

## A CONFIABILIDADE NO PROJETO DE ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO E REDUÇÃO DE PRESSÃO PARA GÁS NATURAL

Julio César de Almeida<sup>1,2</sup>; Guilherme de Camargo Macieski<sup>3</sup>, Eduardo Panek<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Companhia Paranaense de Gás – COMPAGAS, Gerência de Operações – [j.cezar@compagas.com.br](mailto:j.cezar@compagas.com.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná - UFPR, Departamento de Engenharia Mecânica – [j.cezar@ufpr.br](mailto:j.cezar@ufpr.br)

<sup>3</sup> Companhia Paranaense de Gás – COMPAGAS, Gerência de Engenharia – [guilherme.macieski@compagas.com.br](mailto:guilherme.macieski@compagas.com.br)

<sup>4</sup> Companhia Paranaense de Gás – COMPAGAS, Gerência de Operações – [eduardo.panek@compagas.com.br](mailto:eduardo.panek@compagas.com.br)

### RESUMO

O presente artigo discute a aplicação dos conceitos da confiabilidade no processo de projeto de estações de redução e medição de pressão de gás natural, as quais são convencionalmente utilizadas em redes de distribuição de gás natural canalizado. Estudos desta natureza necessitam do histórico de falhas dos componentes e acessórios envolvidos, motivo pelo qual o referido trabalho é ancorado em parâmetros e dados operacionais da COMPAGAS – empresa responsável pela distribuição de gás natural no Estado do Paraná e que contempla, na atualidade, uma malha aproximada de 700 km de extensão. Considerando a proposição de taxas de falhas constantes, ou mais especificamente o uso da distribuição exponencial, se faz uma análise da confiabilidade estimada das referidas estações, objetivando fornecer ao leitor uma visão geral no contexto do projeto e até mesmo da manutenção desses dispositivos.

Palavras-chave: confiabilidade, redes de distribuição de gás natural, COMPAGAS.

### 1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste artigo é enfatizar a aplicação dos conceitos da confiabilidade no processo de projeto de estações de medição e redução de pressão (EMRPs) e de estações de redução de pressão (ERPs), ambas convencionalmente utilizadas em redes de distribuição de gás natural. Tais sistemas, num contexto geral, correspondem a um conjunto de equipamentos e dispositivos montados numa ordem seqüencial, com o objetivo principal de exercer funções de controle e proteção do sistema de distribuição mediante uma redução adequada aos níveis de pressão desejados. No caso das EMRPs, pode-se destacar a presença adicional de um

sistema de medição do gás, cujo objetivo é computar o consumo volumétrico de gás para um determinado consumidor final. Com isso e como as malhas de distribuição são normalmente dispostas ao longo de rodovias, avenidas e ruas de uma determinada região ou localidade, pode-se afirmar que as ERPs são alocadas em locais onde se deseja a redução localizada da pressão de determinado trecho da malha em análise, enquanto que as EMRPs são alocadas junto à entrada dos consumidores finais, visando com isso não apenas a redução de pressão do sistema para níveis de pressão adequados, como também a medição final do gás consumido. Essas



condições podem ser observadas esquematicamente através da figura 01.

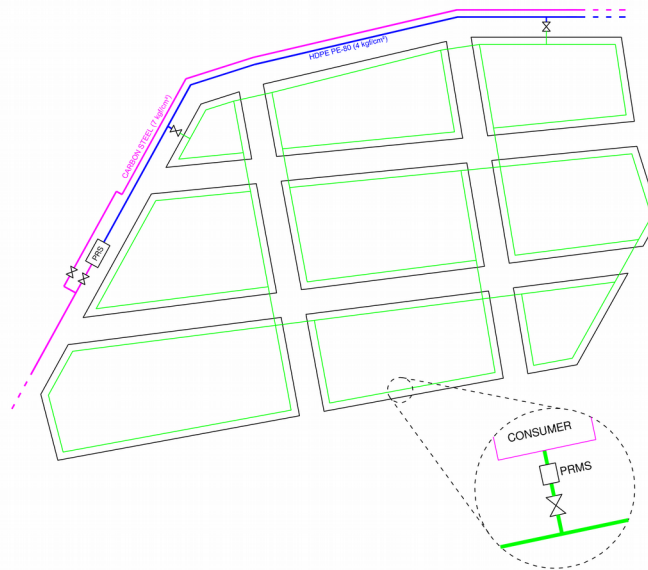


Figura 01 – Posição esquemática de ERPs e EMRPs em relação a uma malha de distribuição de gás natural

