

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCO DE DADOS DE  
CONFIABILIDADE: UMA APLICAÇÃO EM ESTAÇÕES  
REDUTORAS DE PRESSÃO DE GÁS NATURAL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE  
POR

**PAULO GUSTAVO LIMA SIVINI**  
Orientador: Enrique López Droguett, Ph.D.

RECIFE, Junho / 2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Sivini, Paulo Gustavo Lima**

**Desenvolvimento de banco de dados de confiabilidade : uma aplicação em estações redutoras de pressão de gás natural / Paulo Gustavo Lima Sivini. – Recife : O Autor, 2006.**

**xii, 103 folhas : il., fig., tab.**

**Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia de Produção, 2006.**

**Inclui bibliografia e anexos.**

**1. Engenharia de produção – Pesquisa operacional. 2. Banco de dados – Confiabilidade – Perspectiva histórica – Taxonomia – Inferência bayesiana. 3. Análise de falhas – FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). 4. Indústria de gás natural – Estações redutoras de pressão – Métricas de confiabilidade – Quantificação – Modos de falha - identificação. I. Título.**

**658.5  
658.51**

**CDU (2.ed.)  
CDD (22.ed.)**

**UFPE  
BC2006-395**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA**  
**DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE**  
**MESTRADO ACADÊMICO DE**

**PAULO GUSTAVO LIMA SIVINI**

**“DESENVOLVIMENTO DE BANCO DE DADOS DE CONFIABILIDADE: UMA APLICAÇÃO EM ESTAÇÕES REDUTORAS DE PRESSÃO DE GÁS NATURAL”.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL**

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato **PAULO GUSTAVO LIMA SIVINI APROVADO.**

Recife, 01 de junho de 2006.

---

Prof. ENRIQUE ANDRÉS LÓPEZ DROGUETT, PhD (UFPE)

---

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

---

Prof. CARLOS FRANCISCO SIMÕES GOMES, Doutor (CASNAV-RJ)

## **DEDICATÓRIA**

A minha esposa, Carolina, pelo amor, dedicação, apoio e sobretudo pela confiança e compreensão sempre presentes.

Aos meus pais, Eduardo e Carmen, pelo amor que me dedicam, pela confiança depositada em mim e principalmente pela ajuda a nunca desistir em face de pressões.

## AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, porque a Ele dedico minha vida e deposito a minha confiança e esperança.

A Carolina, pelo amor, força e paciência nos momentos mais difíceis.

A minha família, pelo amor, confiança e estímulo.

Ao Professor Enrique López Droguett, pela oportunidade de realizar este trabalho sob sua orientação.

A Sérgio, pelo companheirismo e grande ajuda prestada neste trabalho

Aos integrantes do RISCTEC, pelo apoio, incentivo e presteza dispensada.

Aos técnicos da COPERGÁS, pela orientação e apoio.

E a todos que fazem PPGEP/UFPE, pela colaboração e aporte necessário para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Bancos de Dados de Confiabilidade (BDC's) são projetados e desenvolvidos para medir e otimizar o desempenho de atividades de manutenção, aperfeiçoar projetos de equipamentos e fornecer informações preciosas para análises de risco e confiabilidade de sistemas nos quais esses equipamentos estão inseridos.

A fim de alcançar esses objetivos, BDC's devem ser construídos com dados oriundos do sistema de interesse, que reflitam as características funcionais e de projeto dos equipamentos, as condições ambientais e de operação, e as políticas de manutenção.

Diferentes segmentos da indústria têm desenvolvido BDC's genéricos, como é o caso do contexto de instalações de perfuração e exploração de petróleo. Embora fontes de dados genéricos sejam úteis, os benefícios reais são obtidos pela coleta, organização e análise de confiabilidade de dados próprios.

Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia genérica para o desenvolvimento de BDC's específicos a sistemas de interesse. Será dada ênfase à Taxonomia de BDC's e à Quantificação da métrica de confiabilidade a partir de inferência Bayesiana.

Neste trabalho também é feita uma aplicação da metodologia num segmento da indústria de gás, mais especificamente em estações de redução de pressão de gás natural (ERPGN).

Após a aplicação da metodologia, dados operacionais são coletados para obtenção das métricas de confiabilidade e os resultados expostos. Em seguida, conclusões são obtidas, bem como sugestões para trabalhos futuros visando o aprimoramento da metodologia para o desenvolvimento de BDC's.

*Palavras-chave: Banco de Dados de Confiabilidade, Inferência Bayesiana, Análise de Variabilidade Populacional, Distribuição de Gás Natural.*

## ABSTRACT

Reliability Data Banks (RDB's) are projected and developed to measure and to optimize the performance of activities of maintenance, to improve equipment designs and to supply precious information for analyses of risk and reliability of systems in which these equipments are inserted.

In order to reach these objectives RDB's must be developed with data deriving from the system of interest, that reflect the functional characteristics and the equipment design, environmental and operational conditions as well as maintenance politics.

Different areas of the industry have developed generic RDB's, as it is the case of the context of exploration and drilling of oil and gas. Although sources of generic data are useful, the real benefits are obtained by the collection, organization and analysis of reliability of system-specific data.

In this context, this work has as objective to present a generic methodology for the development of RDB's to meet system-specific needs. Emphasis is given to the taxonomy of RDB's and the quantification of reliability metrics under the Bayesian paradigm.

In this work an application of the methodology in the context of the gas industry is developed, more specifically in natural gas pressure reduction units. After the application of the methodology, operational data are collected and reliability metrics are estimated. Next, some concluding remarks are provided, as well as suggestions for future works aiming at the improvement of the methodology for the development of RDB's.

*Keywords: Reliability Data Banks, Bayesian Inference, Analysis of Population Variability, Natural Gas Distribution.*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DE BANCO DE DADOS DE CONFIABILIDADE .....	4
2.2 CONCEITOS BÁSICOS EM ANÁLISE DE FALHAS.....	9
2.2.1 <i>Introdução</i> .....	9
2.2.2 <i>Funções Requeridas</i> .....	10
2.2.3 <i>Classificação de Funções</i> .....	10
2.2.4 <i>Falhas e Modos de Falhas</i> .....	11
2.2.5 <i>Causas de Falhas</i> .....	15
2.2.6 <i>Efeitos de Falha e Severidade</i> .....	16
2.3 FMEA.....	19
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
3.1 DESENVOLVIMENTO DA TAXONOMIA DO BANCO DE DADOS DE CONFIABILIDADE .....	25
3.1.1 <i>Hierarquia de um Sistema</i> .....	25
3.1.2 <i>Estrutura do Banco de Dados</i> .....	27
3.1.3 <i>Organização e Descrição dos Dados</i> .....	29
3.1.3.1 <i>Informações sobre Equipamentos</i> .....	29
3.1.3.2 <i>Dados de Falha</i> .....	30
3.1.3.3 <i>Dados de Manutenção</i> .....	32
3.1.4 <i>Identificação e Classificação dos Modos de Falha</i> .....	33
3.2 QUANTIFICAÇÃO DE MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE .....	34
3.2.1 <i>Interpretação Subjetiva da Probabilidade</i> .....	35
3.2.2 <i>Teorema de Bayes</i> .....	35
3.2.3 <i>Tratamento de Dados</i> .....	37
3.2.3.1 <i>Pares Conjugados</i> .....	39
3.2.4 <i>Tratamento de Dados de Populações Homogêneas</i> .....	41

3.2.4.1	Atualizando Distribuições de Probabilidade.....	41
3.2.5	<i>Tratamento de Dados de Populações Não-Homogêneas</i> .....	44
3.2.5.1	Análise Bayesiana de Variabilidade Populacional .....	44
3.2.5.2	Mistura de Funções de Verossimilhanças.....	47
3.2.5.3	Modelo Lognormal-Poisson-Lognormal .....	49
3.2.5.4	Implementação do Procedimento.....	51
<b>4.</b>	<b>APLICAÇÃO EM ESTAÇÕES REDUTORAS DE PRESSÃO DE GÁS.....</b>	<b>54</b>
4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA .....	54
4.2	EQUIPAMENTOS E RESPECTIVOS MODOS DE FALHA.....	58
4.2.1	<i>Modos de Falha da PCV</i> .....	58
4.2.2	<i>Modos de Falha da ESDV</i> .....	59
4.2.3	<i>Modos de Falha da PSV</i> .....	60
4.2.4	<i>Modos de Falha da Válvula Esfera</i> .....	60
4.2.5	<i>Modos de Falha da Válvula de Retenção</i> .....	61
4.2.6	<i>Modos de Falha dos Filtros</i> .....	61
4.2.6	<i>Modos de Falha dos Medidores de Pressão</i> .....	62
4.3	DADOS COLETADOS .....	62
4.3.1	<i>Dados de Falha</i> .....	64
4.4	ESTIMAÇÃO DE MÉTRICA DE CONFIABILIDADE.....	67
4.4.1	<i>Modo de Falha Abrir Lentamente</i> .....	72
4.4.2	<i>Modo de Falha Abrir Parcialmente</i> .....	74
4.4.3	<i>Modo de Falha Fechar Parcialmente</i> .....	75
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
5.1	DESAFIOS FUTUROS .....	78
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>84</b>
	ANEXO 1 (FMEA - PCV) .....	84
	ANEXO 2 (FMEA - ESDV).....	95
	ANEXO 3 (FMEA - PSV) .....	99
	ANEXO 4 (FMEA - VÁLVULA ESFERA) .....	100
	ANEXO 5 (FMEA - VÁLVULA DE RETENÇÃO) .....	101
	ANEXO 6 (FMEA - FILTRO).....	102
	ANEXO 7 (FMEA - MANÔMETRO).....	103

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 OREDA.....	8
FIGURA 2.2 ILUSTRAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE FALHA, FALTA E ERRO .....	12
FIGURA 2.3 CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS.....	15
FIGURA 2.4 ANÁLISE DE FALHAS EM DISTINTOS NÍVEIS HIERÁRQUICOS.....	17
FIGURA 2.5 CLASSIFICAÇÃO DE MODOS DE FALHA (OREDA) .....	18
FIGURA 2.6 PLANILHA DE FMEA.....	20
FIGURA 3.1 HIERARQUIA DE EQUIPAMENTOS .....	26
FIGURA 3.2 HIERARQUIA DO SISTEMA .....	27
FIGURA 3.3 ESTRUTURA DO BANCO DE DADOS .....	28
FIGURA 4.1 ERPM TÍPICA .....	56
FIGURA 4.2 FLUXO DE ENGENHARIA DE UMA ERPM.....	57
FIGURA 4.3 PCV .....	59
FIGURA 4.4 ESDV .....	59
FIGURA 4.5 PSV .....	60
FIGURA 4.6 VÁLVULA ESFERA.....	60
FIGURA 4.7 VÁLVULA DE RETENÇÃO.....	61
FIGURA 4.8 FILTROS TIPO CESTA E Y .....	61
FIGURA 4.9 MANÔMETRO .....	62
FIGURA 4.10 PLANILHA DE COLETA DE DADOS DA PCV .....	64
FIGURA 4.11 DISTRIBUIÇÃO <i>A POSTERIORI</i> CONJUGADA DOS PARÂMETROS DE VARIABILIDADE POPULACIONAL .....	70
FIGURA 4.12 DENSIDADE DE VARIABILIDADE POPULACIONAL PARAMÉTRICA .....	71
FIGURA 4.13 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE ACUMULADA DA TAXA DE FALHA.....	72
FIGURA 4.14 DISTRIBUIÇÃO <i>A POSTERIORI</i> CONJUGADA DOS PARÂMETROS DE VARIABILIDADE POPULACIONAL DO MODO DE FALHA ABRIR LENTAMENTE.....	72
FIGURA 4.15 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE ACUMULADA DA TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA ABRIR LENTAMENTE.....	73
FIGURA 4.16 DISTRIBUIÇÃO <i>A POSTERIORI</i> CONJUGADA DOS PARÂMETROS DE VARIABILIDADE POPULACIONAL DO MODO DE FALHA ABRIR PARCIALMENTE.....	74
FIGURA 4.17 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE ACUMULADA DA TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA ABRIR PARCIALMENTE .....	75

FIGURA 4.18 DISTRIBUIÇÃO <i>A POSTERIORI</i> CONJUGADA DOS PARÂMETROS DE VARIABILIDADE POPULACIONAL DO MODO DE FALHA FECHAR PARCIALMENTE.....	75
FIGURA 4.19 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE ACUMULADA DA TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA FECHAR PARCIALMENTE.....	76

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 EVOLUÇÃO DE BDC's.....	8
TABELA 2.2 MODOS DE FALHAS RELACIONADOS AOS VÁRIOS MODOS DE OPERAÇÃO DE UM PROCESSO DE FECHAMENTO DE VÁLVULA.....	13
TABELA 3.1 INFORMAÇÕES SOBRE EQUIPAMENTOS.....	30
TABELA 3.2 DADOS DE FALHA.....	31
TABELA 3.3 DADOS DE MANUTENÇÃO .....	33
TABELA 3.1 - MISTURA DE VEROSSIMILHANÇAS .....	49
TABELA 4.1 RESUMO DE DADOS COLETADOS DA ERPM - A.....	65
TABELA 4.2 RESUMO DE DADOS COLETADOS DA ERPM - B .....	66
TABELA 4.3 RESUMO DE DADOS COLETADOS DA ERPM - C .....	66
TABELA 4.4 DADOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DE MÉTRICA DE TAXA DE FALHA.....	68
TABELA 4.5 DADOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DE MÉTRICA DE TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA: FECHAR PARCIALMENTE .....	69
TABELA 4.6 DADOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DE MÉTRICA DE TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA: ABRIR PARCIALMENTE.....	69
TABELA 4.7 DADOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DE MÉTRICA DE TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA: ABRIR LENTAMENTE .....	69
TABELA 4.8 ESTATÍSTICAS DOS PERCENTIS E MEDIANA DA TAXA DE FALHA.....	71
TABELA 4.9 PERCENTIS E MEDIANA DA TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA ABRIR LENTAMENTE.....	73
TABELA 4.10 PERCENTIS E MEDIANA DA TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA ABRIR PARCIALMENTE.....	74
TABELA 4.11 PERCENTIS E MEDIANA DA TAXA DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA FECHAR PARCIALMENTE.....	76

## LISTA DE ACRÔNIMOS

BDC's- Bancos de Dados de Confiabilidade

ERPGN- Estação Redutora de Pressão de Gás Natural

ERP- Estação Redutora de Pressão

ERPM- Estação Redutora de Pressão e Medição

ESDV- *Emergency Shutdown Valve* (Válvula de Fechamento de Emergência)

FMEA- *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise de Modo de Falha e Efeitos)

HAZOP- *Hazard and Operability Study*

HH- Hora-Homem

OREDA- *Offshore Reliability Data*

PCV- *Pressure Control Valve* (Válvula de Controle de Pressão)

PSV- *Pressure Safety Valve* (Válvula de Segurança de Pressão)

RCM- *Reliability Centred Maintenance* ( Confiabilidade Centrada em Manutenção)

SIGMA- Sistema de Gerenciamento de Manutenção

## 1. INTRODUÇÃO

Em geral, um dos principais objetivos da implementação de um banco de dados de confiabilidade específico é contribuir para o aumento da segurança e redução de custos de projeto. Isto ainda se faz mais evidente na indústria de operação da exploração e produção de gás, devido ao alto custo do processo e o grande impacto relacionado à indisponibilidade e segurança ao ambiente e pessoas.

Diante deste contexto, um banco de dados de confiabilidade de alta qualidade deve ser estruturado de forma eficaz permitindo um melhor planejamento da manutenção através da obtenção de dados de operação dos equipamentos, aliado à utilização de técnicas de análise e quantificação apropriadas.

Os requisitos de análise de segurança e manutenção, disponibilidade e estudos de otimização de custos demandam acesso a dados de confiabilidade detalhados e de alta qualidade. Embora fontes de dados genéricos sejam úteis, os benefícios reais são obtidos pela coleta e análise de informações próprias. Relatórios de manutenção e inspeção, tempo de parada e etc., fornecem uma riqueza de informações úteis e relevantes à realidade operacional de uma organização.

A coleta, organização e análise de dados de confiabilidade em uma base de dados bem estruturada podem oferecer benefícios. Em toda análise qualitativa e quantitativa no gerenciamento de riscos, por exemplo, requer-se uma análise de falhas. Sendo a qualidade da análise dependente da qualidade das informações utilizadas no banco de dados. Por exemplo, a aplicação de uma AQR (Análise de Risco Quantitativa) para um sistema de distribuição de gás natural demanda um considerável esforço de coleta de dados de falha de equipamentos, uma vez que a qualidade da análise está diretamente ligada à qualidade destes dados. Também pode haver vantagens em coletar dados de qualidade em um formato padronizado desde que isto facilite a troca de informação sobre segurança, manutenção e disponibilidade entre organizações.

Em virtude desses benefícios, diversos setores industriais, como a indústria petrolífera, elétrica e automobilística têm optado por desenvolver e manter seus próprios bancos de dados de confiabilidade, pois reconhecem que dados de falha coletados para o próprio sistema têm grande validade.

