

# Sistema de Detecção, Localização e Isolamento de Ramos com Vazamento em Redes de Gás Natural

**José Wanderley Scucuglia**

**Celso Correia de Souza**

**Cristian Mara M. M. Patrício**

Núcleo de Energia, Automação e Controle – NEAC, UNIDERP,  
Rua Cerará, 333  
79003-010, Campo Grande, MS  
E-mail: scucuglia@terra.com.br, celsocorreia@mail.uniderp.br,  
cristian\_mara@yahoo.com.br

**Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira**

Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, FEIS, UNESP  
Avenida Brasil Norte, 364, Bairro: Zona Norte  
CEP.: 15385-000, Ilha Solteira – SP  
marcelo@dee.feis.unesp.br

**Resumo** - O modelamento de redes de gás permite-nos cálculos de parâmetros tais como pressão, temperatura e vazão em qualquer ramo da rede, tornando-se, por meio de simulação desta modelagem, útil para a checagem e controle de equipamentos de medição e de segurança instalados ao longo da rede. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema inteligente capaz de identificar vazamentos em redes de distribuição de gás natural, localizá-los, utilizando redes neurais artificiais e, através de um sistema de controle automático, isolar o trecho identificado na rede. Para a consecução do objetivo considerou-se a instalação de válvulas eletro-hidráulicas, munidas de controladores PID (controlador proporcional, integral e derivativo) em cada um dos pontos de entrega e recebimento de gás da rede, bem como medidores de vazão, pressão e temperatura, de forma a funcionar em tempo real e conectados a uma central de controle automática gerenciada por um software algébrico computacional. Os resultados da simulação podem ser considerados bons, visto que a operação de detecção, localização e isolamento do ramo da rede com vazamento foi realizada com sucesso, com apenas 1,97% de erro na localização do ponto.

## 1 Introdução

Tecnologias emergentes, envolvendo a utilização do gás natural como combustível automotivo e em aplicações residenciais e comerciais tem ampliado cada vez mais a diversificação do uso do gás natural. O suprimento dessa crescente demanda é limitado, em particular, pela ausência de uma adequada infraestrutura 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 uma permanente monitoração das condições operacionais. A obtenção de informação precisa e confiável sobre as condições da rede representa 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, como por exemplo vazamentos, que acontecem de forma não prevista, causando danos para o homem e para o meio ambiente.

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

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de gerenciamento capaz de detectar, localizar e isolar trechos de uma rede de distribuição de gás natural afetados por vazamentos. O desenvolvimento deste sistema ocorreu em três fases. Na primeira fase, desenvolveu-se um modelo de detecção de vazamento que consiste em receber as leituras dos módulos de supervisão (medidores de vazão, temperatura e pressão), instalados nos nós de entrada e saída dos dutos, verificando se há diferenças entre estas leituras com aquelas obtidas com a rede funcionando em regime permanente. A segunda fase consiste na localização do ponto de vazamento no duto identificado, utilizando redes neurais artificiais para determinar a distância do vazamento a partir do nó de entrada. A terceira fase do sistema, responsável pelo fechamento de válvulas de segurança, tem como intuito o isolamento do duto danificado para posterior recuperação. O sistema desenvolvido foi testado na simulação de uma rede de 19 dutos, 12 nós de saída e um nó de entrada, para verificar a sua eficiência e estabelecimento de parâmetros de comparação com outros sistemas descritos na literatura.

## 2 Detecção de Vazamento

A simulação feita em redes de escoamento de gás em dutos usa modelos desenvolvidos com recursos das leis da física, possibilitando o controle da pressão e do fluxo de gás. O estado permanente do escoamento em

redes de gás é descrito por um conjunto de equações algébricas, geralmente, não-lineares, ao passo que o estado não permanente requer um sistema de equações diferenciais parciais cujo tratamento matemático é complicado. Neste trabalho estuda-se redes de gás em regime permanente, usando a hipótese de que se a pressão decresce ao longo do duto, a densidade também decresce, a velocidade cresce, aumentando a energia cinética do sistema.