Visando validar a referida proposta utilizam-se dados operacionais e histórico de falhas da rede de distribuição da COMPAGAS, empresa responsável pela distribuição de gás natural no Estado do Paraná, sul do Brasil. A COMPAGAS detém, atualmente, uma rede de distribuição da ordem de 700 km de extensão, operando em pressões nominais de 35, 17, 7 e 4 bar, e atendendo a clientes dos segmentos industrial, comercial, residencial, automotivo e de matéria-prima.

## 2. CONCEPÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO E REDUÇÃO DE PRESSÃO

Uma EMRP corresponde a um conjunto de acessórios e componentes de

tubulação projetados e fabricados de acordo com padrões e especificações ditados em normas correlatas sobre o assunto. A figura 2 apresenta o fluxograma de uma EMRP típica, com dois tramos, utilizada nas malhas de distribuição da COMPAGAS. Uma estação deste tipo pode, em virtude do espaço considerado e da vazão máxima envolvida, apresentar variações quanto a sua disposição física e/ou tamanho, mas não necessariamente, em relação a sua configuração em geral.

Notar que para o caso de uma ERP, valem os mesmos componentes e acessórios, exceto pela eliminação do medidor de vazão e da placa limitadora de vazão.

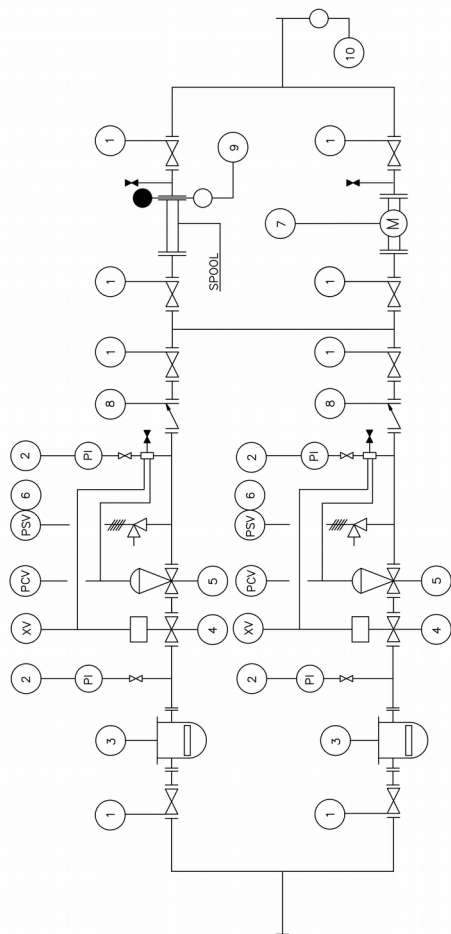


Figura 2 – Fluxograma típico de uma EMRP padrão COMPAGAS

- 01 - válvula de bloqueio manual;
- 02 - indicador de pressão (PI);
- 03 - filtro de linha tipo cesto;
- 04 - válvula de bloqueio automático (XV);
- 05 - válvula reguladora de pressão (PCV);
- 06 - válvula de alívio de pressão (PSV);
- 07 - medidor de vazão com equipamento corretor de vazão;
- 08 - válvula de retenção;
- 09 - figura oito; e
- 10 - placa limitadora de vazão.

### 3. O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA COMPAGAS

Um sistema de distribuição de gás natural canalizado normalmente é composto por trechos de tubulações e demais acessórios que recebendo o gás dos gasodutos de transmissão através dos pontos de entrega, permitem a sua distribuição até os consumidores finais. Para o caso específico da COMPAGAS, a qual não difere de forma significativa das demais empresas distribuidoras de gás do Brasil, tem-se as linhas principais ou linhas de alta pressão que operam a 35 bar e/ou 17 bar; as linhas laterais ou linhas de média e baixa pressão que operam a 7 bar e 4 bar, respectivamente; e as linhas de distribuição final, as quais também operam em pressões de 4 bar, mas apresentam uma configuração diferenciada em decorrência dos menores diâmetros de tubulações envolvidos para fornecimento aos consumidores. A figura 3 tem por objetivo idealizar essa concepção.