Esses modernos BDC's devem ser projetados e desenvolvidos com a intenção de medir e otimizar o desempenho das atividades de manutenção, otimizar o desempenho dos

equipamentos e componentes, fornecendo estimativas de confiabilidade dos sistemas nos quais esses equipamentos e componentes operam.

## 1.1 Justificativa

Diferentes segmentos da indústria têm desenvolvido BDC's genéricos. É o caso do contexto de instalações de perfuração e exploração *offshore*<sup>1</sup> com os bancos de dados OREDA (2002) e WELLMASTER (1995). Porém esses tipos de bases de dados de métricas de confiabilidade não são consideradas ideais para aplicações além do seu escopo inicial. Dificuldades surgem na aplicação direta de dados oriundos de cenários "importados" provindo desses BDC's "genéricos" na medida em que dados de falha têm relação com as condições de projeto, de operação, ambientais, características funcionais dos equipamentos e regime de manutenção. A extrapolação desses dados para análises de confiabilidade e risco para cenários de operação em instalações específicas geram resultados que devem ser vistos com reserva e analisados caso a caso. Dessa maneira, é importante trabalhar com dados coletados em campo, que reflitam as práticas de projeto, operação e manutenção adotadas, e condições externas existentes. O resultado é uma considerável diminuição da faixa de incerteza associada às métricas de confiabilidade estimadas (taxa de falha, probabilidade de falha na demanda).

BDC's modernos devem fornecer, além de modos de falha, dados com relação às características do equipamento, condições operacionais e política de manutenção e reparo. Estas informações refletirão a cultura e prática da organização de que foi obtida.

Além disso, com a crescente necessidade de tomadas de decisão sob incerteza, particularmente em análises de risco e confiabilidade, BDC's devem também fornecer as faixas de incerteza para as estimativas de taxas de falha e probabilidades de falha fornecidas.

Portanto, é importante propor uma metodologia para o desenvolvimento de BDC's específicos a sistemas de interesse.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia para o desenvolvimento de banco de dados de confiabilidade, e em seguida, fazer uma aplicação dessa metodologia em estações de redução de pressão de gás natural (ERPGN).

---

<sup>1</sup> *Offshore* significa fora da terra, i.e., no mar

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica de banco de dados de confiabilidade;
- Desenvolvimento de Taxonomia do banco de dados para a coleta de informações de campo;
- Apresentação da Metodologia Bayesiana para quantificação de métricas de confiabilidade;
- Estudo e descrição do sistema a ser aplicado a metodologia;
- Construção de FMEA's (Failure Mode and Effect Analysis) de diversos equipamentos constituintes de estações redutoras de pressão de gás e planilhas para coleta de dados desses equipamentos;
- Obtenção de métricas de confiabilidade a partir dos dados de campo coletados;

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. Além da Introdução, constam a Fundamentação Teórica, Metodologia utilizada no trabalho, Aplicação da metodologia em estações redutoras de pressão de gás natural, Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

A Fundamentação Teórica é apresentada no Capítulo 2, onde consta uma revisão de BDC's sob uma perspectiva histórica, ilustrando a evolução dos mesmos em diversas áreas de aplicação. Além disso, apresenta os diversos conceitos básicos em análise de falhas e uma explanação sobre a importante técnica FMEA adotada na metodologia.

A Metodologia adotada está presente no Capítulo 3, onde é apresentado o desenvolvimento da taxonomia do banco de dados, descrevendo-se a sua estrutura, organização dos dados a serem coletados, hierarquização de equipamentos, inventários dos dados de falha, manutenção e informações sobre equipamentos. Em seguida, é discutido o processo de identificação dos modos de falha e suas causas através da aplicação da técnica de análise de modos de falha e efeitos (FMEA). Ainda neste capítulo, é exposta a metodologia para quantificação de métricas de confiabilidade, enfatizando a análise Bayesiana de variabilidade populacional para dados não homogêneos.

No Capítulo 4, é apresentada a Aplicação da metodologia em equipamentos de estações de redução de pressão de gás. A modelagem é desenvolvida para obtenção de métricas apenas para um equipamento, a válvula PCV, e os resultados discutidos.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos próximos parágrafos serão feitas abordagens dos temas teóricos, cujo conhecimento faz-se necessário para contextualizar o objetivo apresentado, bem como apresentar conceitos necessários à posterior metodologia proposta.

### 2.1 História e Evolução de Banco de Dados de Confiabilidade

Variadas técnicas e análises têm sido empregadas com o objetivo de estimar o risco de danos ao meio-ambiente, funcionários, comunidades vizinhas, equipamentos e também estimar a indisponibilidade da produção. Em todos os modelos desenvolvidos a partir da aplicação dessas técnicas objetiva-se a avaliação do risco de eventos indesejáveis levando-se em conta as interações entre equipamentos, sistemas e pessoas.

Em cenários onde a segurança (ao meio-ambiente, pessoas, produção) está ameaçada, é necessário estimar não só a probabilidade de ocorrência desse evento como também conhecer as suas conseqüências deletérias. Nesse contexto, várias técnicas de análise são comumente utilizadas como, por exemplo, HAZOP (Hazard and Operability Study), Árvores de Falha e FMEA (Failure Mode and Effect Analysis).

Nota-se que esses procedimentos de análise se fundamentam basicamente no processo de analisar a experiência operacional e assim aprimorar modelos e ferramentas. Dentro do contexto de confiabilidade, entretanto, no início da década de 70, é que grandes BDC's foram desenvolvidos e publicados para usos em áreas como produção de petróleo, gás e geração de energia elétrica em usinas nucleares. A história desse desenvolvimento, entretanto, inicia-se um pouco antes. A discussão que segue é baseada na perspectiva histórica do desenvolvimento de BDC's.

Fontes de taxas de falha de componentes têm sido publicadas desde a década de 50, quando organizações industriais como Radio Corporation of América (RCA), General Electric (GE) e Motorola publicaram manuais (*handbooks*) contendo taxas de falha de componentes estimadas a partir de dados de teste e dados de campo.

Entretanto, a primeira publicação, segundo Fragola (1996), com dados de confiabilidade amplamente difundida parece ter sido o Titan Handbook (MARTIN, 1959). Este *handbook*, oficialmente denominado "Procedure and Data for Estimating Reliability and Maintainability" foi publicado em 9 de Julho de 1959 contendo taxas de falha genéricas para componentes elétricos, eletrônicos e eletromecânicos. Apesar dessa fonte manter a distinção entre tipos de componentes e as suas respectivas taxas de falha, nenhuma informação é fornecida com

relação a: população de componentes incluídas na amostra de testes, o número observado de falhas, o tempo total observado para a população e taxas de falhas para distintos modos de falha. Não houve também o desenvolvimento de categorização de sistemas, subsistemas e componentes, ou seja, sistemas como turbinas são listados ao lado de componentes simples, mesmo que esses sistemas tenham vários desses componentes. Da mesma forma, não foram fornecidas estimativas para intervalos de confiança ou faixas de incerteza para as taxas de falhas estimadas. O Titan Handbook foi também o primeiro a introduzir o uso de fatores de ajuste para a taxa de falha ou os “K-factors”, posteriormente empregados amplamente pelo Mil-Handbook-217 (MIL-HDBK-217E, 1982). Esses fatores deveriam ser multiplicados pelo valor fornecido da taxa de falha genérica de um dado componente com o intuito de se ajustar em relação à presença de redundância (fator  $K_r$ ) e para levar em conta o modo operacional (fator  $K_o$ ).

A segunda geração de BDC’s baseou-se no Titan Handbook e surgiu primariamente em decorrência da demanda de vários serviços militares dos EUA por melhores fontes de métricas de confiabilidade para aeronaves militares, mísseis e veículos de lançamento. Assim, no início dos anos 60 foram publicados diversos manuais de confiabilidade, dentre os quais, de acordo com Fragola (1996), destacam-se:

- MIL-Handbook-217;
- Failure Rate Data Bank (FARADA);
- RADC Non-Electronic Reliability Notebook.

A primeira revisão do MIL-Handbook-217 foi publicada em 1962, e empregava um modelo exponencial de taxa de falha constante e a utilização de K-factors (que depois seriam denominados de  $\pi$ -factors) para modificar a taxa de falha base (genérica). Os componentes foram agrupados em categorias com informações sobre componentes derivadas através do uso de fatores de correção. A variabilidade das métricas fornecidas foram mascaradas dentro dos  $\pi$ -factors e as taxas de falha foram interpretadas como representativas de um equipamento específico ao invés de métricas genéricas resultantes de uma variedade de tipos de equipamentos.

O banco de dados FARADA (GIDEP, 1960) originou-se a partir de um programa conhecido como Government/Industry Data Exchange Program (GIDEP) financiado pelo exército e força aérea dos EUA nas décadas de 60 e 70. A base de dados incluía taxas de falha e taxas de reparo, informava o tamanho da população e os modos de falha quando conhecidos. As métricas de confiabilidade eram obtidas a partir de dados de campo, testes acelerados e testes de demonstração de confiabilidade. Foram também fornecidos intervalos de confiança

para as taxas de falha baseando-se no trabalho de Epstein (1960). Em 1953, Epstein mostrou que intervalos de confiança poderiam ser estabelecidos para estimativas de um valor médio da taxa de falha usando a distribuição  $\chi^2$  com  $2k$  graus de liberdade e duas vezes o tempo acumulado de teste,  $\chi^2(2k, 2T)$ , desde que as hipóteses de que a distribuição do tempo de operação exponencial dos componentes e a população homogênea fossem válidas.

Infelizmente, os intervalos de confiança para as taxas de falha fornecidos no banco de dados FARADA foram obtidos a partir de dados agregados de populações que eram obviamente não-homogêneas. Por conseqüência, os intervalos de confiança fornecidos foram irrealisticamente estreitos e assim, subestimando grosseiramente o nível de incerteza.

O banco de dados RADC Non-Electronic Reliability Notebook (COTTRELL, 1969) foi desenvolvido pela US Air Force Rome Air Development. Durante a década de 70, esse banco de dados continha taxas de falha constantes para mais de 300 tipos de componentes. As estimativas foram obtidas a partir de dados de campo e dados de teste no contexto militar obtidos para sub-populações submetidas a condições ambientais semelhantes. Fatores de aplicação de acordo com o ambiente ( $\pi$ -factors) foram também fornecidos. O mesmo problema decorrente do uso de intervalos de confiança baseados na distribuição  $\chi^2$  foram observados. No entanto, o problema foi minimizado, pois as sub-populações usadas eram mais homogêneas do que no caso do banco de dados FARADA.

O RADC foi posteriormente fundido com um banco de dados de confiabilidade desenvolvido pelo Illinois Institute of Technology (IIT) resultando no IIT Reliability Notebook for Microcircuits. Nesta base de dados, as estimativas da taxa de falha constante foram fornecidas com intervalos de incerteza de 60%. Esse banco de dados foi o primeiro a reconhecer o problema decorrente da agregação de sub-populações não-homogêneas e usou o Teste F de Fisher para determinar a validade da hipótese de homogeneidade antes de proceder à agregação das sub-populações. Entretanto, esses dois bancos de dados não forneciam também informações com relação aos modos de falha dos equipamentos.

Esses BDC's desenvolvidos até a década de 70 praticamente apresentavam as mesmas características: eram baseados na suposição de taxa de falha constante e forneciam apenas estimativas pontuais da taxa de falha para categorias genéricas de componentes, não havendo a especificação de possíveis modos de falha.

Nenhuma ou pouca atenção era dada à estimação da incerteza. Quando faixas de confiança eram fornecidas, essas eram absurdamente estreitas em decorrência da suposição

incorretamente adotada de que as populações eram homogêneas mesmo quando obviamente eram não-homogêneas.

Apesar desses problemas, analistas de confiabilidade e risco já tinham consciência da necessidade e utilidade dos bancos de dados. Novos projetos de desenvolvimento de banco de dados foram iniciados com o intuito de contornar os problemas identificados. Em geral, esses novos bancos de dados de terceira geração forneciam estimativas de intervalo em torno das estimativas pontuais do valor esperado da métrica de confiabilidade que explicitamente levavam em consideração a natureza não-homogênea das sub-populações dos componentes observados. Taxas de falha foram também divididas entre aquelas baseadas no tempo e as baseadas em ciclos ou demandas. Modos de falha foram identificados e divididos naquele que ocorriam no tempo e os que ocorriam sob demanda. Foram ainda categorizados em modos de falha catastróficos, degradados e incipientes: modo de falha catastrófico sendo aquele em que ocorre a perda total da função do componente; modo de falha degradado descreve casos nos quais há perda parcial da funcionalidade, mas o componente ainda é capaz de desempenhar sua função em um nível minimamente aceitável; modo de falha incipiente descreve as situações nas quais não há ainda perda de função, mas há indicações ou indícios de que a perda de função total ou parcial poderá ocorrer se não houver manutenção ou reparo.

Esses novos esforços foram principalmente direcionados às áreas nuclear comercial e energia elétrica, e posteriormente nas indústrias química e produção de petróleo *offshore*. Na área nuclear comercial destaca-se o T-Book (CARLSON, 1987), banco de dados de confiabilidade de componentes para plantas nucleares comerciais nórdicas. No contexto de geração de energia elétrica (unidades térmicas) pode-se citar o EIREDA – The European Industry Reliability Data Bank Handbook (EIREDA, 1991), que fornece estimativas pontuais para a taxa de falha constante e probabilidade de falha na demanda baseadas em estimadores de Máxima Verossimilhança, e intervalos de confiança ( $1 - \alpha = 90\%$ ) baseados na suposição de que as populações são homogêneas.

No contexto da exploração e produção *offshore* de petróleo e gás natural destaca-se o OREDA – Offshore Reliability Data. O OREDA (2002) (Figura 2.1) fornece estimativas para taxa de falha constante e probabilidade de falha na demanda baseadas em estimadores não-Bayesianos. Reconhecendo a não-homogeneidade das sub-populações, intervalos de confiança ( $1 - \alpha = 90\%$ ) são fornecidos tanto sob as hipóteses de homogeneidade como não-homogeneidade.

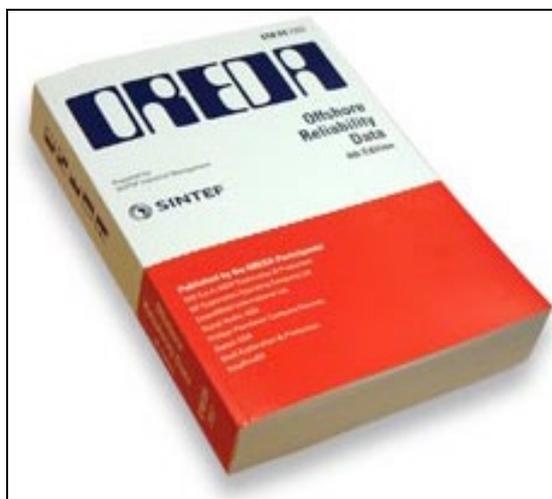


Figura 2.1 OREDA

Pode-se citar ainda o International Standard ISO 14.224 – Petroleum and Natural Gas Industries – Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment (1999). Apesar de não ser um banco de dados, a ISO 14.224 fornece orientações para o desenvolvimento de taxonomia para BDC’s e risco, não discutindo, porém, o processo de estimação de métricas de confiabilidade e nem tampouco a quantificação da incerteza associada. Assim, pode-se resumir na tabela abaixo a evolução dos BDC’s com base nas três gerações descritas.

Tabela 2.1 Evolução de BDC’s

PRIMEIRA GERAÇÃO	SEGUNDA GERAÇÃO	TERCEIRA GERAÇÃO
1950 1959	1960 1979	1980 -
CARACTERÍSTICAS		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de falha constante.</li> <li>• Estimativas pontuais da taxa de falha.</li> <li>• Métricas genéricas resultantes de uma variedade de tipos de equipamentos.</li> <li>• Uso de fatores de ajuste</li> <li>• Não há informações sobre modos de falha.</li> <li>• Não há intervalos de confiança ou faixas de incerteza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de falha constante.</li> <li>• Métricas obtidas a partir de dados de campo, testes acelerados e testes de demonstração de confiabilidade.</li> <li>• Métricas representativas de um equipamento específico.</li> <li>• Uso de fatores de ajuste</li> <li>• Não há informações sobre modos de falha.</li> <li>• Estimação grosseira de faixas de confiança.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levada em consideração a natureza não-homogênea das subpopulações dos componentes observados.</li> <li>• Taxas de falha foram também divididas entre aquelas baseadas no tempo e as baseadas em ciclos ou demandas.</li> <li>• Modos de falha foram identificados e divididos entre os que ocorriam no tempo e os que ocorriam sob demanda.</li> </ul>

## 2.2 Conceitos Básicos em Análise de Falhas

O foco desta seção não será uma abordagem completa em análise de falhas, mas apenas discussões de conceitos básicos e explicações sobre como interpretar função, falha, modo de falha, causa de falha, e efeito de falha. Em outras palavras, é apresentada a seguir uma abordagem geral para identificar e classificar funções e modos de falhas, bem como algumas descrições consideradas necessárias para o entendimento claro da posterior metodologia.

