qB);
ssG=sprintf('      Após %5.0f iterações',icount);
disp(' ')
disp(' ')
disp(ss)
disp(ssA)
disp(ssB)
disp(ssC)
disp(ssD)
disp(ssE)
disp(ssF)
disp(ssG)

```

### SOLUÇÃO DO PROGRAMA: NEWTON\_MALHA1

» Newton\_Malha1(0.5,0.5,0.0001,100)

Soluções do sistema encontradas pelo método nodal-malha de Newton são:

Pressão: P1 = 30.0000000

Pressão: P2 = 25.0348761

Pressão: P3 = 25.7681821

Pressão: P4 = 26.6571809

qA = 32.3184079

qB = -47.2709327

Após 5 iterações.