A obtenção da equação geral do escoamento em dutos envolve, ainda, as seguintes hipóteses de simplificação: escoamento permanente e isotérmico, mudança de energia cinética desprezível, compressibilidade constante do gás sobre o comprimento do duto, validade das perdas por fricção de Darcy relacionada ao duto e coeficiente de fricção constante ao longo do duto. A equação geral de escoamento de gás em dutos para redes funcionando à alta pressão (acima de 7,0 bar) é dada por

$$Q_k = 7,57 \times 10^{-4} \cdot \frac{T_n}{p_n} \cdot \sqrt{\frac{(p_i^2 - p_j^2) \cdot d^5}{f \cdot S \cdot T \cdot Z \cdot l_k}} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (1)$$

sendo  $Q_k$  = o escoamento do gás no duto  $k$ ,  $[\text{m}^3/\text{h}]$ ;  $T_n$  = temperatura ambiente,  $[\text{K}]$ ;  $p_n$  = pressão atmosférica,  $[\text{bar}]$ ;  $p_i$  = pressão na entrada do duto  $k$ ,  $[\text{bar}]$ ;  $p_j$  = pressão na saída do duto  $k$ ,  $[\text{bar}]$ ;  $d$  = diâmetro interno do duto,  $[\text{m}]$ ;  $f$  = fator de fricção ou coeficiente de atrito, adimensional;  $S$  = gravidade específica do gás, adimensional;  $T$  = temperatura do gás,  $[\text{K}]$ ;  $Z$  = coeficiente de compressibilidade do gás, adimensional;  $l_k$  = comprimento do duto  $k$ ,  $[\text{m}]$ .

A equação (1) relaciona o escoamento com a variação de pressão de entrada e saída do duto  $k$ , ou seja, a variação de pressão  $\Delta P$  é uma função do escoamento  $Q$ , podendo ser escrita por

$$\Delta P = \phi(Q) \quad (2)$$

Modelamento de Redes de Transporte e Distribuição de Gás

A figura 1 representa uma rede de distribuição de gás composta de nove dutos, seis nós de saída de gás,  $L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$  e  $L_7$  e um nó de recebimento  $L_1$  (nó fonte ou de referência).

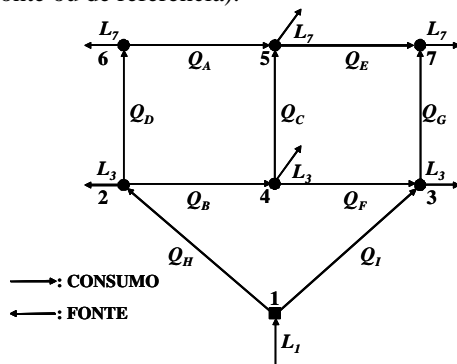


Figura 1 – Grafo de uma rede distribuição de gás.

Em regime permanente, o volume de gás que sai da rede é igual ao volume que entra na rede ( $L_1 = L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7$ ). Os parâmetros  $Q_i$ , ( $i = A, B, C, D, E, F, G, H$  e  $I$ ), denominam-se escoamentos nos dutos, com sentidos arbitrários.

Todo modelo de rede de gás em regime permanente pode ser descrito por um conjunto de matrizes obtidas de acordo com a topologia da rede, podendo-se obter matrizes com alto grau de esparsidade de acordo com a interconexão entre os ramos da rede.

A matriz que representa a interconexão entre os ramos é denominada matriz de incidência ramo-nó (Osidadza, 1987), a saber:

$$A = [a_{ij}]_{n \times m},$$

sendo  $n$  = número de nós (incluindo o nó de referência);  $m$  = número de dutos da rede;  $a_{ij}$  = elemento da linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz  $A$ , correspondente ao nó  $i$  e ramo  $j$ , definida como

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

Eliminando da matriz  $A$  a linha correspondente ao nó de referência, obtém-se uma nova matriz de incidência  $A_1$ , denominada matriz de incidência reduzida ramo-nó,

$$A_1 = [a_{ij}]_{n_1 \times m},$$

sendo  $n_1$  = número de nós, excluído o nó de referência.