Ao longo dessas malhas, existem ainda diversos acessórios e componentes adicionais com objetivos bem definidos, entre as quais se podem destacar as válvulas de bloqueio de ramais e de clientes, os sistemas de aterramento e de proteção catódica, o sistema de odorização da malha, além evidentemente, das ERPs e EMRPs, objeto principal do presente estudo.

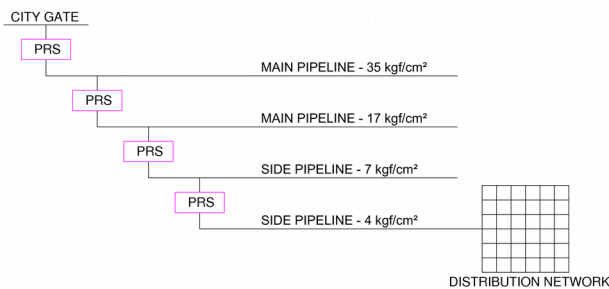


Figura 3 – Esquema do sistema de distribuição de gás natural canalizado da COMPAGAS

#### 4. ANÁLISE DE FALHAS

Falha é um conceito fundamental quando se trabalha com confiabilidade. Segundo Sivini [2006], falha é a diminuição total ou parcial da capacidade de desempenho de um sistema. Pode também ser definida como o término da capacidade de um item desempenhar uma função requerida.

Para o caso das estações do tipo ERP ou EMRP se faz uma análise qualitativa dos principais tipos de falhas que possam vir a ocorrer em cada um dos acessórios ou componentes presentes nessas estações. Esse levantamento é decorrente do histórico das falhas (banco de dados) ocorridas ao longo dos últimos dez anos em equipamentos desta natureza na malha de distribuição da COMPAGAS. A tabela 1 apresenta esses resultados.

#### 5. METODOLOGIA – A MATRIZ GRAU DE CRITICIDADE

Nem todo dispositivo formado por um conjunto de componentes apresenta um mesmo nível de criticidade, dado que determinado item pode apresentar diversas funções requeridas, as quais não apresentam evidentemente a mesma importância para o conjunto global. Determinados itens podem ser classificados como críticos, enquanto que outros como redundantes ou ocasionais. Nesse contexto, sugere-se a utilização de uma ferramenta complementar, designada como matriz de criticidade, a partir da qual é possível atribuir-se valores ( $C_{rit}$ ) para cada tipo de falha passível de ocorrência. Tais valores foram atribuídos de forma adaptada, a partir das propostas de Akao [1996] na forma:

$$C_{rit} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \quad (01)$$

onde os termos  $F_1$  à  $F_4$  correspondem aos parâmetros de influência considerados.

Conjuntamente à tabela 1, identificam-se os graus de criticidade calculados a partir da equação (01) para cada tipo de falha vinculada aos principais componentes da estação. Destaca-se ainda que a valoração atribuída para as falhas também decorre da experiência adquirida ao longo dos últimos



anos de operação e manutenção da rede de distribuição da COMPAGAS.

F <sub>1</sub> – influência provocada pela falha, sendo:	
5,0	Falha com perda total
3,0	Falha com perda considerável
1,0	Falha com perda de função
F <sub>2</sub> – abrangência da influência exercida sobre o sistema, sendo:	
2,0	Duas ou mais influências graves
1,5	Uma influência grave
1,0	Influência não muito grave
F <sub>3</sub> – frequência (estimada) da ocorrência da falha, sendo:	
2,0	Alta possibilidade de ocorrência
1,5	Possibilidade normal de ocorrência
1,0	Pequena possibilidade de ocorrência
F <sub>4</sub> – dificuldade na prevenção da falha, sendo:	
2,5	Prevenção pouco provável
1,5	Prevenção possível
1,0	Fácil prevenção

Como referência, considerou-se ainda a seguinte escala para valoração da criticidade:

$C_{rit} > 12$  – criticidade acentuada;

$12 \leq C_{rit} < 8,0$  – criticidade moderada;

$8,0 \leq C_{rit} < 3,5$  – criticidade normal; e

$C_{rit} \leq 3,5$  – criticidade aceitável

## 6. CONFIABILIDADE

O contexto da confiabilidade está diretamente associado a uma constante procura pela redução da probabilidade de falhas com uma correspondente diminuição de custos. Segundo a ABNT NBR 5462 [1994], a confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar de forma adequada o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições predeterminadas.