### 2.2.1 Introdução

Falha é um conceito fundamental em qualquer análise de confiabilidade. Segundo Duarte (2004), falha é a diminuição total ou parcial da eficácia ou capacidade de desempenho de um sistema. De acordo com os padrões de IEC 50(191) (1990) falha é definida como o término da capacidade de um item desempenhar uma função requerida. O termo item usado aqui, e posteriormente, denota qualquer componente, equipamento, subsistema ou sistema.

A qualidade de uma análise de confiabilidade depende fortemente da habilidade do analista em identificar todas as funções requeridas, e então, todas as falhas do item que está sendo analisado.

Falhas normalmente são classificadas em modos de falha. O conceito de modo de falha é geralmente reconhecido como um conceito útil e necessário em análise de falhas, contudo, não tem uma interpretação bem definida, havendo muitas razões para isso. Entre elas, pode-se citar:

- A definição de modo de falha não é o mesmo nos vários padrões usados, como o OREDA (2002) e BS 5760-5 (1991).
- Em aplicações práticas, a descrição do modo de falha confunde-se com a descrição de causa de falha ou a descrição do efeito da falha. Isto está relacionado ao nível de detalhamento que o sistema será analisado. O modo de falha do primeiro nível será a causa de falha do próximo nível.
- O conceito de modo de falha é normalmente pouco familiar a profissionais não especializados. Por exemplo, um engenheiro de manutenção pode realizar as atividades de manutenção toda sua vida sem ter conhecimento do conceito de modo de falha e não sente nenhuma necessidade para obtê-lo.

### 2.2.2 Funções Requeridas

As funções de um item podem ser definidas como “ações características de um item, algumas vezes definida em termos de capacidades de desempenho” (NOWLAN & HEAP, 1978).

Em muitas normas de procedimento e manuais, é recomendado que as várias funções sejam expressas da mesma forma, como uma estrutura compreendendo um verbo mais um substantivo. Por exemplo, ‘fechar fluxo’, ‘transmitir sinal’, ‘conter fluido’

### 2.2.3 Classificação de Funções

Um item complexo pode ter diversas funções requeridas. Todas essas funções, entretanto, não são igualmente importantes. Assim, é necessário classificá-las. Uma das classificações utilizadas em Rausand & Oien (1996) é a seguinte:

- Funções *Essenciais*: são as funções requeridas para executar o objetivo do item. As funções essenciais são simplesmente as razões para instalação do item e geralmente é refletida no nome do item. Uma função essencial de uma bomba é, por exemplo, bombear fluido.
- Funções *Auxiliares*: são as funções requeridas para apoiar as funções essenciais. São geralmente menos evidentes que as essenciais, mas podem ser tão importantes quanto. A falha de uma função auxiliar pode ser em muitos casos mais danosa do que em uma função essencial. Por exemplo, uma função auxiliar de uma bomba é a contenção de fluido.
- Funções *de Proteção*: funções cujo objetivo é proteger pessoas, equipamentos e ambientes de danos ou perdas. Podem ser divididas em:
  - *Funções de Segurança*: previnem acidentes e / ou reduzem conseqüências para as pessoas, materiais e o ambiente;
  - *Funções Ambientais*: pode ser citado como exemplo as anti-poluição;
  - *Funções de Higiene*.
- Funções *de Interface*: ligam um item a outro por meio de interfaces.
- Funções *Informativas*: compreendem monitoramento de condições, diversos medidores e alarmes, etc.

Funções *Supérfluas*: de acordo com Moubray (1991), itens ou componentes são às vezes encontrados como sendo completamente supérfluos. Isso acontece quando o equipamento é modificado freqüentemente diversas vezes por períodos longos. Funções supérfluas estão às

vezes presentes quando o item foi desenvolvido para um contexto de operação que é diferente do contexto atual de funcionamento.

Essas classificações não são necessariamente disjuntas. Algumas delas podem ser classificadas em mais de uma classe.

As funções também podem ser distinguidas pelo modo como suas falhas ocorrem, se são evidentes ou não. Catola (1983) as classifica da seguinte forma:

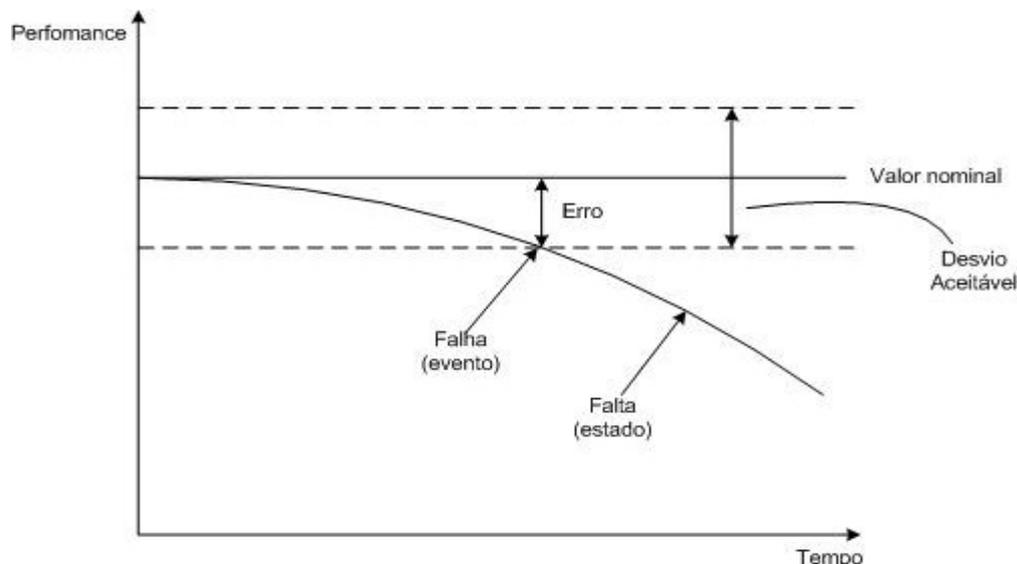
- Funções on-line: são funções operadas continuamente ou tão frequentemente que o usuário tem conhecimento do estado atual desta função. O término de uma função on-line é chamada de falha evidente.
- Funções off-line: são funções usadas intermitentemente ou não são tão frequentes que a disponibilidade destas não é conhecida pelo usuário sem algum teste especial. Um exemplo é função essencial de um sistema de fechamento de emergência. Muitas das funções de proteção são off-line. O término de uma função off-line é uma falha oculta (escondida, encoberta).

As funções em um item precisam ser divididas em várias sub-funções com certo nível de detalhe, para isso foram criadas técnicas como:

- Diagramas FAST (Functional Analysis System Technique) descrita com detalhes em Fox (1993): ilustram as relações entre as funções requeridas. São construídos perguntando-se como uma dada função é executada até se chegar a mais inferior, permitindo identificar e estabelecer as funções. Sua representação consiste em uma figura que mostra todas as funções do sistema em níveis diferentes, ligando as funções entre si em uma rede;
- Diagramas Funcionais de Bloco: ilustram as interações na hierarquia das funções e mostram as interfaces de input e output. São usados para representar as exigências de design do item de maneira detalhada, mostrando os relacionamentos série-paralelo, os possíveis *feedbacks*, a hierarquia das funções e as interfaces funcionais.

#### 2.2.4 Falhas e Modos de Falhas

Ainda que um analista pudesse identificar todos as funções essenciais de um item, seria muito difícil identificar todos os modos de falha, pois cada função pode ter muitos modos de falha. O termo falha é frequentemente confundido com os termos falta e erro, existindo várias definições, às vezes conflitantes. A relação entre esses termos como definido no IEC 50(191) (1990) é ilustrado na Figura 2.2.



**Figura 2.2 Ilustração da diferença entre falha, falta e erro**  
**Fonte: Adaptado de Rausand & Oien (1996)**

De acordo com IEC 50(191) (1990) um erro é “a discrepância entre o valor computado, observado ou mensurado e o verdadeiro valor especificado ou teoricamente correto”. Um erro não é ainda uma falha porque está dentro de limites aceitáveis de desvio do desempenho desejado e pode ser referido como uma falha incipiente.

Ainda segundo o IEC 50(191) (1990) falha é “o evento que ocorre quando a função requerida é perdida (excedendo os limites aceitáveis)”, enquanto falta é “o estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar a função requerida, excluindo-se a incapacidade durante manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou devido à falta de fontes externas”. Uma falta é assim um estado resultante de uma falha.

Essa distinção entre falha, falta e erro é essencial em análise de falha, porque descreve a linha divisória entre o que esses termos realmente são.

Um modo de falha é a descrição de uma falta, ou seja, como se pode observar uma falta. De acordo com o padrão Britânico BS 5760-5 (1991), modo de falha é “o efeito sobre como uma falha é observada num item”. Para identificá-lo, é necessário que se analise as funções exercidas pelo item. Para algumas funções é possível atribuir definições precisas, pois é relativamente fácil determinar quando os requisitos da função estão sendo alcançados, isto é, a função está sendo desempenhada satisfatoriamente. Em outros casos, entretanto, a avaliação do sucesso da execução da função pode ser definida em termos de um valor nominal com uma faixa aceitável de desvio em torno desse valor desejável.

Por exemplo, considere o processo de fechamento de uma válvula, que deveria ter um tempo de fechamento de 10 segundos, de acordo com o projeto. Se a válvula fecha muito

lentamente, então não funcionaria como uma barreira segura. Por outro lado, se a válvula fecha muito rápido, poderia gerar um choque de pressão destruindo a própria válvula ou seus flanges. Tempos de fechamento entre 6 e 14 segundos podem, por exemplo, ser aceitáveis, e portanto, considera-se que a válvula funciona satisfatoriamente. A severidade da falha obviamente aumenta com o desvio do valor nominal, conforme ilustrada na Figura 2.2.

Exemplos de modos de falha derivados de desvios da função de saída de fechamento da válvula podem ser (1) fechar muito lentamente, (2) fechar muito rápido, ou (3) não fechar completamente. Muitos modos de falha evidentes podem ser identificados de uma maneira similar por se estudar a resposta das várias funções requeridas. Modos de falha relacionados aos vários modos de operação de um processo de fechamento de válvula são listados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 Modos de Falhas relacionados aos vários modos de operação de um processo de fechamento de válvula**

<i>Modo de Operação</i>	<i>Modos de Falha</i>
<i>Fechar fluxo</i>	<i>Não fechar Não fechar completamente Fechar lentamente Fechar rapidamente</i>
<i>Manter fluxo fechado</i>	<i>Abrir espuriamente Vazamento interno Vazamento externo</i>
<i>Abrir Fluxo</i>	<i>Não abrir Não abrir completamente Abrir lentamente Abrir rapidamente</i>
<i>Manter fluxo aberto</i>	<i>Fechar espuriamente Vazamento Externo Preso</i>

É importante salientar que um modo de falha é a manifestação da falha vista do lado de fora do item, isto é, o fim de uma ou mais funções. Por exemplo, ‘escoamento interno’ é um modo de falha da válvula, visto que a válvula perde sua função requerida de fechar o fluxo. O desgaste do selo de válvula, contudo, representa a causa de falha e não é assim, um modo de falha da válvula.

Modos de falha podem ser divididos em três grandes grupos, relacionados à função do item:

1. Perda Total da Função: acontece quando a função não foi completamente realizada ou a qualidade está inaceitável;
2. Perda Parcial da Função: pode variar de um dano até a perda quase total da função;
3. Função Errônea: ocorre quando a performance do item em ação não é aquela pretendida, freqüentemente a oposta a que foi prevista anteriormente.

Para o caso da válvula, os modos de falha não abrir completamente e não fechar completamente são obviamente da categoria ‘perda total da função’ visto que é impossível abrir (fechar) a válvula. Uma perda parcial da função ocorrerá, por exemplo, se a válvula abrir (fechar) lentamente ou operar num modo impróprio. O modo de falha ‘vazamento interno’, isto é, escoamento através da válvula na posição fechada, pode ser uma perda total de função ou perda parcial de função dependendo do contexto operacional. Se o vazamento é estritamente proibido, o modo de falha representará uma perda total de função mesmo para um pequeno vazamento.

Ainda uma outra classificação de modos de falha em relação às funções do item amplamente aceita, de acordo com Rausand & Oien (1996), é a seguinte:

1. Falhas Intermitentes: falhas que resultam na ausência de alguma função por um período de tempo.
2. Falhas Estendidas: falhas que resultam na falta de alguma função até que alguma parte do item seja trocada ou reparada. Podem ser divididas em:
  - a) Falhas Completas: falhas que resultam na perda completa da função requerida;
  - b) Falhas Parciais: falhas que levam à perda de alguma função, mas não provocam a falta completa da função requerida.

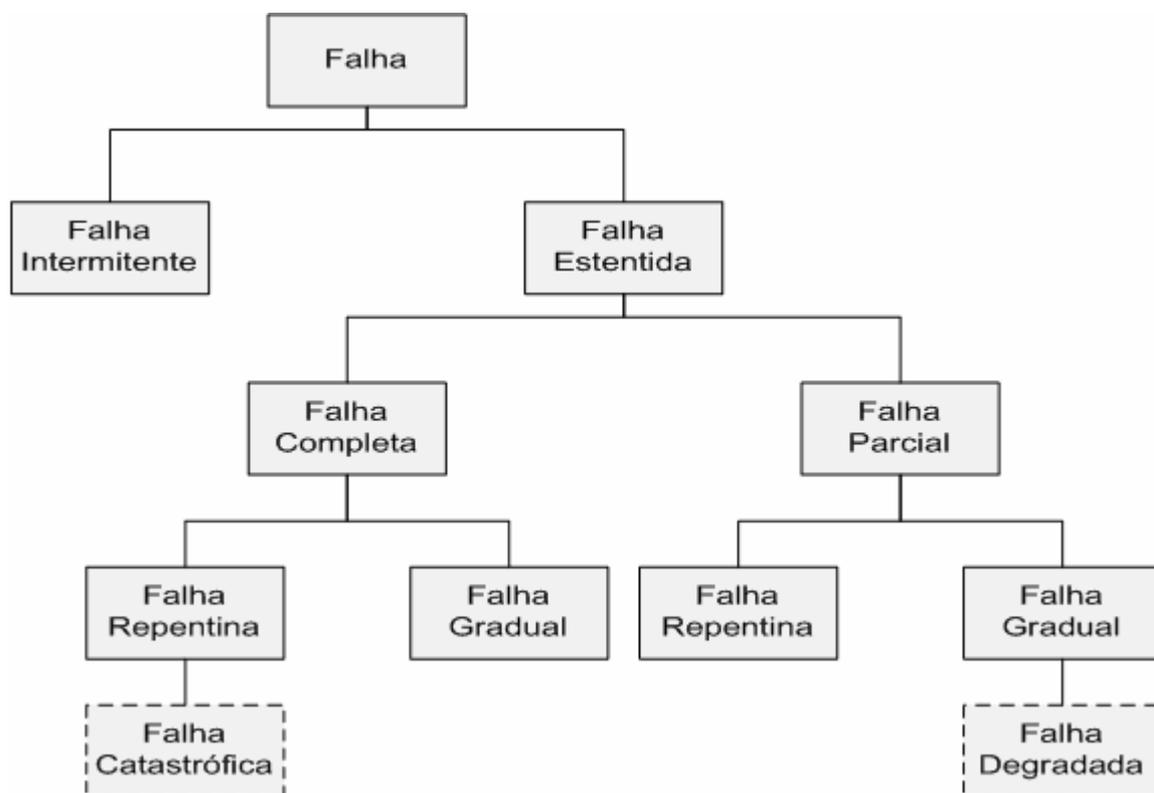
As falhas completas e as falhas parciais podem ser classificadas em:

- a) Falhas Súbitas (ou Repentinhas): não podem ser detectadas previamente por meio de testes;
- b) Falhas Graduais: podem ser detectadas previamente. Representam uma diminuição gradual da performance do item.

Assim, de acordo com esta classificação, as falhas estendidas (ou também chamadas prolongadas) podem ser divididas em quatro categorias: falha completa e súbita; completa e gradual; parcial e súbita; e parcial e gradual. Duas dessas recebem nomes específicos:

- Falhas Catastróficas: Uma falha que é completa e súbita (Ex: estouro de um pneu em bom estado).
- Falhas Degradadas: Uma falha que é parcial e gradual (Ex.: desgaste dos pneus de um carro).

A classificação de falhas descrita acima é ilustrada na Figura 2.3.



**Figura 2.3 Classificação de Falhas**  
 Fonte: Adaptado de Rausand & Oien (1996)

### 2.2.5 Causas de Falhas

As causas de uma falha fornecem as razões pelas quais um sistema falha. A causa de uma falha pode ser definida segundo o IEC 50(191) (1990) como “as circunstâncias que levam a uma falha durante o projeto, produção ou uso”. A causa de falhas é um ponto-chave para se prever ou evitar uma nova ocorrência de falhas.