Utilizando a primeira lei de Kirchhoff [2], emprestada das redes elétricas, estabelecendo que a soma algébrica das correntes em um nó é nula, em analogia com às redes de gás, tem-se que a soma algébrica dos escoamentos em cada nó é zero, isto é, a soma dos escoamentos de saídas de um nó é igual à soma dos escoamentos que chegam a esse nó. Assim, da rede da figura 1, pode-se escrever

$$\begin{cases} -Q_H - Q_I & = -L_1 \\ -Q_B - Q_D + Q_H & = L_2 \\ +Q_F - Q_G - Q_I & = L_3 \\ +Q_B - Q_C - Q_F & = L_4 \\ +Q_A + Q_C - Q_E & = L_5 \\ -Q_A + Q_D & = L_6 \\ +Q_E + Q_G & = L_7 \end{cases}$$

Matricialmente, tem-se

$$L = A Q \quad (3)$$

sendo  $L$  = vetor de cargas nos nós (dimensão  $7 \times 1$ ),  $Q$  = vetor de escoamentos nos dutos (dimensão  $9 \times 1$ ) a  $A$  = matriz de incidência ramo-nó (dimensão  $7 \times 9$ ). As equações do sistema acima são linearmente dependentes, pois a soma delas é igual a zero. Assim, a eliminação da equação referente ao nó fonte não produz nenhum efeito sobre a solução do sistema, obtendo-se um novo sistema com o número de equações reduzido de um, dado por.

$$L_1 = A_1 Q \quad (4)$$

Como as quedas de pressões nos dutos estão relacionadas às pressões nodais, então, da rede da figura 1, tem-se

$$\begin{cases} \Delta P_A = -P_5 + P_6 \\ \Delta P_B = +P_2 - P_4 \\ \Delta P_C = +P_4 - P_5 \\ \Delta P_D = +P_2 - P_6 \\ \Delta P_E = +P_5 - P_7 \\ \Delta P_F = -P_3 + P_4 \\ \Delta P_G = +P_3 - P_7 \\ \Delta P_H = +P_1 - P_2 \\ \Delta P_I = +P_1 - P_3 \end{cases}$$

que pode ser escrita, matricialmente, como

$$\Delta P = -A^T P \quad (6)$$

sendo  $\Delta P$  = vetor variação de pressão nos dutos (dimensão  $m$ ),  $A^T$  = matriz transposta da matriz de incidência ramo-nó (dimensão  $m \times n$ ) e  $P$  = vetor pressão nodal (dimensão  $n$ ).

Substituindo a equação (2) em (6), tem-se

$$Q = \phi(-A^T P)$$

Como  $L_1 = A_1 Q$ , então

$$A_1[\phi(-A^T P)] - L_1 = 0 \quad (7)$$

que representa o modelo matemático, para rede de distribuição de gás.

### Duto Monitorado

A figura 2 representa um duto monitorado, consistindo, um duto com válvulas e medidores instalados próximos aos nós de envio e recebimento de gás, deste respectivo duto. Sendo  $e$  = nó de entrada de gás;  $s$  = nó de saída de gás;  $V_e$  = válvula de segurança do nó entrada;  $V_s$  = válvula de segurança do nó de saída;  $MS_e$  = módulo de supervisão do nó de entrada;  $MS_s$  = módulo de supervisão do nó de saída e  $Q_k$  = escoamento no duto  $k$ .

Os escoamentos  $Q_e$  e  $Q_s$  são determinados pelos medidores de vazão dos nós de entrada e saída respectivamente, instalados no Módulo de Supervisão ( $MS$ ) do duto  $k$ . Considerando que o escoamento é constante em um duto em regime permanente, os escoamentos  $Q_e$  e  $Q_s$  são iguais. Estes valores são comparados com o valor calculado  $Q_k$ , cuja a finalidade é monitorar o sistema. Sendo  $Q_e \neq Q_s$ , um alarme é acionado passando para a segunda fase do sistema de controle, consistindo da localização do ponto de vazamento no duto identificado.

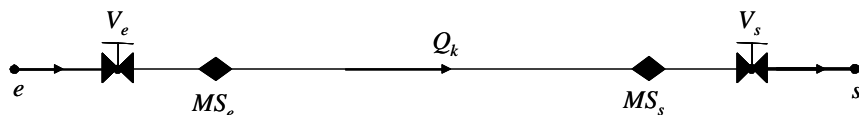


Figura 2 – Duto monitorado.