Em decorrência da natureza probabilística do problema, uma determinada distribuição de probabilidade deve ser selecionada para cada estudo de caso em específico. Sistemas mecânicos em geral são, entretanto, melhor representados no estudo da confiabilidade mediante o uso da distribuição de *Weibull* ou da distribuição exponencial, sendo essa última a mais simplificada em decorrência de considerar uma taxa de falhas ( $\lambda$ ) constante para os elementos envolvidos. Tal proposição, por facilitar em muito o equacionamento matemático do problema, é utilizada como referência no presente trabalho.

**Tabela 1 – Tipos de falhas dos principais componentes de EMRPs e ERPs**

Item	Tipo de falha	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	C <sub>crit</sub>
Válvula de bloqueio	Haste emperrada	1,0	2,0	1,5	1,0	<b>3,0</b>
	Não fechamento integral da esfera	1,0	1,0	1,0	1,5	<b>1,5</b>
	Passagem de gás após fechamento da válvula	3,0	1,5	1,0	1,0	<b>4,5</b>
	Não abrir após o fechamento	1,0	1,5	1,5	1,5	<b>3,38</b>
	Vazamento pela haste	1,0	2,0	1,5	1,0	<b>3,0</b>
	Vazamento pela gaxeta	1,0	2,0	1,5	1,0	<b>3,0</b>
Filtro tipo cesto	Entupimento	3,0	2,0	2,0	1,0	<b>12,0</b>
	Rompimento da malha do elemento filtrante	3,0	2,0	2,0	1,0	<b>12,0</b>
	Vazamento entre a tampa e o corpo do filtro	1,0	1,0	1,5	1,0	<b>1,5</b>
Válvula de alívio de pressão (PSV)	Abertura sem variação de pressão na linha	1,0	2,0	2,0	1,5	<b>6,0</b>
	Passagem de gás pelo respiro da tampa	1,0	1,5	1,5	1,0	<b>2,25</b>
	Passagem direta do gás	1,0	2,0	1,5	1,5	<b>4,5</b>
	Descalibração na pressão de ajuste (mola/piloto)	3,0	2,0	1,0	2,5	<b>15,0</b>
Válvula de bloqueio automático (XV)	Fechamento fora do “set” de regulagem	3,0	2,0	1,5	2,5	<b>22,5</b>
	Não funcionamento com a variação de pressão	5,0	1,5	1,5	1,5	<b>16,88</b>
	Fechamento inadequado	1,0	1,5	2,0	1,5	<b>4,5</b>
	Passagem do gás após acionamento da XV	1,0	1,0	2,0	1,5	<b>3,0</b>
	Passagem de gás pelo respiro da tampa	1,0	1,0	1,0	1,0	<b>1,0</b>
	Descalibração na pressão de ajuste (mola/piloto)	3,0	2,0	1,0	2,5	<b>15,0</b>
Válvula reguladora de pressão (PCV)	Descalibração no piloto	3,0	1,5	1,5	1,5	<b>10,13</b>
	Vazão insuficiente na entrada do piloto	1,0	1,0	1,0	1,5	<b>1,5</b>
	Aumento de pressão à jusante da PCV	3,0	1,5	2,0	1,5	<b>13,5</b>
	Fechamento da válvula	5,0	2,0	1,5	1,5	<b>22,5</b>



Medidor com eletro- corretor	Travamento do “index”	3,0	1,5	1,0	2,5	<b>11,25</b>
	Transmissão magnética travada	3,0	1,5	1,5	1,5	<b>10,13</b>
	Travamento do medidor	5,0	2,0	1,5	1,5	<b>22,5</b>
	Danos mecânicos	1,0	1,0	1,0	1,5	<b>1,5</b>
	Falta de precisão nas medições	3,0	1,5	1,5	1,5	<b>10,13</b>
	Erros de medição	3,0	1,5	1,0	1,5	<b>6,75</b>

Sua função confiabilidade  $R(t)$  corresponde à relação:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (02)$$

### 6.1. Sistemas série-paralelo

Segundo Fogliatto [2009], sistema é todo conjunto de componentes interconectados segundo uma concepção predeterminada, de forma a realizar um conjunto de funções de forma confiável. Nesse contexto, a definição de quais componentes do sistema devem fazer parte do estudo a ser realizado torna-se fator fundamental para a obtenção de resultados satisfatórios em termos de confiabilidade. Evidentemente também que o nível de detalhe de representação do sistema depende das informações disponíveis em relação às taxas de falhas dos componentes individuais, o que também pode servir de base para justificar um banco de dados correspondente.