As causas das falhas podem ser classificadas baseadas no ciclo de vida do item, dividindo-se em (IEC 50(191), 1990):

- Falhas de Projeto: ocorrem quando o projeto é inadequado;
- Falhas de Fraqueza: ocorrem devido ao enfraquecimento do item quando submetido a estresse dentro de limites suportáveis;
- Falhas de Manufatura: ocorrem devido à não-conformidade durante a manufatura de um item ou de processos de manufatura;
- Falhas de Envelhecimento: falhas em que sua probabilidade de ocorrência aumenta com o tempo;
- Falhas de Uso Impróprio: ocorre quando o item é submetido a estresse excessivo durante o uso, excedendo os limites de capacidade do item;

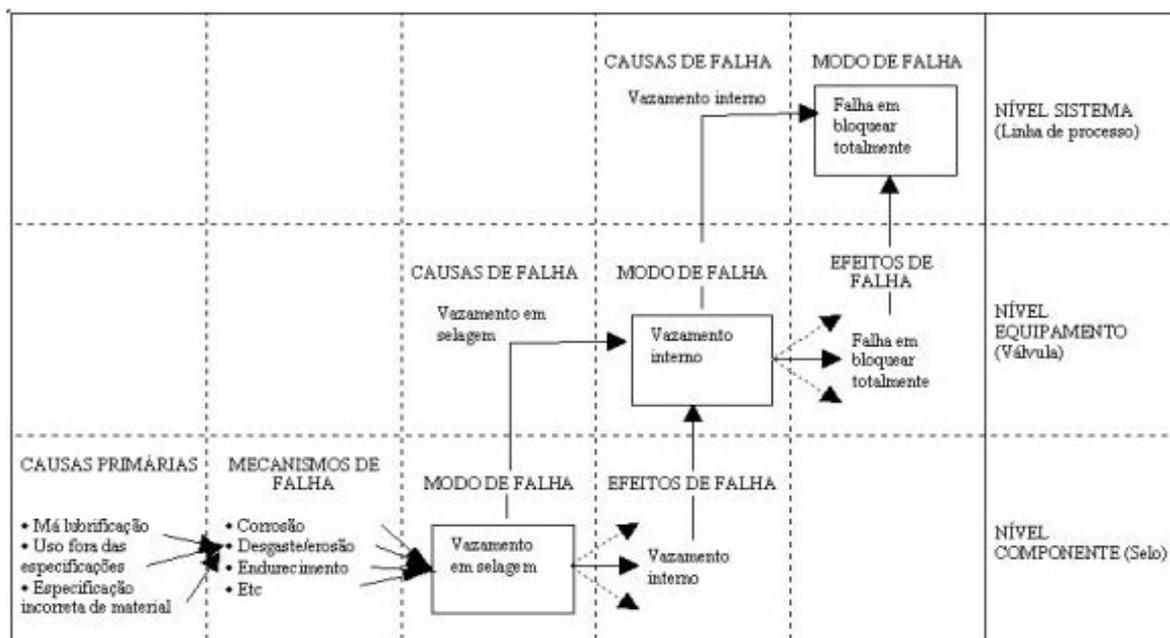
- Falhas de Manuseio: causada pela falta de cuidado com o item.

Em relação ao modo de operação, causas de falha podem ser categorizadas em falha no tempo e falha sob demanda. Em geral, uma falha ocorrendo quando o sistema é colocado em serviço a partir do modo *standby* é classificada como falha sob demanda. Quando a falha ocorre enquanto o sistema está em modo de operação contínua é classificada como falha no tempo. Um mesmo sistema pode ter ambos os modos de operação, *standby* e contínuo, isto é, alternado ou também chamado intermitente. Assim, o mesmo pode ter falhas no tempo e falhas sob demanda. Os modos de operação podem ser classificados ainda em relação ao funcionamento do sistema como normal ou de emergência.

Enquanto as causas descrevem as razões, os mecanismos de falha descrevem os processos físicos que levam à falha. Exemplos de processos tipicamente encontrados em análises de física de falha são corrosão, desgaste, vibração e oxidação.

### 2.2.6 Efeitos de Falha e Severidade

Em termos da relação causa e efeito, observa-se que de uma forma geral cada modo de falha pode ter várias causas distintas, levando a diferentes efeitos. Para um entendimento mais abrangente da relação entre esses termos, o nível de hierarquia deve ser levado em conta. Isto é ilustrado na Figura 2.4. Esta mostra que um modo de falha pertencente ao mais baixo nível da hierarquia corresponde a uma das causas do nível imediatamente superior, e o efeito da falha em um nível inferior equivale ao modo de falha no nível imediatamente acima. Considerando novamente o exemplo da válvula de fechamento, o modo de falha “vazamento em selagem”, para o componente selo, é uma das possíveis causas para o modo de falha “vazamento interno” para a válvula, e o efeito da falha (no próximo nível superior) “vazamento interno” resultante de “vazamento em selagem” equivale ao modo de falha “vazamento interno” da válvula .



**Figura 2.4** Análise de Falhas em distintos níveis hierárquicos  
**Fonte:** Adaptado de Rausand & Oien (1996)

O conceito de severidade de um modo de falha pode ser entendido como o impacto do modo de falha no nível de sistema. No processo de fechamento de válvula, por exemplo, a severidade são os efeitos de falha na linha de processo (Figura 2.4).

Um ranking de severidade é geralmente requerido como parte de uma FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e técnicas similares, de modo a estabelecer prioridades do sistema. Além disso, um ranking de severidade de modos de falha é parte essencial de procedimentos RCM (*Reliability Centred Maintenance*). Assim, muitos padrões apresentam vários esquemas de classificação de severidade. Em MIL – STD 882B (1984), a classificação adotada é a seguinte:

- Catastrófico: qualquer falha que resulte na perda ou fim do sistema;
- Crítico: qualquer falha que resulte num dano severo ao sistema;
- Marginal: qualquer falha que resulte num dano menor, pequeno ao sistema;
- Negligente: qualquer falha que resulte num dano mínimo ao sistema.

Ainda de acordo com MIL – STD 882B (1984), a severidade pode ser dividida em classes normalmente em ordem decrescente de importância:

- Falhas com conseqüências em segurança;
- Falhas com conseqüências ambientais;
- Falhas com conseqüências operacionais;
- Falhas com conseqüências não-operacionais.

Quando as falhas são dependentes, Hoyland & Rausand (1994) classificam-nas em dois tipos:

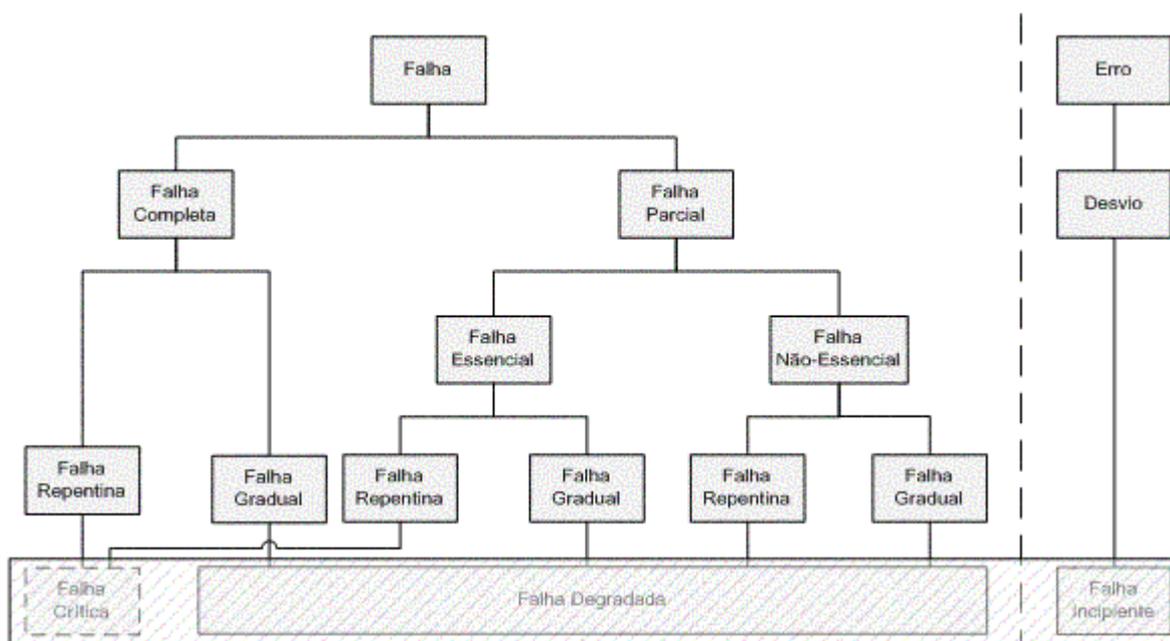
- Falhas de causa comum: são quando múltiplas falhas ocorrem devido a uma falha numa “raiz” comum ou compartilhada por elas;
- Falhas em cascata: são iniciadas quando um componente falha e “derruba” outros, causando o chamado “efeito dominó”.

De acordo com o AICHE/CCPS (1989), e adotado em outros bancos de dados como OREDA (2002) e na norma ISO 14.224 (1999), são categorizados em relação à severidade três diferentes modos de falha:

- Crítico: ocorre a perda total da função do item;
- Degradado: há perda parcial da funcionalidade, mas o item ainda é capaz de desempenhar sua função em um nível minimamente aceitável;
- Incipiente: não há ainda perda de função, mas há indicações ou indícios de que a perda de função total ou parcial poderá ocorrer se não houver manutenção ou reparo.

No caso do OREDA (2002), vale salientar que essas categorias são baseadas nos efeitos locais do equipamento, não no sistema, ou seja, o item mencionado acima é o equipamento e não o sistema.

Desse modo, pode-se relacionar a classificação de modos de falha utilizadas no OREDA (2002) com o esquema de classificação da Figura 2.3. A Figura 2.5 abaixo ilustra esta relação.



**Figura 2.5 Classificação de Modos de Falha (OREDA)**  
 Fonte: Adaptado de Rausand & Oien (1996)

### 2.3 FMEA

Depois de abordar aspectos importantes de análise de falhas, pode-se agora discutir a técnica FMEA. A *Análise de Modos de Falha e Efeitos (Failure Mode and Effects Analysis – FMEA)* é uma técnica usada para a sistemática identificação de modos de falha desenvolvida a partir de década de 50 para estudar problemas de funcionamento em sistemas militares nos EUA.

Em geral, “o desenvolvimento de uma FMEA constitui-se no primeiro passo de uma análise de confiabilidade” (MODARRES *et al.*, 1999). Este processo envolve a revisão de componentes, subsistemas e sistemas para a identificação de modos de falhas e suas causas. Para cada componente, os modos de falha, as suas causas e seus efeitos são registrados em uma planilha de FMEA. Há na literatura diversos formatos para as planilhas de FMEA. A Figura 2.6 ilustra uma dessas planilhas.

Sistema:						Data:			
Analista:						Página:			
Descrição da Unidade			Descrição da Falha			Efeito da Falha		Classe de Severidade	Ações para Redução da Severidade ou Efeitos
Item	Função	Modo de Operação	Modo de Falha	Causas da Falha ou Mecanismos	Detecção da Falha	Efeito Local	Efeito na Função do Sistema		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)

**Figura 2.6 Planilha de FMEA**  
**Fonte: Adaptado de Modarres *et al* (1999)**

A construção de uma FMEA é um processo simples. Entretanto, é necessário conhecer e entender as funções do sistema e as restrições sob as quais deve operar. De acordo com o IEEE Std. 352 (1982), a FMEA deve responder as seguintes perguntas:

- Como cada item (componente, sub-sistema, equipamento, sistema) pode vir a falhar?
- Quais mecanismos podem acarretar nesses modos de falha?
- Quais são os possíveis efeitos se as falhas acontecessem?
- A falha conduz a uma situação segura ou insegura?
- Como a falha pode ser detectada?
- Quais são as barreiras disponíveis?

O desenvolvimento de uma FMEA pode ser executado de acordo com os seguintes passos:

- Definição e delimitação do sistema (delimitação das suas fronteiras): quais componentes estão dentro das fronteiras do sistema e quais estão externas a estas. A construção de um diagrama de blocos pode ser útil nesta etapa;
- Definição das funções principais do sistema;
- Descrição dos modos de operação do sistema;
- Decomposição do sistema em subsistemas que podem ser analisados eficientemente;
- Identificação das inter-relações funcionais entre os sub-sistemas. Novamente, um diagrama de blocos pode ser útil nesta etapa;
- Preparação de uma lista completa dos componentes de cada subsistema;
- Descrição dos estresses operacionais e ambientais que podem afetar o sistema e a sua operação;
- Identificação de todos os modos de falha relevantes e efeitos nas funções locais (componentes, subsistemas) e funções do sistema;
- Avaliação de cada modo de falha em termos da pior consequência que pode vir a resultar, e associação a uma classe de severidade apropriada;
- Identificação de modos de detecção para cada modo de falha;
- Identificação de ações corretivas para eliminar ou reduzir o modo de falha e/ou a sua severidade e efeitos associados.

O significado das várias colunas na planilha de FMEA mostrada na Figura 2.6 é detalhado a seguir:

- Item (coluna 1): nome do item sendo analisado;
- Função (coluna 2): descrição da função ou funções do item;

- Modo de Operação (coluna 3): o item pode apresentar vários modos de operação, como contínuo e *standby*. Além dos modos de operação tradicionalmente usados, alguns sistemas podem possuir outros. Por exemplo, uma aeronave possui os seguintes modos de operação: táxi, decolagem, ascensão, cruzeiro, descida, aproximação, aterrissagem, frenagem (reversão de turbinas) e deslocamento livre;
- Modo de Falha (coluna 4): para cada função devem ser identificados todos os modos de falha. Os modos de falha devem ser definidos como o não preenchimento dos requerimentos funcionais das funções especificadas na coluna 2;
- Causas da Falha ou Mecanismos (coluna 5): possíveis causas ou mecanismos de falha que podem acarretar nos modos de falhas identificados na coluna 3;
- Detecção da Falha (coluna 6): descrição das diversas formas de identificação dos modos de falha na coluna 4. Essas formas de identificação podem ser alarmes, testes funcionais, percepção do operador, etc.
- Efeito Local (coluna 7): todos os principais efeitos do modo de falha no item (componente, subsistema, equipamento) devem ser identificados;
- Efeito na Função do Sistema (coluna 8): todos os principais efeitos do modo de falha na função do sistema devem ser identificados. O estado operacional do sistema resultante da ocorrência da falha também pode ser registrado, ou seja, se o sistema está ou não operacional, ou se ocorreu a mudança para outro modo de operação;
- Classe de Severidade (coluna 9): severidade de um modo de falha corresponde a pior consequência da ocorrência da falha. Esta é determinada pelo grau de danos a pessoas, ao meio ambiente, a equipamentos, ou ao sistema sendo analisado. Em geral, as seguintes classes são adotadas em uma FMEA :
  - *Catastrófica*: qualquer falha que pode resultar em mortes ou danos, ou a perda total de uma ou mais funções do sistema;
  - *Crítica*: qualquer falha que resulte na perda total de uma ou mais funções do sistema, e pode acarretar em um perigo para a segurança (causar mortes, ferimentos ou danos) se nenhuma ação corretiva for tomada;
  - *Degradado*: qualquer falha que resulte na perda parcial de uma ou mais funções do sistema. Não há perda completa da função, isto é, o sistema ainda é capaz de desempenhar sua função ou funções em um nível minimamente aceitável;

- *Incipiente*: qualquer falha com a qual não há ainda perda de função, mas há indicações ou indícios de que a perda de função total ou parcial poderá ocorrer se não houver manutenção ou reparo.
- Ações para Redução da Severidade ou Efeitos (coluna 10): possíveis ações para a redução ou eliminação do modo de falha e restauração da função, e/ou redução da severidade, ou ações preventivas contra conseqüências deletérias.

### 3. METODOLOGIA

BDC's devem ser projetados e desenvolvidos com a intenção de atender a três tipos de usuários (COOKE, 1996):

- O engenheiro de manutenção interessado em medir e otimizar o desempenho das atividades de manutenção;
- O projetista de equipamentos e componentes interessado em otimizar o desempenho dos mesmos;
- O analista de risco / confiabilidade interessado em estimar a confiabilidade de sistemas complexos nos quais esses equipamentos e componentes operam.

A fim de atender esses três tipos de usuário, segundo Droguett & de Souza (2003), BDC'S devem fornecer, além de modos de falha, dados com relação às características do equipamento, condições operacionais e política de manutenção e reparo. E com a crescente necessidade de tomadas de decisão sob incerteza, particularmente em análises de risco e confiabilidade, BDC's devem ainda fornecer as faixas de incerteza para as estimativas de taxas de falha e probabilidades de falha.