## 3 Localização de Vazamento

Perdas de carga em dutos causam mudanças nas vazões e pressões, possibilitando, assim, a detecção e localização destas perdas. Um vazamento de apenas 0,5% da carga de entrada, além de provocar prejuízos econômicos, ainda há um outro grande problema a ser enfrentado, o impacto ambiental que deve ser evitado. Detectando o vazamento em um duto, a segunda etapa é, portanto, localizar o ponto do vazamento no duto identificado. Para isso utilizou-se Rede Neural Artificial (RNA), cuja habilidade em aprender a partir de dados de entrada, tornou-a ferramenta inestimável em aplicações tão diversas como modelagem, análise da dados, reconhecimento de padrões e no controle automático de sistemas [1].

Um aspecto de fundamental importância para o desenvolvimento da RNA é a coleta do conjunto de dados que servirá de alimentação para a rede. Essa tarefa requer uma análise cuidadosa sobre o problema para minimizar ambigüidades e erros nos dados selecionados. O conjunto de dados deverá conter informações que forneça condição de aprendizado para a rede. As variáveis que precisam ser determinadas são os parâmetros de saída, devendo os parâmetros de entrada possuírem um relacionamento direto com a saída desejada.

Para a localização do vazamento, a informação há ser prevista é a distância do vazamento a partir do nó de entrada e, os parâmetros de entrada utilizados são as pressões e cargas nos nós de recebimento e entrega do duto monitorado. Propomos, portanto, uma Rede Perceptron de Múltiplas Camadas capaz de informar o ponto do vazamento no duto.

### Rede Perceptron de Múltiplas Camadas

Este tipo de rede neural, Rede Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP) [4], consiste de um conjunto de dados sensoriais (nós de fonte) que constituem a camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. A figura 3 ilustra a estrutura de um MLP com duas camadas ocultas. O número de camadas ocultas pode ser maior do que um, não devendo ultrapassar a três, devido a grande dificuldade do treinamento quando o número destas camadas aumenta. Um neurônio em qualquer lugar da rede está conectado a todos os nós/neurônios da camada anterior. O fluxo de sinal através da rede progride para frente, da esquerda para a direita e de camada em camada. O treinamento de rede MLP ocorre de forma supervisionada com um algoritmo muito popular conhecido como algoritmo de retropropagação de erro, “error back-propagation”. Esse algoritmo é baseado na regra de aprendizagem por correção de erro, consistindo basicamente de dois

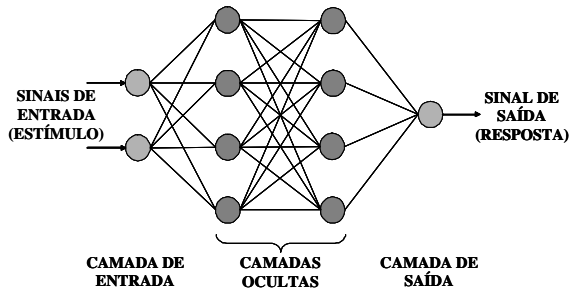


Figura 3 – MLP com duas camadas ocultas.

passos: um passo para frente, a propagação, e um passo para trás, a retropropagação. No passo a frente, um padrão de entrada (vetor de entrada) é aplicado aos nós sensoriais da rede e seu efeito se propaga através da rede, camada por camada. Finalmente, um conjunto de saídas é produzido como a resposta real da rede. Na fase da propagação os pesos sinápticos da rede são todos fixos. Durante o passo para trás, os pesos sinápticos são todos ajustados de acordo com uma regra de correção de erro. Especificamente, a resposta real da rede é subtraída de uma resposta desejada para produzir um sinal de erro. Este sinal de erro é então propagado para trás da rede, contra a direção das conexões sinápticos. Os pesos sinápticos são ajustados para fazer com que a resposta real da rede se aproxime o mais perto da resposta desejada. O algoritmo “back-propagation” só exige que as funções de ativação das camadas ocultas sejam diferenciáveis em qualquer valor do domínio. O desenvolvimento do algoritmo de retropropagação fornece um método computacional eficiente para o treinamento de “perceptrons” de múltiplas camadas.

### Geração da base de dados

A base de dados utilizada para treinar a rede MLP foi gerada a partir de um software algébrico computacional desenvolvido e baseado na modelagem matemática de redes de dutos [6]. 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 e considerando 29 pontos de vazamento ao longo do duto, formou-se um total de 725 dados, denominado de teste padrão, em regime permanente. Um total de 500 dados foram utilizados no treinamento da rede (dados de treinamento) e 225 dados utilizados para testes da rede treinada (dados de simulação). O teste padrão gerado mostrou-se adequado resultando uma rede com um bom desempenho para a localização do vazamento.