As representações utilizadas no presente trabalho contemplam situações nas

quais os sistemas estão combinados em série ou em paralelo, caracterizando com isso os chamados sistemas mistos ou sistemas em série-paralelo. Um sistema em série com “n” componentes apresenta uma conexão de forma que a falha de qualquer componente individual resulte na falha de todo o sistema. Matematicamente, tem-se:

$$R(t) = (e^{-\lambda_1 t}) \cdot (e^{-\lambda_2 t}) \cdot \dots \cdot (e^{-\lambda_n t}). \quad (03)$$

Para um sistema em paralelo, com “n” componentes, todos os componentes devem falhar para que o sistema falhe, favorecendo a confiabilidade final do sistema. Assim:

$$R(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t}) \cdot \dots \cdot (1 - e^{-\lambda_n t}). \quad (04)$$

### 7. MODELO MATEMÁTICO - EMRPs

A partir das estações padronizadas da COMPAGAS, efetivou-se uma análise detalhada das mesmas visando à obtenção de diagramas de blocos e seus correspondentes modelos matemáticos. Numa primeira análise, se considerou apenas os componentes

e acessórios que obtiveram graus de criticidade moderado ou crítico ( $C_{crit} > 8,0$ ), dado que as demais situações apresentam uma influência supostamente pequena para o sistema, mesmo no caso de eventuais falhas.

O diagrama de blocos da figura 4 ilustra o modelo desenvolvido para o caso de uma estação tipo EMRP, tomando por referência os componentes anteriormente descritos e na proposta de criticidade tomada por referência.

Sendo:

- 3 - filtro de linha tipo cesto;
- 4 - válvula de bloqueio automático (XV);
- 5 - válvula reguladora de pressão (PCV);
- 6 - válvula de alívio de pressão (PSV);
- 7 - medidor de vazão com equipamento corretor de vazão.

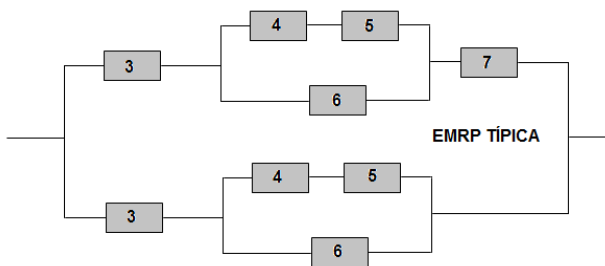


Figura 4 – Diagrama de blocos para uma EMRP típica – Padrão COMPAGAS

Matematicamente, chega-se a:

$$R_{EMRP} = 1 - (1 - R_{T1})(1 - R_{T2}) \quad (05)$$

$$\text{com: } R_{T1} = R_3(R_{456})R_7$$

$$R_{T2} = R_3(R_{456})$$

$$R_{456} = 1 - (1 - R_4R_5)(1 - R_6)$$

De forma similar, o diagrama de blocos correspondente a uma ERP pode ser criado a partir da simples eliminação do medidor de vazão com equipamento de eletro-correção.

## 8. TAXAS DE FALHAS DE COMPONENTES

Para qualquer que seja a distribuição considerada no estudo, e apesar da distribuição exponencial ser relativamente simples, torna-se imprescindível o conhecimento das taxas de falhas individuais de todos os componentes contemplados no sistema. Tais valores podem ser obtidos a partir de ensaios, bancos de dados, históricos de falhas e/ou outras situações similares, não sendo, porém, tão simples de serem obtidos para dispositivos e componentes mecânicos, dado a natureza e complexidade das variáveis envolvidas, tais como: sobrecargas, temperatura, acabamentos superficiais, processos de fabricação, montagem, etc.

Em havendo, porém, um razoável período de tempo para os registros e acompanhamentos das falhas ocorridas nos componentes (banco de dados), é possível



considerar que exista credibilidade aceitável quanto ao uso desses dados para identificação das taxas de falhas correspondentes. Nessas circunstâncias, a malha de distribuição da COMPAGAS por contemplar trechos de tubulações com mais de quinze anos de operação, tornou-se fonte adequada para o levantamento dos dados necessários para o prosseguimento do presente estudo.