Desta forma, a aplicação para o desenvolvimento de um BDC envolve as seguintes etapas fundamentais:

1. Definição dos objetivos a serem alcançados pelo banco de dados, estabelecendo-se que tipo de análise se deseja suportar e identificar os componentes e sistemas que serão incluídos no banco de dados;
2. Identificação e análise de possíveis fontes de dados disponíveis;
3. Desenvolvimento da taxonomia do banco de dados. Esta etapa consiste principalmente na especificação e detalhamento das categorias de dados coletados desses equipamentos e identificação de modos de falha e suas causas e efeitos;
4. Implantação e execução de um projeto piloto para o processo de coleta de dados, a fim de validar, modificar e introduzir correções nos elementos de processo como, por exemplo, adequação das planilhas de coleta de dados, classes de severidade, modos de falha, componentes passíveis de manutenção, etc.;
5. Estabelecimento do programa de coleta de dados para um determinado período pré-estabelecido utilizando o processo de coleta atualizado a partir do *feedback* do projeto piloto;

6. Obtenção de métricas de confiabilidade como taxa de falha e probabilidade de falha dos modos de falha de cada equipamento incluído no banco de dados. Constitui-se da análise e tratamento dos dados brutos coletados, resultando numa metodologia de quantificação que possibilite a estimação ser executada para cada modo de falha e inclua a estimação da faixa de incerteza de cada métrica obtida. Neste contexto, as populações devem ser apropriadamente tratadas como homogêneas ou não-homogêneas a fim de não resultar em grosseira subestimação do nível de incerteza.

### **3.1 Desenvolvimento da Taxonomia do Banco de Dados de Confiabilidade**

Para que dados de falha possam ser agregados e comparados é necessário que exista um procedimento de classificação e armazenamento de dados que seja baseado em características de projeto e processo dos equipamentos que afetem a confiabilidade. Esse procedimento, denominado de taxonomia, deve distinguir e ordenar sistematicamente categorias de dados.

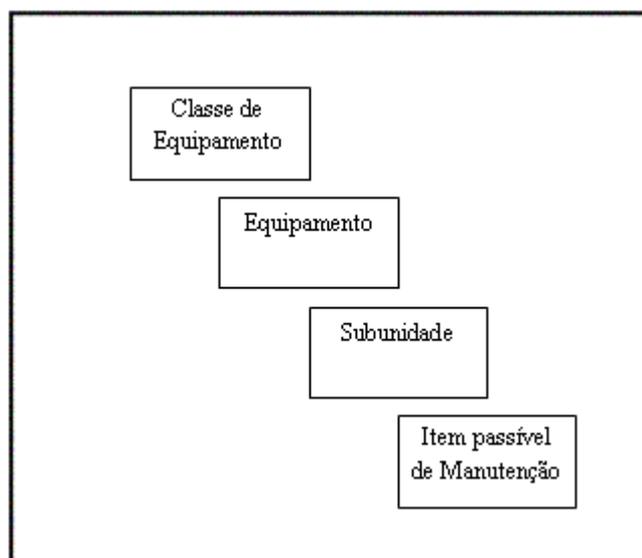
Sendo assim, a taxonomia dos dados é importante e significativa, sobretudo em relação aos dados de eventos de falha que proporcionam a avaliação de taxas de falhas, cujo nível de incerteza é menor quando comparadas a taxas de bancos de dados genéricos.

A elaboração da taxonomia envolve 4 etapas fundamentais:

- Hierarquização do conjunto de equipamentos do sistema analisado
- Estruturação dos dados
- Organização e Descrição dos dados
- Identificação e Classificação dos possíveis modos de falha

#### **3.1.1 Hierarquia de um Sistema**

O primeiro passo para a elaboração de uma taxonomia é alocar os equipamentos em grupos e subgrupos com base em níveis hierárquicos, como se verifica na Figura 3.1. O critério para se estabelecer diferentes classes de equipamentos é a função principal ou essencial definida no cap. 2



**Figura 3.1 Hierarquia de Equipamentos**  
**Fonte: Adaptado da ISO 14224 (1999)**

Todos os equipamentos devem ter suas fronteiras claramente estabelecidas. As fronteiras definem quais são as interfaces do equipamento com o sistema e são fundamentais para um entendimento de quais falhas serão contabilizadas no processo de coleta de dados. Tipicamente a definição de fronteira do equipamento é baseada em três critérios (IAEA, 1992):

- Descrever claramente o componente;
- Ser compatível com os dados que serão gerados e adequada às aplicações do usuário;
- Ser compatível com a documentação do equipamento e suas características operacionais.

Assim, é importante definir a fronteira para cada um dos equipamentos (sistemas) analisados de forma a viabilizar a coleta, consolidação e análise dos dados de falha e manutenção obtidos desses equipamentos. Deve-se então, especificar quais subsistemas e componentes deverão ser considerados como parte de uma determinada classe de equipamento.

Dados coletados para diferentes equipamentos operando em distintos sistemas devem ser compatíveis no momento da inserção no banco de dados. Para tanto, é essencial que os dados refiram-se a um mesmo nível dentro do sistema sendo analisado. Por exemplo, no caso de uma válvula de controle, todos os dados coletados a partir de diferentes unidades desse tipo de válvula devem todos corresponder ao mesmo subsistema como o piloto da válvula, ou em um nível maior de detalhamento como o bloqueador do piloto da válvula.

O número de níveis da hierarquia depende da complexidade do equipamento e do uso dos dados coletados. Por exemplo, o dado “classe de severidade” deve ser associado ao nível de equipamento, enquanto que a “causa da falha” deve estar relacionado ao nível mais baixo dentro da hierarquia do equipamento. Da mesma forma, modos de falha são identificados e relacionados ao nível de equipamento e subsistemas, enquanto suas causas devem ser relacionadas a níveis mais baixos .

Sugere-se na ISO 14.224 (1999) que num banco de dados a ser desenvolvido, cada equipamento seja decomposto em uma hierarquia de três níveis, como mostrado na Figura 3.2, onde os componentes no último nível correspondem aos itens passíveis de manutenção (reparo ou substituição). Desta forma, ao se coletar os dados, tem-se uma descrição consistente do evento com a explícita associação do dado de falha ou manutenção coletado e o componente, subsistema ou sistema ao qual esse dado se refere.

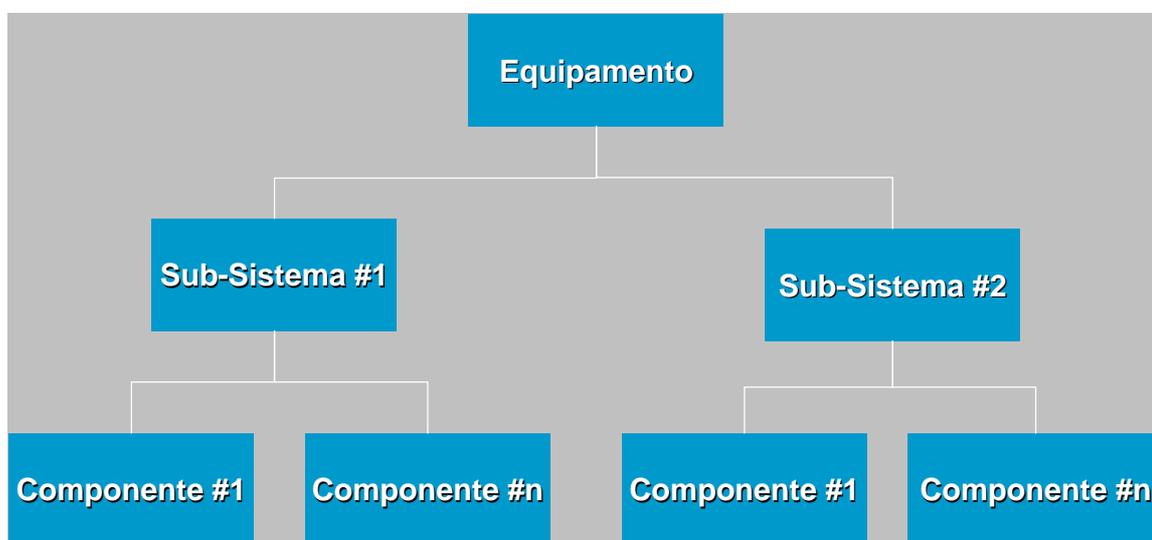


Figura 3.2 Hierarquia do Sistema

### 3.1.2 Estrutura do Banco de Dados

Para uma determinada classe de equipamento (ex.: válvulas, sensores, etc.) o banco de dados de confiabilidade deve compreender três categorias de dados de acordo com a ISO 14.224 (1999):

- Informações sobre equipamentos (inventário);
- Dados de falha;
- Dados de manutenção.

A cada uma dessas categorias corresponde um tipo de arquivo a ser guardado no banco de dados. As informações sobre equipamentos contêm a descrição de cada unidade de uma determinada classe de equipamento, como por exemplo, um sensor. Dados serão coletados

para cada unidade fisicamente instalada no campo. Esta descrição contém dados técnicos, como tamanho, capacidade, assim como dados relevantes sobre condições de operação e ambientais (modo de operação, vibrações, etc.). Para cada unidade física do equipamento, um registro é armazenado no arquivo de informações sobre os equipamentos catalogados no banco de dados, como ilustrado na Figura 3.3.

O arquivo de dados de falhas contém todos os eventos de falhas ocorridos com um determinado equipamento no campo durante o período de observação (coleta de dados). Um registro é utilizado para cada evento de falha de um equipamento. Os eventos de falha estão sempre relacionados com um único registro do arquivo de informações sobre equipamentos.

O arquivo de dados de manutenção contém informações sobre as atividades de manutenção corretiva e preventiva sendo realizadas em um determinado equipamento no campo, como por exemplo, procedimentos de manutenção e horas gastas em atividades de manutenção. Dessa maneira, a manutenção preventiva está sempre relacionada com um registro do arquivo de informações do equipamento, enquanto que a manutenção corretiva está associada a registros de falhas. Observa-se ainda que uma falha pode estar relacionada a mais de uma atividade de manutenção corretiva. Esta situação é relevante se a primeira ação de manutenção corretiva não solucionou o problema e uma segunda ação foi então necessária.

A estrutura do banco de dados e a inter-relação entre os vários arquivos acima descritos estão ilustrados na Figura 3.3.

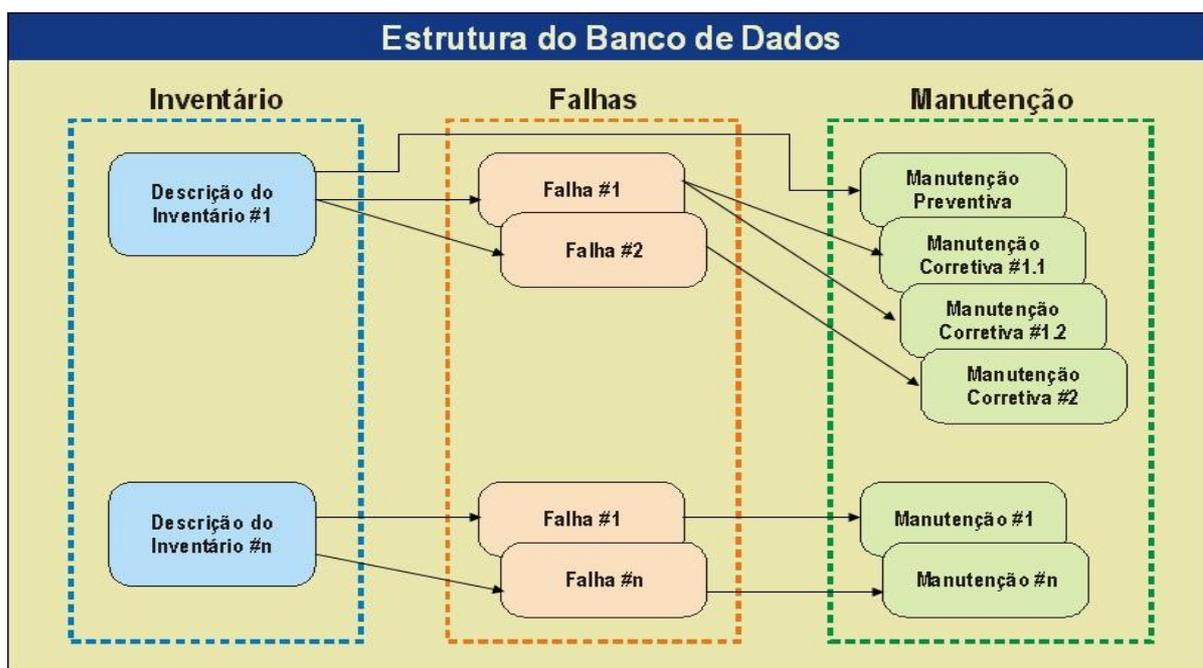


Figura 3.3 Estrutura do Banco de Dados

### 3.1.3 Organização e Descrição dos Dados

Na implementação da taxonomia, equipamentos são categorizados em Classes de Equipamentos, como sensores, válvulas, etc. Cada unidade fisicamente instalada em um sistema é denominada como Unidade de Equipamento ou simplesmente Unidade como, por exemplo, uma determinada válvula ou um sensor instalado.

Como discutido na seção anterior, para cada unidade fisicamente instalada de uma classe de equipamento no banco de dados, devem-se coletar dados referentes às características do equipamento em si, dados relacionados com eventos de falha e dados relacionados com atividades de manutenção corretiva e preventiva.

#### 3.1.3.1 Informações sobre Equipamentos

As informações sobre uma unidade de uma classe de equipamento são decompostas em uma série de características:

- Identificação:
  - Localização
  - Classificação
  - Instalação
  - Dados do equipamento
- Projeto:
  - Dados do fabricante
  - Especificações de projeto
- Aplicação:
  - Operação
  - Condições ambientais

A descrição detalhada dessas categorias é apresentada na Tabela 3.1 a seguir:

Tabela 3.1 Informações sobre Equipamentos

<b>Categorias</b>	<b>Subcategorias</b>	<b>Informações</b>
Identificação	Localização	Número de TAG
	Classificação	Classe (válvulas, filtros, etc.)
		Tipo (esférica, alívio, etc.)
		Aplicação (processamento de gás, injeção, etc.)
	Instalação	Categoria de Operação (manual, controle remoto, etc.)
		Data da Instalação
	Dados do Equipamento	Código (nomenclatura)
Número de Série		
Redundância (n. de unidades redundantes)		
Projeto	Dados do Fabricante	Nome do Fabricante
		Modelo
	Especificações de Projeto	Dependente da Classe de Equipamento (capacidade, pressão, etc.)
Aplicação	Operação	Configuração de Redundância
		Modo de Operação (Contínua, <i>standby</i> , intermitente)
		Data de Entrada em Operação
		Tempo Atual de Operação (tempo de calendário)
		Tempo Atual Operacional Acumulado
		Número Atual de Demandas Acumulado
	Condições Ambientais	Condições Operacionais (depende da classe do equipamento: pressão, potência, vazão, etc)
		Condição Ambiental (severa, moderada, leve) <sup>1</sup>
		Condição Ambiental Interna (severa, moderada, leve) <sup>2</sup>
Observações	Informações Adicionais	Observações dos operadores, engenheiros, etc.

<sup>1</sup> Considerar: vibração, poeira, fluidos corrosivos externos, calor, umidade, etc.  
<sup>2</sup> Considerar: fluidos corrosivos internos, calor, umidade, etc.

### 3.1.3.2 Dados de Falha

Os dados de falha de cada unidade de equipamento são decompostos nas seguintes categorias:

- Identificação:
  - Registro de falha
  - Identificação do equipamento

- Dados de falha:
  - Data da falha
  - Modo de falha
  - Impacto da falha na operação
  - Classe de severidade
  - Descrição da falha
  - Causa da falha
  - Subsistema falho
  - Componentes falhos (passíveis de manutenção)
  - Método de detecção

A Tabela 3.2 apresenta a descrição detalhada dessas categorias.

**Tabela 3.2 Dados de Falha**

<b>Categorias</b>	<b>Dados</b>	<b>Descrição</b>
Identificação	Registro de Falha	Identificação Única da Falha
	Identificação do Equipamento	Número de TAG
Dados de Falha	Data da Falha	Data de Detecção da Falha
	Modo de Falha	Em Nível de Equipamento
	Impacto da Falha na Operação	Zero, Parcial, Total.
	Classe de Severidade	Impacto na Função do Equipamento (Incipiente, Degradada, Crítica)
	Descrição da Falha	Mecanismo de Falha (vibração, vazamento, corrosão, fadiga, etc.).
	Causa da Falha	Relacionada à: Projeto, Instalação, Operação, Manutenção, Administração.
	Subsistema Falho	Nome do Subsistema falho
	Componentes Falhos (passíveis de manutenção)	Nome dos Componentes Falhos
	Método de Detecção	Como a Falha foi Detectada (Manutenção Preventiva, Teste Funcional, Inspeção, etc)
Observações	Informações Adicionais	Observações dos operadores, engenheiros, etc.