### Arquitetura de rede

Foram treinadas e testadas várias redes com arquiteturas diferentes, porém escolheu-se a que apresentou melhor performance na localização do

vazamento apresentando um erro de até 2,5%. 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 [4].

## 4 Isolamento de Duto

O procedimento de isolamento de duto é realizado por válvulas proporcionais eletro-hidráulicas, designadas como válvulas bloqueio, controladas por um sistema de supervisão. Nessas válvulas são acoplados controladores PID para permitir um melhor desempenho no seu funcionamento, impondo maior rapidez e garantindo a estabilidade do sistema.

### Válvulas Eletro-Hidráulicas com Controladores PID

As válvulas proporcionais eletro-hidráulicas têm inúmeras aplicações, tanto em equipamentos móveis quanto na indústria, direcionando fluidos para partes distintas de um circuito, controlando a pressão e o escoamento. De Negri [3] descreve o comportamento dinâmico dessa válvula, resultando na seguinte função de transferência:

$$H(s) = \frac{Xa(s)}{Vea(s)} = \frac{Keqo \cdot Ap}{C_1 s^3 + C_2 s^2 + C_3 s} \quad (8)$$

sendo  $C_1 = (Ma \cdot Vt / 4\beta e)$ ;  $C_2 = (Ma \cdot Kco + B \cdot Vt / 4\beta e)$  e  $C_3 = (B \cdot Kco + Ap^2)$ ;  $Ap$  = área da coroa do pistão que desloca dentro do cilindro [m<sup>2</sup>],  $B$  = coeficiente de atrito viscoso [N·s/m],  $Kco$  = coeficiente de variação da vazão quando se varia a pressão próxima do ponto de operação [(m<sup>3</sup>/s)/Pa],  $Keqo$  = coeficiente de variação da vazão obtido experimentalmente [(m<sup>3</sup>/s)/V],  $\beta e$  = módulo de elasticidade efetivo [Pa] e  $Vt$  = volume total de óleo contido em ambas as linhas [m<sup>3</sup>] e  $Ma$  = a massa de carga.

O diagrama de blocos da figura 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  $Ka$  do erro  $Ve$  e, em paralelo com um sinal de realimentação  $Kd$ , da tensão de saída  $Xa$ .

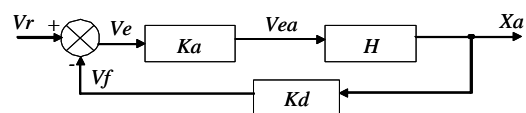


Figura 4 – Diagrama do mecanismo completo.

Sendo  $Vr$  = tensão de referência,  $Ve$  = tensão erro

( $V_e = V_r - V_f$ ),  $K_a$  = constante de amplificação,  $V_{ea}$  = tensão erro ampliada,  $H$  = função de transferência da válvula,  $X_a$  = deslocamento da carga,  $K_d$  = constante de realimentação e  $V_f$  = tensão de realimentação ( $V_f = K_d \cdot X_a$ ).

Com o auxílio da equação (8) pode-se, obter a função de transferência em malha fechada do diagrama da figura 4, ou seja:

$$G(s) = \frac{X_a(s)}{V_r(s)} = \frac{K_a \cdot A_p \cdot K_{eqo}}{A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4} \quad (9)$$

sendo  $A_1 = (Ma \cdot Vt/4\beta e)$ ;

$A_2 = (Ma \cdot Kco + B \cdot Vt/4\beta e)$ ;  $A_3 = (B \cdot Kco + Ap^2)$  e  $A_4 = (Kd \cdot Ka \cdot Ap \cdot Keqo)$ .