Esses valores são destacados, na forma de taxa de falhas (consideradas supostamente constantes), na tabela 3.

**Tabela 3** – Taxas de falhas aproximadas - componentes e acessórios das EMRPs - padrão COMPAGAS

Componente ou Acessório	$(\lambda) \times 10^{-4}/h$
Filtro de linha	0,7716
Válvula de bloqueio automática	0,2120
Válvula reguladora de pressão	0,1450
Válvula de alívio de pressão	0,2320
Medidor (turbina ou rotativo)	0,1120

### 8.1. Confiabilidade estimada das EMRPs - padrão COMPAGAS

De posse dos diagramas de blocos correspondentes às estações padrão COMPAGAS, como também das respectivas taxas de falhas apresentadas na tabela 3 torna-se possível efetivar estimativas acerca da confiabilidade esperada para cada tipo de equipamento em específico.

A figura 6 ilustra, por exemplo, um gráfico da confiabilidade estimada para as EMRPs padrão COMPAGAS considerando o período de um ano de operação contínua. Evidente que a partir desse tipo de análise torna-se possível efetivar estudos para a melhoria dos respectivos sistemas, como também, para previsões e programações de períodos de manutenção adequados para o equipamento em análise ou estudo.

O uso de uma EMRP com tramo único, por exemplo, fornece resultados bem menos significativos no contexto da confiabilidade estimada. Supondo a condição de 5000h de funcionamento, por exemplo, se obtém patamares na ordem de 60% em termos de confiabilidade, contra uma expectativa de 87% para o caso da EMRP convencional com dois tramos.

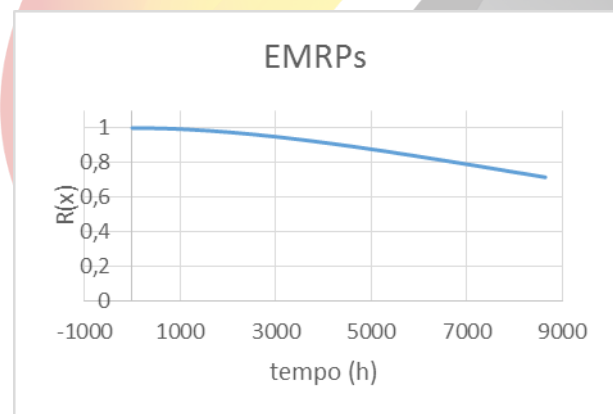


Figura 6 – Confiabilidade estimada para as EMRPs típicas da COMPAGAS

## 9. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que, mesmo de forma simplificada, os conceitos da confiabilidade podem fazer parte da grande maioria de projetos dos sistemas mecânicos em geral. Dificuldades inerentes ao tipo de distribuição (fdp) a ser considerada na análise, como também, acerca das taxas de falhas dos componentes envolvidos podem e devem, se for o caso, serem estimadas num primeiro momento, de tal forma que o profissional envolvido tenha subsídios para direcionar e melhorar seus estudos subsequentes. A prática do registro das falhas ocorridas no transcorrer de determinados períodos de operação desses componentes tornar-se-á valiosa com o passar do tempo, favorecendo em muito as decisões a serem tomadas futuramente. Especificamente para o caso da distribuição de gás natural canalizado no Brasil, os estudos desenvolvidos ainda não são significativos em decorrência não apenas das dimensões das malhas existentes, como também do número de profissionais técnicos voltados para esse mercado.

Com isso, o presente trabalho tem por objetivo não apenas apresentar como a referida metodologia pode ser utilizada no contexto da aplicação da confiabilidade no

estudo de estações de redução e medição de pressão, mas também despertar o interesse dos leitores quanto a aplicações desta natureza em sistemas equivalentes.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.
- ALMEIDA, J. C. **Uma metodologia de projeto baseada na confiabilidade – aplicação à redes de distribuição de gás canalizado**. 1999, 155p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis-SC.
- AKAO, Y. **Introdução ao desdobramento da qualidade**. Fundação Christiano Ottoni, 1996.
- FOGLIATTO, F. S., RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Campus-Elsevier, 2009.
- SIVINI, P. G. L. **Desenvolvimento de banco de dados de confiabilidade: uma aplicação em estações redutoras de pressão de gás natural**. 2006, 103p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Recife-PE.