Pode-se observar que as classes de severidade utilizadas na taxonomia do banco de dados (crítica, degradada, incipiente), na Tabela 3.2 acima, são um subconjunto das classes de severidade definidas na construção da FMEA na seção 2.3 e utilizadas posteriormente na aplicação. Uma vez que as métricas de confiabilidade a serem estimadas no banco de dados serão obtidas para modos de falha categorizados de acordo com o seu impacto apenas nas funções do equipamento, restringem-se as classes de severidade na taxonomia do banco de

dados àquelas classes que incluem conseqüências apenas sobre as funções do sistema analisado.

### 3.1.3.3 Dados de Manutenção

Os dados de manutenção são também decompostos no seguinte conjunto de categorias:

- Identificação:
  - Registro de manutenção
  - Identificação do equipamento
  - Registro de falha
- Dados de manutenção:
  - Data da manutenção
  - Tipo de manutenção
  - Atividade de manutenção
  - Impacto da manutenção na operação
  - Subsistema mantido
  - Componentes mantidos
- Recursos de manutenção:
  - HH (hora-homem) de manutenção por tipo de atividade
  - HH total
- Tempo em manutenção:
  - Tempo de manutenção ativa
  - Tempo indisponível

A descrição detalhada dessas categorias é mostrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Dados de Manutenção

<b>Categorias</b>	<b>Dados</b>	<b>Descrição</b>
Identificação	Registro de Manutenção	Identificação Única da Manutenção
	Identificação do Equipamento	Número de TAG
	Registro de Falha	Identificação da Falha Correspondente (Manutenção Corretiva)
Dados de Manutenção	Data da Manutenção	Data de Início da Manutenção
	Tipo de Manutenção	Preventiva, Corretiva
	Atividade de Manutenção	Tipo de Atividade (Substituição, Reparo, Ajuste, Teste, Inspeção, etc)
	Impacto da Manutenção na Operação	Zero, Parcial, Total
	Subsistema Mantido	Nome do Subsistema em Manutenção
	Componentes mantidos	Nome dos Componentes em Manutenção
Recursos de Manutenção	HH por Tipo de Atividade	HH por Atividade (mecânica, elétrica, etc)
	HH Total	Duração Total da Manutenção (HH)
Tempo Em Manutenção	Tempo de Manutenção Ativa	Tempo de Duração da Manutenção no Equipamento
	Tempo Indisponível	Duração do Intervalo de Tempo no qual o Equipamento está Indisponível
Observações	Informações Adicionais	Observações dos operadores, engenheiros, etc.

### 3.1.4 Identificação e Classificação dos Modos de Falha

Estimativas de taxas de falha ou outras métricas de confiabilidade podem ser realizadas em diferentes níveis hierárquicos, como ilustrado na Figura 3.2. A escolha do nível a ser conduzida a análise deve determinar a estratégia da coleta de dados a ser desenvolvida influenciando, por exemplo, o número de níveis na decomposição hierárquica de uma classe de equipamento e o processo de identificação dos modos de falha, mecanismos e causas.

A análise de falha com a identificação dos modos de falha de cada classe de equipamento é de fundamental importância para o desenvolvimento do banco de dados. De fato, dados de falhas e dados de manutenção devem ser coletados para os modos de falha considerados relevantes para o funcionamento de um sistema. A partir desses dados coletados, caracterizados por modo de falha, posteriormente são obtidas métricas de confiabilidade para cada modo de falha.

Os modos de falha são, portanto, determinantes para o processo de coleta de dados e estimativa de métricas de confiabilidade. A depender das características operacionais de uma classe de equipamento, diferentes métricas de confiabilidade podem ser definidas para períodos de exposição relacionados ao tempo e relacionados a demandas.

Algumas formas de classificar modos de falha, com diferentes graus de detalhamento, são possíveis. Em AICHE/CCPS (1998) sugere-se metodologia para gerar, sistematicamente, modos de falhas com base no conhecimento de todas as possíveis funções do equipamento. Neste tipo de abordagem, também conhecido como *data farming*, os modos de falha são observados a partir de desvios das funções. Por outro lado parece “não haver nenhum procedimento formal que possa ser usado para identificar e classificar todos os possíveis modos de falha” (RAUSAND & OIEN, 1996).

Além das características funcionais e de projeto de cada equipamento, existem condições, ou fatores de taxonomia, com potencial para determinar o comportamento da falha. Esses fatores estão ligados às condições de uso do equipamento, ou seja, condições ambientais ou externas e condições de operação.

As condições ambientais incluem a temperatura externa, umidade, vibração, corrosão externa ou qualquer outra condição externa imposta aos equipamentos. Condições de operação referem-se ao modo de operação e a severidade do processo. Os modos de operação descrevem como o equipamento é operado (contínuo, *standby*, alternado). Cada um destes fatores atua sobre os diferentes modos de falha de cada componente com diferentes graus de importância.

Existem diversas técnicas de confiabilidade para a identificação dos modos de falha, mecanismos e causas associadas. Dentre essas, destaca-se a técnica *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), discutida no capítulo 2, e adotada nesta metodologia.

### **3.2 Quantificação de Métricas de Confiabilidade**

Nesta seção é apresentada uma metodologia para a obtenção de métricas de confiabilidade a partir dos dados de campo coletados seguindo a taxonomia desenvolvida nas seções anteriores, e que tem sido utilizada com sucesso em alguns contextos, como na exploração e produção de óleo e na indústria automobilística (GROEN & DROGUETT, 2003).

Sendo assim, é discutida a metodologia Bayesiana com o objetivo de utilizá-la como uma forma de quantificação de métricas de confiabilidade e assim abranger sua utilização para a avaliação de dados de falha coletados para os diversos equipamentos que compõem o banco de dados.

Inicia-se esta seção com uma breve discussão sobre o conceito de probabilidade subjetiva, introduzindo então o teorema de Bayes. Em seguida, são discutidas as atualizações de distribuições discretas e contínuas assim como o processo de atualização sequencial. A

apresentação da metodologia é finalizada nas duas seções seguintes com a apresentação do tratamento Bayesiano de informações provenientes de populações homogêneas e não-homogêneas.

### 3.2.1 Interpretação Subjetiva da Probabilidade

De acordo com a escola subjetivista (Bayesiana), probabilidade é o grau de confiança na veracidade de uma proposição. Uma proposição é uma sentença que pode, em princípio, ser provada como verdadeira ou falsa. Por exemplo, as sentenças “Vai chover amanhã” e “ $2 + 2 = 4$ ” são ambas proposições válidas sujeitas a verificação através de observações ou deduções lógicas (verificações experimentais ou teóricas). Entretanto, a sentença “Pode vir a chover amanhã” não é uma proposição uma vez que a sua veracidade ou falsidade nunca pode ser demonstrada. Em geral, uma proposição é uma sentença cujas respostas possíveis são “sim” ou “não”.

A filosofia Bayesiana ou subjetiva atribui ao valor da probabilidade o grau de confiança ou crença de um indivíduo.

O grau de confiança é uma medida ou indicação do conhecimento que um determinado indivíduo possui sobre uma proposição ou evento sendo, portanto, subjetiva e pessoal (MARTZ & WALLER, 1982). É uma medida de incerteza (ou certeza) e, logo, uma representação do estado mental e não do mundo exterior. Entretanto, o grau de confiança é objetivo no sentido de que codifica um estado mental objetivo do indivíduo e representa seu grau de conhecimento.

Na escola subjetivista, probabilidade como uma entidade objetiva externa aos estados mentais dos indivíduos não existe. Contudo, quaisquer dois indivíduos com o mesmo nível de conhecimento, informação e tendências tendem a associar a mesma informação probabilística para a veracidade de uma dada proposição. O único requisito é coerência, ou seja, segundo Firmino *et al* (2005), a probabilidade subjetiva de um indivíduo deve ser consistente com o seu corpo de conhecimento e deve obedecer aos axiomas da teoria de probabilidade.

### 3.2.2 Teorema de Bayes

Engenheiros e projetistas são freqüentemente deparados com situações caracterizadas pela falta de dados relevantes para a avaliação da confiabilidade de produtos. Esta situação é ainda mais acentuada nas etapas em que o produto encontra-se em desenvolvimento. Por exemplo, se apenas algumas poucas unidades podem ser testadas até falharem devido ao alto custo das mesmas ou restrições impostas por prazos de produção, os tradicionais métodos gráficos (papéis de probabilidade), ou mesmo procedimentos da estatística clássica, não são

mais tão úteis na avaliação da confiabilidade do produto. Em geral, os intervalos de confiança são muito largos, resultando assim, em uso limitado dos resultados obtidos.

As dificuldades encontradas na utilização de métodos estatísticos tradicionais tem sido em grande parte os responsáveis pelo grande sucesso da avaliação de confiabilidade através do método Bayesiano. A base para este procedimento se origina a partir do trabalho do reverendo Thomas Bayes publicado em 1763 dois anos após a sua morte. O método é extremamente útil em confiabilidade e tem experimentado de grande popularidade em diversas áreas de aplicações estatísticas.

Assim, através da aplicação da análise Bayesiana de confiabilidade é possível para o engenheiro usar informações provenientes de fontes distintas, como *handbooks* e opiniões de especialistas, na formulação de uma distribuição de probabilidade de algum parâmetro de interesse. Para um dado parâmetro, por exemplo a taxa de falha, os resultados podem ser sistematicamente atualizados à medida que novas informações se tornam disponíveis.

Dentre as vantagens em utilizar o método pode-se citar Droguett (2002):

- a redução de custos, devido à utilização de quaisquer dados disponíveis e não apenas dados estatísticos;
- informação realística para tomada de decisões, devido à incorporação de incertezas melhorando a qualidade da informação;
- atualização de dados à medida que uma nova informação se torna disponível, permitindo combinar dados de operação com outras informações relevantes que estejam disponíveis.

Uma simples visão do teorema de Bayes é apresentada através da teoria de probabilidade. Considere que se está interessado em um determinado evento  $A$ , como por exemplo o nível de confiabilidade a ser atingido por um equipamento, e que  $E$  represente alguma nova informação relevante a avaliação de  $A$ , como o resultado de um teste. Então, o teorema de Bayes estabelece que a probabilidade do evento  $A$  dada a nova evidência (dados)  $E$  é proporcional ao produto entre a probabilidade do evento  $A$  antes de se obter a nova informação  $E$ , e a probabilidade de observar a evidência  $E$  caso o evento  $A$  ocorresse. Ou seja,

$$P(A|E) = \frac{P(E|A)P(A)}{P(E)}$$

onde  $P(A)$  é conhecida como a *probabilidade a priori* de  $A$ , i.e., antes de se tomar conhecimento de  $E$ ;  $P(E|A)$  é a probabilidade de que a evidência  $E$  seja observada se  $A$  é realmente verdadeiro (ocorre); e  $P(A|E)$  é a probabilidade *a posteriori* de  $A$ , i.e, após se ter

obtido a nova informação representada por  $E$ . Logo,  $P(A/E)$  representa a probabilidade atualizada sobre o evento  $A$  uma vez que se obtém a informação adicional  $E$  relevante a  $A$ .

Em geral, entretanto, o interesse é na avaliação de atributos de confiabilidade ou parâmetros contínuos, como a taxa de falha ou o parâmetro de forma da distribuição de Weibull, por exemplo. Na forma contínua, o teorema de Bayes fica:

$$P(\theta | E) = \frac{L(E | \theta)\pi_o(\theta)}{\int_{\theta} L(E | \theta)\pi_o(\theta) d\theta}$$

onde  $\theta$  representa algum parâmetro de interesse. Como anteriormente,  $\pi_o(\theta)$  é a distribuição *a priori* sobre  $\theta$  representando a totalidade da informação disponível ao engenheiro sobre o parâmetro de interesse antes de se observar a nova evidência  $E$  (como resultados de testes);  $L(E | \theta)$  é análoga a  $P(E/A)$  e também conhecida como *função de verossimilhança*. Note que a informação representada por  $E$  convencionalmente está na forma de dados empíricos (como testes). Isto não é necessariamente obrigatório. Como será visto nas próximas seções, outras fontes de informação também podem ser utilizadas para se obter avaliações atualizadas de um certo atributo de confiabilidade como, por exemplo, opiniões de especialistas (engenheiros de projeto) e dados não completamente relevantes.

O teorema de Bayes é uma ferramenta ideal para serem realizadas atualizações sucessivas do que se sabe sobre a confiabilidade (ou qualquer outro parâmetro de interesse) de um determinado item à medida que novas informações se tornam disponíveis.

Basicamente, a distribuição *a posteriori* de hoje torna-se a distribuição *a priori* de amanhã. O processo de atualização pode ser expresso da seguinte forma:

*Informação a Priori x Novas Observações → Conhecimento a Posteriori*

### 3.2.3 Tratamento de Dados

A distribuição *a priori* reflete as convicções do analista relativo a um estado de conhecimento atual, antes de ocorrer a atualização da evidência. Pode ser, em alguns casos, a distribuição *a posteriori* antes do último cálculo de atualização. São geralmente representadas por distribuições Beta, Gamma, Normal ou Lognormais. A seguir, com mais detalhes, as distribuições de maior relevância neste trabalho:

- Distribuição Beta:

É utilizada para representar distribuições *a priori* em estudos de confiabilidade Bayesiana. Seu formato irá depender dos valores atribuídos aos parâmetros de distribuição  $a$  e

b. Geralmente empregada na análise de probabilidades de falha. Sua função de densidade de probabilidade é apresentada por:

$$B(x/a, b) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad \text{onde } (0 \leq x \leq 1) \text{ e } b > a > 1$$

▪ **Distribuição Gamma:**

É utilizada em problemas onde o tempo de ocorrência de um evento é importante, como por exemplo a modelagem de tempo de falha. Tem parâmetros de distribuição de escala ( $\alpha$ ) e de forma ( $\beta$ ). Ambos não negativos e é representada por:

$$G(x/\alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \quad \text{onde } (0 \leq x \leq \infty) \text{ e } \Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \text{ para } \alpha \geq 0$$

▪ **Distribuição Lognormal:**

É apropriada para aplicações envolvendo tempo de falha de sistemas, cujas falhas recentes dominam o comportamento do processo de falha, ou seja, a maioria das probabilidades de falha concentra-se para valores iniciais do tempo operacional. É indicada na modelagem de sistemas que apresentam desgaste (*stress*, fadiga e corrosão). Também é uma distribuição adequada para análises em manutenibilidade. É representada por:

$$Ln(x/\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \ln \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad \text{onde } (0 \leq x \leq \infty), (-\infty \leq \mu \leq \infty), \sigma^2 > 0$$

A construção da função verossimilhança requer conhecimentos específicos do processo a ser modelado, bem como que tipo de distribuição de probabilidade será apropriado para modelagem. As distribuições Binomial, Poisson, Normal e Lognormal são geralmente as mais utilizadas na representação da verossimilhança. As distribuições mais usadas são:

▪ **Distribuição Binomial:**

É geralmente utilizada para modelar processos na qual eventos são baseados na demanda. Indicada para tratamento de eventos independentes e sistemas onde não existe desgaste, ou seja, são atributos constantes com o passar do tempo. Apresentada na forma:

$$\Pr(k / N, x) = \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \quad \text{onde} \quad \binom{N}{k} = \frac{N!}{(N-k)!k!}$$

$k$  significa o número de vezes que o evento de interesse ocorre em  $N$  oportunidades;

- **Distribuição Poisson:**

É comumente usada para modelar processos com base no tempo, assumindo que os eventos de interesse estão aleatoriamente e igualmente dispersados no tempo. Também indicada para tratamento de eventos independentes e sistemas onde não existe desgaste. Sendo  $\lambda T$  o parâmetro da distribuição de probabilidade, tem-se:

$$\Pr(k / T, \lambda) = \frac{(\lambda T)^k e^{-\lambda T}}{k!}$$

onde  $k$  significa o número de eventos em  $T$  unidades de tempo, dado a taxa de ocorrência do evento  $\lambda$ .