As constantes  $Kco$  e  $Keqo$  podem ser obtidas experimentalmente e  $Kd$ , sinal do sensor de posição, é obtido do catálogo do fabricante. Assim, variando a constante  $Ka$  na equação (9) é possível obter as respostas do sistema e analisar a sua estabilidade. Quanto maior for o valor desta variável, mais rapidamente a válvula será aberta. O aumento do valor de  $Ka$  é limitado, pois, para um valor muito alto, 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 à baixa sensibilidade a essas variações. A sensibilidade será tanto mais baixa quanto maiores forem os ganhos [3]. O acoplamento de um controlador PID (controlador proporcional, integral e derivativo) a essa válvula, melhora o seu desempenho impondo maior rapidez de fechamento, ou abertura, com estabilidade. Assim, no diagrama de blocos da figura 4, a caixa correspondente ao ganho  $Ka$  é substituída pela função de transferência do controlador PID,

$$C_{PID}(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{\tau_i(s)} + \tau_d(s) \right) \quad (10)$$

sendo  $Kp$  = ganho proporcional ajustável,  $\tau_i$  = tempo integral,  $\tau_d$  = tempo derivativo.

A função de transferência do sistema após o acoplamento do PID em malha aberta é dada por

$$G_{PID}(s) = \frac{Kp \cdot Ap \cdot Keqo \cdot (\tau_d \cdot s^2 + s + 1/\tau_i)}{B_1 s^4 + B_2 s^3 + B_3 s^2 + B_4 s} \quad (11)$$

sendo  $B_1 = (Ma \cdot Vt/4\beta e)$ ;

$B_2 = (Ma \cdot Kco + B \cdot Vt/4\beta e)$ ;

$B_3 = (B \cdot Kco + Ap^2 + Kd \cdot Kp \cdot Ap \cdot Keqo \cdot \tau_i \cdot \tau_d)$

e  $B_4 = (Kd \cdot Kp \cdot Ap \cdot Keqo)$ .

Existem algumas dificuldades nos ajustes dos ganhos do controlador PID para que este possa apresentar um bom desempenho. A regra de sintonia de Zeigler e Nichols para controlador PID, baseada no ganho crítico  $Kc$  e no período crítico  $\tau_c$  [5], foi utilizada para o ajuste desses ganhos, ou seja,  $Kp = 0,6 \cdot Kc$ ,  $\tau_i = 0,5 \cdot \tau_c$  e  $\tau_d = 0,25 \cdot \tau_c$ .

Válvulas Acopladas ao Sistema de Distribuição de Gás

Para a consecução do objetivo considerou-se a instalação de uma válvula proporcional eletro-hidráulica em cada um dos pontos de nós da rede de gás. A válvula acoplada a um controlador PID, cuja função de transferência está descrita na equação (9), passa a funcionar em tempo real e é conectada a uma central de controle automático gerenciada por um software algébrico computacional que é responsável pelo seu fechamento e/ou abertura.

## 5 Implementação Numérica

A implementação numérica consta de uma rede de distribuição de gás de dezenove dutos, doze nós de saída (pontos de demanda de gás natural) e um nó de entrega, figura 3. Nessa rede, o valor da pressão de entrada é de 40 bar para manter constantes as pressões nos pontos de entrega de gás para o consumo.

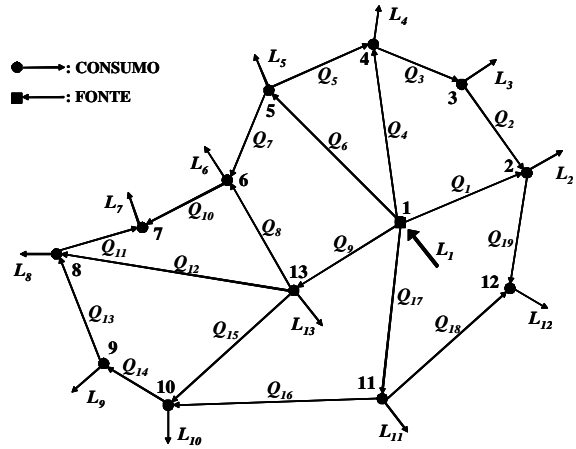


Figura 5 – Rede de distribuição de gás.

Os dados da rede estão representados nos quadros 1 e 2. No quadro 1, tem-se os dados das demandas de gás para cada nó e no quadro 2, os parâmetros dos dutos. Aplicando o Método Nodal de Newton na rede sem vazamento, portanto, sem nenhum isolamento, obtivemos os resultados que estão descritos no quadro 3. Os escoamentos negativos indicam que os sentidos convencionados na figura 5 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, ou seja, a primeira fase do sistema. As leituras obtidas pelos medidores de escoamento 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  $Q_s = 2.809,08 \text{ [m}^3/\text{h]}$ . Uma vez que o escoamento em qualquer parte do duto é o mesmo, o escoamento na entrada deveria ser igual ao escoamento de saída deste duto. O vazamento está proporcionando uma perda de 1,5% do escoamento de entrada do duto. A constatação dessa diferença pelo

software dispara um alarme de detecção do vazamento, acionando, com isso, a segunda fase do sistema.