### 3.2.3.1 Pares Conjugados

Determinadas famílias de distribuição paramétricas, quando utilizadas como distribuições de probabilidade *a priori* em conjunto com tipos específicos de funções de verossimilhança, na modelagem por Bayes, fornecem distribuições *a posteriori* resultantes da mesma família. São chamados distribuições conjugadas os parâmetros de distribuição *a posteriori*, resultantes de funções simples dos parâmetros de distribuição *a priori* e da função verossimilhança (Droguett, 2002), como apresentadas no exemplo a seguir:

**Tabela 3.02 – Pares Conjugados**

Distribuição <i>a Priori</i>	Função de Verossimilhança	Distribuição <i>a Posteriori</i>
Beta	Binomial	Beta
Gamma	Poisson	Gamma
Lognormal	Lognormal	Lognormal

- **Par Beta-Binomial:**

É a distribuição Beta *a priori* conjugada com a distribuição Binomial usada para representar a verossimilhança, utilizada normalmente para estimação de probabilidades de falha. Pelo teorema de Bayes temos:

$$\begin{aligned} \text{Distribuição } a \text{ posteriori} &= \frac{P(k/N, x)B(x/a, b)}{\int_0^1 P(k/N, x)B(x/a, b)dx} = \\ &= \frac{\binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \cdot \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}}{\int_0^1 \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \cdot \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} dx} = \frac{x^{k+a-1} (1-x)^{N-k+b-1}}{\int_0^1 x^{k+a-1} (1-x)^{N-k+b-1} dx} \\ \text{Usando o artifício: } &\begin{matrix} a' = a + k \\ b' = N - k + b \end{matrix} \text{ temos: } \frac{x^{a'-1} (1-x)^{b'-1}}{\int_0^1 x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx} \end{aligned}$$

Sendo a distribuição Beta uma distribuição densidade de probabilidade, então:

$$\int_0^1 \frac{\Gamma(a'+b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')} x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx = 1 \text{ então: } \int_0^1 x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx = \frac{1}{\frac{\Gamma(a'+b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')}}$$

Por fim, a distribuição à posteriori é dada por:

$$B(x/a', b') = \frac{\Gamma(a'+b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')} x^{a'-1} (1-x)^{b'-1}$$

▪ Par Gamma-Poisson:

É a distribuição Gamma *a priori* conjugada com a distribuição Poisson que representa a verossimilhança, utilizada geralmente para estimação de taxas de falhas de sistemas. Através da mesma metodologia aplicada ao par Beta-binomial, chega-se a seguinte expressão da distribuição *a posteriori*:

$$G'(\lambda/\alpha', \beta') = \frac{\beta'^{\alpha'}}{\Gamma(\alpha')} \lambda^{\alpha'-1} e^{-\beta'\lambda} \quad \text{onde } \begin{matrix} \alpha' = \alpha + k \\ \beta' = \beta + T \end{matrix}$$

▪ Par Lognormal-Lognormal:

É a distribuição Lognormal *a priori* conjugada a outra distribuição Lognormal representando a verossimilhança. Normalmente empregada para estimar taxas de falha quando os dados são provenientes de opinião de especialista. Analogamente ao desenvolvimento da expressão anterior, a distribuição *a posteriori* é dada por:

$$Ln(x / \mu', \sigma') = \frac{1}{\sigma' x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln x - \ln \mu'}{\sigma'} \right]^2 \right]$$

### 3.2.4 Tratamento de Dados de Populações Homogêneas

Aqui o termo homogêneo significa idêntico com respeito a alguma característica de interesse. Por exemplo, se todos os membros de uma população de componentes possuírem a mesma taxa de falha, esta população é considerada como sendo homogênea com relação ao atributo taxa de falha. Estes tipos de populações são obtidos a partir de sistemas ou componentes que tenham estado em operação sob as mesmas condições ambientais e operacionais. Desta forma, é possível realizar uma atualização seqüencial na qual os dados provenientes de um subconjunto da população são utilizados para atualizar o estado de conhecimento obtido com base em dados de um outro subconjunto desta população. Este processo é repetido até que dados de todas as sub-populações sejam incorporados à distribuição do estado de conhecimento sobre a variável de interesse. Assim, é possível somar os números de falhas e os tempos em operação contidos nas sub-populações e então atualizar a estimativa da taxa de falha via o teorema de Bayes usando o número de falhas e o tempo operacional agregados.

A seção seguinte apresentará de maneira mais detalhada o processo de atualização seqüencial para dados provenientes de uma *população homogênea*.

#### 3.2.4.1 Atualizando Distribuições de Probabilidade

O estado atual de conhecimento sobre uma quantidade desconhecida  $X$ , representada por sua distribuição de probabilidade, pode mudar quando uma nova evidência  $E$  for obtida. O teorema de Bayes é usado para obter o estado de conhecimento atualizado ou *a posteriori* dada esta nova informação.

- Atualizando Distribuições de Probabilidade Discretas

Se a distribuição de probabilidade discreta *a priori* de uma quantidade desconhecida  $X$  é  $P_o(x_i)$  para  $i = 1, \dots, n$ , então a *distribuição de probabilidade a posteriori*, dada a informação  $E$ , é obtida a partir de

$$P(x_i | E) = \frac{P(E | x_i) \cdot P_o(x_i)}{P(E)}$$

onde  $i = 1, \dots, n$  e  $P(E | X_i)$  é a função de verossimilhança da evidência quando a variável aleatória assume o valor  $x_i$ . A grandeza

$$P(E) = \sum_{i=1}^n P(E | x_i) \cdot P_o(x_i)$$

corresponde a probabilidade total de  $E$  baseada na distribuição *a priori* de  $X$ .

- Atualizando Distribuições Contínuas de Probabilidade

A distribuição de probabilidade *a priori* de uma quantidade contínua,  $P_o(x)$ , pode ser atualizada para incorporar uma nova evidência (informação)  $E$  como segue:

$$P(x | E) = \frac{L(E | x) \cdot P_o(x)}{k}$$

onde  $P(x | E)$  é a distribuição de probabilidade *a posteriori* da quantidade  $X$  dada a evidência  $E$ ,  $L(E | x)$  é a probabilidade da evidência  $E$  assumindo que o valor da quantidade é  $X = x$ , e  $k$  é dado por:

$$k = \int_x L(E | x) \cdot P_o(x) \cdot dx$$

Note que  $k = P(E)$  corresponde a um fator de normalização tal que  $\int_x P(x | E) \cdot dx = 1$ .

- Atualização Sequencial

O teorema de Bayes fornece um eficiente mecanismo para a atualização do estado de conhecimento quando a informação disponível é acumulada em partes ou em etapas. Este processo de atualização pode ser realizado sequencialmente e em estágios correspondendo às etapas nas quais as diversas porções de informação se tornarem disponíveis. Se o total de informação for equivalente a soma de suas partes, então o resultado final, i.e., a distribuição *a posteriori*, é a mesma independente de se esta for obtida em etapas (através de diversas aplicações do teorema de Bayes) ou em apenas um passo (através da aplicação do teorema de Bayes com toda a informação acumulada).

De fato, suponha que duas porções de informação  $E_1$  e  $E_2$  estejam disponíveis sobre um determinado evento  $A$ . Pode-se utilizar  $E_1$  e  $E_2$  na mesma seqüência em que são fornecidas, ou seja, primeiro  $E_1$  e depois  $E_2$ . Quando  $E_1$  é incorporada ao corpo de conhecimento, tem-se

$$P(A | E_1) = \frac{P(E_1 | A) \cdot P(A)}{P(E_1)}$$

A distribuição atualizada  $P(A | E_1)$  é agora novamente atualizada quando  $E_2$  for disponibilizada:

$$P(A | E_1 \cdot E_2) = \frac{P(E_2 | A \cdot E_1) \cdot P(A | E_1)}{P(E_2)}$$

logo,

$$P(A | E_1 \cdot E_2) = \frac{P(E_2 | A \cdot E_1)}{P(E_2)} \cdot \frac{P(E_1 | A)}{P(E_1)}$$

o que resulta em

$$P(A | E_1 \cdot E_2) = \frac{P(E_1 \cdot E_2 | A) \cdot P(A)}{P(E_1 \cdot E_2)}$$

Este resultado é equivalente a atualização em um único estágio da distribuição de probabilidade do evento  $A$  dada a ocorrência da evidência combinada  $E_1 \cdot E_2$ . Isto pode ser facilmente verificado ao escrever o teorema de Bayes para o conjunto total de dados disponíveis  $E_1 \cdot E_2$  a partir de uma distribuição *a priori*  $P(A)$ :

$$P(A | E_1 \cdot E_2) = \frac{P(E_1 \cdot E_2 | A) \cdot P(A)}{P(E_1 \cdot E_2)}$$

É importante notar que os dois conjuntos de dados são considerados independentes.

Desta forma, pode-se dizer que o teorema de Bayes é aditivo e que a seqüência em que o processo de atualização é realizado não impacta o resultado obtido uma vez que:

$$P(A | E_1 \cdot E_2) = P(A | E_2 \cdot E_1)$$

Alternativamente, os dados de todas as sub-populações podem ser adicionados e então usá-las em uma única aplicação do teorema de Bayes para obter o estado de conhecimento a posteriori representando a informação acumulada. Ambos os resultados são idênticos desde que os dados disponíveis representem a mesma característica das sub-populações da população homogênea.

### 3.2.5 Tratamento de Dados de Populações Não-Homogêneas

Na maioria das situações, entretanto, não se possui populações homogêneas. Amostras provenientes de sistemas ou componentes submetidos a diferentes condições operacionais e ambientais, com diferenças de projeto e nos processos produtivos, apresentam diferentes características de confiabilidade. Eles podem apresentar distintos modos de falha, taxas de reparo e taxas de falha. Por exemplo, variações nos procedimentos de manutenção e nas práticas de confiabilidade de diferentes fornecedores de gás natural podem acarretar em distintas taxas de falha em válvulas de controle de pressão idênticas. Similarmente, variações nas práticas de manutenção e confiabilidade de diferentes companhias aéreas podem levar a diferentes taxas de falha de motores idênticos de aeronaves.

Nesses casos, não é realístico assumir que todos os itens de uma população composta de diferentes amostras (ou sub-populações) possuam as mesmas características de confiabilidade (taxa de falha, taxa de reparo, probabilidade de falha sob demanda). Tem-se uma variabilidade intrínseca da característica de confiabilidade entre as amostras. Diz-se que a população é *não-homogênea*.

Em outras palavras, a taxa de falha ou qualquer outro parâmetro de confiabilidade é intrinsecamente diferente de amostra para amostra dentro da mesma população. Esta é a *variabilidade populacional* da característica de confiabilidade de interesse. É importante notar que tal variabilidade é uma característica do sistema e não é simplesmente modificada ou removida com o aumento da quantidade de informação. Somente irá mudar se o próprio atributo de confiabilidade do item mudar.

#### 3.2.5.1 Análise Bayesiana de Variabilidade Populacional

Um problema comum no campo de confiabilidade e do risco é a avaliação da taxa de falha, ou da probabilidade de falha, de um sistema ou de um componente específico. O procedimento de avaliação Bayesiana convencional consiste na atualização a partir de alguma distribuição de probabilidade *a priori* baseada na evidência obtida para o sistema específico. O procedimento da avaliação resulta em uma distribuição *a posteriori*, que segundo Singpurwalla (1988), reflete o estado atualizado da incerteza sobre a taxa de falha ou a probabilidade de falha.

Na apresentação de seu procedimento bayesiano, Kaplan (1983) introduziu um método para a construção de distribuições *a priori* usado amplamente na indústria, chamado evidência parcialmente relevante. Esta evidência parcialmente relevante consiste em dados obtidos de sistemas ou aplicações similares ao sistema e à aplicação de interesse. Devido às diferenças de

projeto e condições operacionais, tais sistemas são similares ainda que apresentem diferentes comportamentos de confiabilidade. A construção *a priori* ocorre baseada na noção de que na ausência da evidência diretamente relevante ao sistema de interesse, a incerteza sobre as características de confiabilidade do sistema corresponde à variabilidade das características de confiabilidade observada entre sistemas similares. Para uma revisão prática detalhada da estimação do parâmetro bayesiano, pode-se consultar a Siu & Kelly (1998).

As soluções ao problema mencionado acima, também chamado análise de variabilidade populacional, Bayes hierárquico, Bayes *empirical* Bayes, ou análise não-homogênea, envolvem tipicamente o uso de modelos de distribuição paramétrica tais como Lognormal para descrever a variabilidade. Os métodos de Bayes *empirical* Bayes, que incluem Porn (1996), Kaplan (1983) e Deely & Lindley (1981), tratam-no como um problema de inferência Bayesiana sobre os parâmetros destes modelos de distribuição.

Portanto, a verdadeira distribuição de variabilidade populacional pode ser apresentada como um membro de uma determinada família de modelos de distribuição paramétrica. Quando existe incerteza na proposição da distribuição de variabilidade populacional, esta incerteza é expressa na forma de uma distribuição de probabilidade sobre os membros da mesma família de modelos de distribuição paramétrica. Uma possível estimativa da densidade de variabilidade populacional é dada pela média:

$$\hat{p}(x) = \int \dots \int_{\theta_1, \dots, \theta_r} \varphi(x/\theta_1, \dots, \theta_r) \cdot \pi(\theta_1, \dots, \theta_r) \cdot d\theta_1, \dots, d\theta_r \quad [ 1 ]$$

que consiste na representação de uma “mistura” de distribuições do modelo escolhido, onde o modelo da distribuição de variabilidade paramétrico é representado por  $\varphi(x/\theta_1, \dots, \theta_r)$  e  $\pi(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$  representa a incerteza sobre a distribuição de variabilidade. Tem-se que a distribuição da incerteza sobre o espaço de  $\varphi(x/\underline{\theta})$ , onde  $\underline{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_r)$ , é a mesma de que a incerteza sobre os valores de  $\underline{\theta}$ , uma vez que para cada valor de  $\underline{\theta}$  existe um único  $\varphi(x/\underline{\theta})$  e vice-versa. Portanto, o objetivo de estimar  $\varphi(x/\underline{\theta})$  fica então reduzido a estimar  $\underline{\theta}$ . Considerando que o estado de conhecimento *a priori* sobre  $\underline{\theta}$  é representado pela distribuição de probabilidade  $\pi_o(\underline{\theta})$ , e dada a evidência disponível  $E$ , nós usamos o teorema de Bayes para encontrar a distribuição de probabilidade a posteriori sobre  $\underline{\theta}$ :

$$\pi(\underline{\theta} | E) = \frac{L(E | \underline{\theta}) \cdot \pi_o(\underline{\theta})}{\int_{\underline{\theta}} L(E | \underline{\theta}) \cdot \pi_o(\underline{\theta}) \cdot d\underline{\theta}} \quad [ 2 ]$$

onde  $L(E|\underline{\theta})$  é a verossimilhança da evidência  $E$  dado  $\underline{\theta}$ , e  $\pi(\underline{\theta}|E)$  é a distribuição de probabilidade *a posteriori* de  $\underline{\theta}$  dado  $E$ .

A análise da distribuição de variabilidade populacional, pode ser utilizada como uma técnica para construção da distribuição *a priori* do parâmetro de confiabilidade de interesse ( $X$ ), baseada nos seguintes tipos de informação tais como:

- $E_0$  - análise de estados de conhecimento *a priori*, obtidos de experiência de engenheiros com o item (sistema ou componente) em estudo;
- $E_1$  - dados de exposição, obtidos em experiências de operação com sistemas semelhantes em aplicações similares;
- $E_2$  - estimativas ou distribuições baseadas em várias fontes, como banco de dados de confiabilidade e opiniões de especialistas.

A análise Bayesiana da variabilidade populacional tem a capacidade de utilizar dados oriundos de quaisquer das três fontes descritas acima, bem como agregar tais valores permitindo uma melhor avaliação do sistema.

Seja  $\pi(\theta_1, \dots, \theta_r / E_0, E_1, E_2)$  uma distribuição de probabilidade sobre os parâmetros do modelo de variabilidade  $\varphi(x / \theta_1, \dots, \theta_r)$ , onde  $(E_0, E_1, E_2)$  são as informações descritas acima. Então, a distribuição sobre  $X$  (medida de confiabilidade de interesse) do sistema específico, condicional a  $E_0, E_1, E_2$  e a nova evidência  $E_3$  (nova informação sobre o item específico) é dada por:

$$\pi(x / E_0, E_1, E_2, E_3) = \frac{P(E_3 / x, E_0, E_1, E_2) \cdot \int_{\underline{\theta}} \varphi(x / \underline{\theta}) \cdot \pi(\underline{\theta} / E_0, E_1, E_2) \cdot d\underline{\theta}}{\int_x P(E_3 / x, E_0, E_1, E_2) \cdot \int_{\underline{\theta}} \varphi(x / \underline{\theta}) \cdot \pi(\underline{\theta} / E_0, E_1, E_2) \cdot d\underline{\theta} dx} \quad [ 3 ]$$

onde  $\underline{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_r)$ .

A distribuição *a posteriori* da população de variabilidade paramétrica baseada nos dados  $E_0, E_1, E_2$  obtida através da aplicação do teorema de Bayes será:

$$\pi(\underline{\theta} / E_0, E_1, E_2) = \frac{P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0) \cdot \pi_0(\underline{\theta} / E_0)}{\int_{\underline{\theta}} P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0) \cdot \pi_0(\underline{\theta} / E_0) d\underline{\theta}} \quad [ 4 ]$$

onde  $P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0)$  é a verossimilhança da informação, e  $\pi_0(\underline{\theta} / E_0)$  é a distribuição de probabilidade *a priori* em  $\underline{\theta}$ . Assumindo que os dados de exposição ( $E_1$ ) e estimativas ( $E_2$ ) sejam independentes, a função de verossimilhança torna-se:

$$P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0) = P(E_1 / \underline{\theta}, E_0) \cdot P(E_2 / \underline{\theta}, E_0) \quad [ 5 ]$$

Além disso, escrevendo a equação acima em termos das verossimilhanças da informação de cada item, tem-se:

$$P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0) = \prod_{i=1}^n P(E_{1i} / \underline{\theta}, E_0) \cdot P(E_{2i} / \underline{\theta}, E_0) \quad [ 6 ]$$

onde  $P(E_{1i} / \underline{\theta}, E_0)$  e  $P(E_{2i} / \underline{\theta}, E_0)$  é a probabilidade de se observar a evidência  $E_{1i}$  e  $E_{2i}$ , respectivamente, para o  $i$ -ésimo item do total de  $n$  itens, assumindo que o conjunto de parâmetros da curva de variabilidade populacional é  $\underline{\theta}$ .