Através da RNA, a localização do ponto do vazamento no duto 12 foi de 30.878 metros do nó de entrada do duto. Depois de saber a localização do vazamento, 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 no quadro 4, que serviram para prosseguir com a monitoração dessa rede até que o duto 12 seja liberado novamente.

## 6 Conclusão

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema dinâmico capaz de identificar vazamentos em redes de distribuição de gás natural, localizá-los utilizando redes neurais artificiais e, por meio de um sistema de controle automático, isolar o ramo identificado na rede. Válvulas proporcionais eletro-hidráulicas munidas de controladores PID foram instaladas em cada um dos pontos de entrada e saída de gás da rede, bem como medidores de escoamento, temperatura e pressão, de forma a funcionar em tempo real e conectados a uma central de controle automática gerenciada por um software algébrico computacional. Utilizando a função de transferência do sistema,

simulações de vazamento de gás foram realizadas em determinados ramos da rede. Para cada uma das simulações, o sistema de controle da rede entrou em ação, com a detecção e localização do ponto de vazamento, e o posterior isolamento do ramo afetado. Os resultados da simulação podem ser considerados bons, visto que a operação de detecção, localização e isolamento do ramo da rede com vazamento foi realizada com sucesso, com apenas 1,97% de erro na localização do ponto.

## Referências

- [1] Azevedo, F.M. de et al. Redes neurais com aplicações em controle e em sistemas especialistas. Florianópolis: Bookstore, 2000.
- [2] Boylestad, R.L. Introdução à análise de circuitos. Trad. J. A. Souza. 8 ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1998, 785 p.
- [3] De Negri, V.J. Controle de posição utilizando servoválvulas e válvulas proporcionais eletro-hidráulicas, Revista ABHP, São Paulo, n 106, p. 15-18, 1997.
- [4] Haykin, S. Redes Neurais - Princípios e Prática, 2ed, Bookman, 2000.
- [5] Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. Trad. Bernardo Severo. 3 ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1997, 813 p.
- [6] Osiadacz, A.J. Simulation and analysis of gas networks, E & F.N.Spon, London, 1987, 273 p.

Quadro 1 – Dados dos nós

Nó (k)	Saída (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	-

Quadro 2 – Dados dos dutos

Duto (k)	Nó (Rem.)	Nó (Rec.)	Diâm. (m)	Comp. (m)
1	1	2	0,7	50000
2	3	2	0,6	40000
3	4	3	0,7	35000
4	1	4	0,7	66000
5	5	4	0,6	40000
6	1	5	0,7	68000
7	5	6	0,7	35000
8	13	6	0,6	47000
9	1	13	0,6	45000
10	6	7	0,6	35000
11	8	7	0,6	32000
12	13	8	0,7	90000
13	9	8	0,7	45000
14	10	9	0,6	28000
15	13	10	0,7	65000
16	11	10	0,6	82000
17	1	11	0,6	65000
18	11	12	0,6	63000
19	2	12	0,7	43000

Quadro 3 – Resultados Obtidos

Duto (k)	Q (m <sup>3</sup> /h)
1	14.201,34
2	-2.668,85
3	531,14
4	12.726,64
5	-195,29
6	12.540,02
7	9.935,51
8	-2.143,05
9	12.258,05
10	3.592,46
11	-1.792,46
12	2.851,86
13	-1.144,32
14	1.755,68
15	3.049,24
16	4.206,43
17	9.273,95
18	967,51
19	7.032,49

Quadro 4 – Resultado após isolamento duto 12.

Duto (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Q (m <sup>3</sup> /h)	14.248,07	-2.601,96	598,03	12.746,47	-148,07	12.558,73	9.907,17	-1.009,85	12.110,09	4.697,32	-2.897,32	0,00	602,67	3.502,67	4.619,93	4.382,74	9.336,63	853,90	7.146,10