Observa-se que a medida da confiabilidade para o  $i$ -ésimo sistema,  $x_i$ , não é exatamente conhecida. Tudo que se sabe é que  $x_i$  é uma das possibilidades dos muitos valores da variável  $X$ . Além disso, de acordo com o modelo de variabilidade,  $X$  é distribuído de acordo com  $\varphi(x / \underline{\theta})$ , com  $\underline{\theta}$  também desconhecido. Conseqüentemente, calcula-se a probabilidade de observar a informação  $E_1$  e  $E_2$  por permitir que a medida de confiabilidade assuma todos os valores possíveis, isto é, calculando-se a média de  $P(E_{1i}, E_{2i} / \underline{\theta}, E_0)$  sobre a distribuição de  $X$ :

$$P(E_{1i}, E_{2i} / \underline{\theta}, E_0) = \int_x P(E_{1i} / \underline{\theta}, E_0) \cdot P(E_{2i} / \underline{\theta}, E_0) \cdot \varphi(x / \underline{\theta}) dx \quad [ 7 ]$$

que pode ser substituída na Eq. [ 6 ] para se obter a função de verossimilhança da informação total.

### 3.2.5.2 Mistura de Funções de Verossimilhanças

É uma técnica utilizada para melhor representar a função verossimilhança em análises de variabilidade populacional de uma medida de confiabilidade de interesse, onde é utilizado um conjunto de distribuições possíveis conjugadas para construção de uma função verossimilhança misturada, ao invés de utilizar uma única “melhor” distribuição para representação do modelo.

É geralmente utilizada em situações em que poucos dados de exposição são disponíveis ou não se encontram disponíveis. Neste caso, dados de opiniões de especialistas constituem uma valiosa informação, como também dados estimados de banco de dados de confiabilidade.

Para analisar a variabilidade populacional de uma medida de confiabilidade, é necessário especificar uma distribuição de probabilidade apropriada para descrever a medida de variabilidade de interesse  $\varphi(x / \underline{\theta})$ , como também a construção da verossimilhança  $P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0)$ .

Diferentes distribuições de verossimilhança podem ser empregadas dependendo da natureza da evidência. Por exemplo, sendo a avaliação da variabilidade populacional de uma

medida de interesse a taxa de falha ( $\lambda$ ) de um item, pode-se formalizar os tipos de informação ou evidência:

- $E_1$ : caso a evidência da taxa de falha seja obtida através de dados de exposição. A evidência  $\{(K_i, T_i), i = 1, \dots, n\}$  é adquirida através da observação do número de falhas ( $K_i$ ), do tempo de missão ( $T_i$ ) e do número total de amostras ( $n$ ). A distribuição de verossimilhança, descrevendo esta evidência, pode ser uma distribuição de Poisson:

$$P(K_i, T_i / \lambda) = \frac{(\lambda T_i)^{K_i}}{K_i!} e^{-\lambda T_i}. \text{ Porém, } \lambda \text{ é um dos possíveis valores da taxa de falha,}$$

representada pela distribuição de variabilidade populacional  $\varphi(\lambda / \underline{\theta})$ . Então, calcula-se a verossimilhança média sobre os possíveis valores de  $\lambda$  (Eq. [ 7 ]):

$$L(k_i, T_i / \underline{\theta}) = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda T_i)^{K_i}}{K_i!} e^{-\lambda T_i} \varphi(\lambda / \underline{\theta}) d\lambda \quad [ 8 ]$$

Se a distribuição de variabilidade populacional for uma distribuição Gamma, com parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , tem-se a verossimilhança Gamma-Poisson, representada por:

$$L(k_i, T_i / \alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda T_i)^{K_i}}{K_i!} e^{-\lambda T_i} \frac{\lambda^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \beta^{\alpha} e^{-\beta\lambda} d\lambda = \frac{T_i \Gamma(\alpha + K_i) \beta^{\alpha}}{K_i! \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta + T_i)^{\alpha + K_i}} \quad [ 9 ]$$

- $E_2$ : caso a evidência da taxa de falha seja obtida através de opinião de um especialista. A evidência é na forma de  $\{(\lambda_i^*, \sigma_i), i = 1, \dots, n\}$ , onde  $\lambda_i^*$  é a estimativa fornecida pela  $i$ -ésima fonte, e  $\sigma_i$  é o desvio padrão logarítmico que representa a incerteza da fonte  $i$ ; isto é, representa a medida subjetiva da confiança do analista no  $i$ -ésimo especialista. Utilizando-se a distribuição Lognormal para representar a verossimilhança e se a distribuição de variabilidade populacional for outra distribuição Lognormal, com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ , tem-se a verossimilhança Lognormal-Lognormal, representada por:

$$L(\lambda_i, \sigma_i / \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma^2}}} \frac{e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln \lambda_i - \mu}{\sigma^2 + \sigma_i^2} \right)^2}}{\sigma_i^2 \sigma \lambda_i \sqrt{2\pi}} \quad [ 10 ]$$

- $E_3$ : caso a evidência da taxa de falha seja obtida através de situações onde há vários dados providos de origens diferentes, como dados de testes ( $K_i, T_i$ ), dados de opinião de especialistas ( $\lambda_i^*, \sigma_i$ ), etc., diferentes verossimilhanças podem ser construídas de acordo com a natureza da evidência e com a escolha da distribuição de variabilidade populacional, originando em uma ‘mistura’ de verossimilhanças (Tabela 3.1):

**Tabela 3.1 Mistura de Verossimilhanças**

$\varphi(x/\underline{\theta})$ / Evidência	$(K_i, T_i)$	$(\lambda_i, \sigma_i)$	$(K_i, D_i)$
Gamma	Gamma-Poisson-Lognormal		
LogNormal	Lognormal-Poisson-Lognormal		
		Lognormal-Binomial-Lorgnormal	
Beta		Beta-Binomial-Lognormal	

**3.2.5.3 Modelo Lognormal-Poisson-Lognormal**

Suponha-se que o interesse é avaliar a variabilidade populacional da taxa de falha ( $\lambda$ ) de um item, e a fontes disponíveis de evidência são: dados observados do sistema em operação  $\{(K_i, t_i), i = 1, \dots, n\}$  e estimativas dadas por diferentes fontes (especialistas)  $(\lambda_i^*, \sigma_i)$ , onde  $\lambda_i^*$  e  $\sigma_i$  são definidos como antes. Considera-se que a variabilidade populacional do verdadeiro valor da taxa de falha ( $\lambda$ ) seja dada por uma distribuição Lognormal, isto é:

$$\varphi(\lambda/\nu, \tau) = \frac{1}{\lambda\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\lambda-\nu}{\tau}\right)^2} \quad [ 11 ]$$

Então, *a posteriori* da distribuição de variabilidade paramétrica pode ser escrita por:

$$\pi(\nu, \tau / E_0, E_1, E_2) = \frac{P(E_1, E_2 / E_0, \nu, \tau) \cdot \pi_0(\nu, \tau / E_0)}{\int_{\nu} \int_{\tau} P(E_1, E_2 / E_0, \nu, \tau) \cdot \pi_0(\nu, \tau / E_0) \cdot d\nu \cdot d\tau} \quad [ 12 ]$$

A construção da verossimilhança do tipo de informação  $E_I$ ,  $P(E_i, \underline{\theta}, E_0)$  para o i-ésimo sistema, caso seja conhecida a taxa de falha  $\lambda_i = \lambda$  de cada sistema, será dada por uma distribuição de Poisson:

$$P(K_i / t_i, \lambda, E_0) = \frac{(\lambda \cdot t_i)^{K_i} \cdot e^{-t_i \cdot \lambda}}{\Gamma(K_i + 1)} \quad [ 13 ]$$

Seguindo o modelo de erros multiplicativos de Mosleh (1983), a função verossimilhança para a i-ésima fonte estimada,  $P(E_{2i}, \underline{\theta}, E_0)$ , pode ser escrita em termos de uma distribuição Lognormal com mediana  $\ln \lambda$ , isto é:

$$P(\lambda_i^* / \sigma_i, \lambda, E_0) = \frac{1}{\sigma_i \lambda_i^* \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda_i^* - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2} \quad [ 14 ]$$

onde considera-se um dado obtido de um especialista imparcial, não viesado (MOSLEH, 1983).

Se  $\mu_i = \ln \lambda_i^*$ , reescreve-se a equação acima na forma:

$$P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) = P(\lambda_i^* / \sigma_i, \lambda, E_0) \left| \frac{d\lambda_i^*}{d\mu_i} \right|$$

e contanto que  $\left| \frac{d\lambda_i^*}{d\mu_i} \right| = e^{\mu_i}$ ,

$$P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) = \frac{1}{\sigma_i e^{\mu_i} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2} \cdot e^{\mu_i}$$

então,

$$P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2} \quad [ 15 ]$$

que é uma distribuição normal com média igual a  $\lambda$ .

Como só se sabe que  $\lambda$  é um dos possíveis valores da taxa de falha representada pela distribuição de variabilidade populacional  $\varphi(\lambda / \theta)$ , tem-se a verossimilhança média dada pela equação abaixo sobre todos os possíveis valores de  $\lambda$  a fim de calcular a probabilidade de dados incondicionais no desconhecido valor de  $\lambda$  (Eq. 7):

$$P(K_i, t_i, \mu_i, \sigma_i / \nu, \tau, E_0) = \int_{\lambda} P(K_i / t_i, \lambda, E_0) \cdot P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) \cdot \varphi(\lambda / \nu, \tau) d\lambda \quad [ 16 ]$$

onde consideram-se dados observados durante períodos de operação e evidência de estimativas como independentes. Nota-se também que a  $i$ -ésima estimativa do especialista  $\lambda_i^*$  é para o mesmo  $i$ -ésimo sistema para qual dados de operação  $(k_i, t_i)$  foram observados.

Substituindo a equação [11] e [15] na equação [16], tem-se:

$$P(K_i, t_i, \mu_i, \sigma_i / \nu, \tau, E_0) = P_i = \int_{\lambda} P(K_i / t_i, \lambda, E_0) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_i\tau\lambda} e^{-\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 + \left( \frac{\ln \lambda - \nu}{\tau} \right)^2 \right]} \cdot d\lambda \quad [ 17 ]$$

Uma possível solução para equação [17] pode ser obtida ao se escrever:

$$e^{-\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 + \left( \frac{\ln \lambda - \nu}{\tau} \right)^2 \right]} \quad \text{como} \quad e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\mu'_i - \ln \lambda}{\sigma'_i} \right)^2}$$

Desta forma, pode-se mostrar que:

$$\sigma'_i = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad \text{e} \quad \mu'_i = \frac{\frac{\nu}{\tau^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad [ 18 ]$$

Então, a função verossimilhança dada pela equação [17] é:

$$P_i = \int_{\lambda} \frac{(\lambda.t_i)^{K_i} \cdot e^{-t_i \cdot \lambda}}{\Gamma(K_i + 1)} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma'_i\tau\lambda} e^{-\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\mu'_i - \ln \lambda}{\sigma'_i} \right)^2 + \left( \frac{\ln \lambda - \nu}{\sigma'_i + \tau^2} \right)^2 \right]} \cdot d\lambda$$

que após uma manipulação algébrica torna-se:

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_i - \nu}{\sigma_i + \tau}\right)^2}}{2\pi\sigma_i\tau\lambda} \int_{\lambda} \frac{\lambda^{K_i-1} \cdot t_i^{K_i} \cdot e^{-t_i \cdot \lambda}}{\Gamma(K_i+1)} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_i' - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2} \cdot d\lambda \quad [19]$$

Nota-se que a equação anterior pode também ser escrita como um produto de uma distribuição Gamma e uma Lognormal. Realmente,

$$I = \frac{\sigma_i' e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_i - \ln \nu}{\sigma_i' + \tau}\right)^2}}{\sqrt{2\pi\sigma_i'\tau}\lambda} \int_{\lambda} \frac{\lambda^{(K_i+1)-1} \cdot t_i^{K_i+1} \cdot e^{-t_i \cdot \lambda}}{\Gamma(K_i+1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i'\lambda}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_i' - \ln \lambda}{\sigma_i'}\right)^2} \cdot d\lambda$$

Substituindo-se a expressão para  $\mu_i'$  e  $\sigma_i'$  dada pela equação [17], tem-se:

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_i - \nu}{\sigma_i^2 + \tau^2}\right)^2}}{\sqrt{2\pi\sigma_i\tau t_i} \cdot \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int_{\lambda} Ga(\lambda / K_i + 1, t_i) \cdot LN \left( \lambda \mid \frac{\nu}{\tau^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}, \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \right) \cdot d\lambda \quad [20]$$

E por fim, a função verossimilhança total é obtida substituindo-se a Eq. 20 na Eq 6. No caso de estimativas de fonte, como experiência de engenheiros, considera-se as fontes independentes.

**Caso especial: Modelo Lognormal-Poisson**

Se só dados de operação estão disponíveis e considerando-se o modelo de variabilidade uma distribuição Lognormal, utiliza-se o modelo Lognormal-Poisson para construção da verossimilhança. De forma que, a equação [19] torna-se:

$$P_i = \frac{\Gamma(K_i)}{\Gamma(K_i+1)} \int_{\lambda} \frac{\lambda^{K_i-1} \cdot t_i^{K_i} \cdot e^{-t_i \cdot \lambda}}{\Gamma(K_i)} \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\lambda\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda - \ln \nu}{\tau}\right)^2} \cdot d\lambda \quad [21]$$

Isso corresponde a um produto entre uma Gamma e uma distribuição Lognormal:

$$P_i = \frac{\Gamma(K_i)}{\Gamma(K_i+1)} \int_{\lambda} \lambda \cdot Ga(\lambda / K_i, t_i) \cdot LN(\lambda / \nu, \tau) \cdot d\lambda$$

**3.2.5.4 Implementação do Procedimento**

Nesta seção, será descrita brevemente os elementos da implementação da análise de variabilidade populacional baseada no algoritmo desenvolvido por Droguett & Mosleh (2002). Esta ferramenta de análise Bayesiana desenvolvida por esses autores que incluem os modelos de mistura de verossimilhança descritos na seção anterior e as especificações da distribuição *a priori* são utilizados nesse trabalho.

- **Especificação *a priori*:**

A aplicação da análise de variabilidade populacional requer a especificação de uma distribuição *a priori*. Este é o primeiro estágio da análise, isto é, definir uma distribuição *a priori* sobre o espaço do parâmetro do modelo escolhido de variabilidade. Esta distribuição *a priori* representa a crença *a priori* sobre a distribuição de variabilidade, não a incerteza *a priori* sobre a medida de confiabilidade do sistema de interesse.

O algoritmo desenvolvido por Droguett & Mosleh (2002) envolve a especificação de dados que sintetiza uma distribuição *a priori* contínua sobre o espaço do parâmetro do modelo de variabilidade. O analista deve fornecer estimativas iniciais em termos do valor central e a extensão de variabilidade na distribuição de variabilidade populacional. Usando uma motivação similar à formulação do modelo de erro discutida em Mosleh (1983), estas estimativas tomam forma de distribuições Lognormal.

No caso do modelo de variabilidade Lognormal, *a priori* é especificada fornecendo-se a mediana e um fator de erro (EF). Conforme Mosleh (1983), o fator de erro ou coeficiente de incerteza trata-se da relação de um percentil superior ao valor mediano de uma quantidade incerta, distribuída de acordo com uma distribuição Lognormal. Geralmente, utiliza-se o percentil 95th como valor superior. Então o valor do fator de variação (EF) significa:

$$EF = \frac{X_{95}}{X_{50}}$$

onde  $X_{50}$  é a mediana e  $X_{95}$  é o valor percentis. Quanto maior o EF, maior o grau de incerteza da taxa. Quanto menor o EF, maior confiança se tem na qualidade das informações adquiridas.

Essas informações *a priori*, mediana e fator de erro, podem ser baseadas em questionamentos diretos, ou ainda, através de métodos de educação de especialistas, como os desenvolvidos por Campello de Souza (2002), ou ainda mais recentemente por Firmino *et al* (2006).

- **Medidas de Variabilidade**

As funções de verossimilhança e as distribuições *a priori* são incorporadas em um procedimento de inferência Bayesiana em que a densidade *a posteriori*  $\pi(\underline{\theta} | E)$  é calculada. A inferência Bayesiana é executada usando o método Markov Chain Monte Carlo (MCMC), que permite que amostras sejam geradas de uma função densidade contínua não normalizada. O método MCMC, que é aplicado freqüentemente aos problemas de inferência Bayesiana (GILKS *et al*, 1996), resulta em um conjunto de amostras  $S = \{\underline{\theta}_1, \underline{\theta}_2, \dots, \underline{\theta}_m\}$ , representando a

densidade *a posteriori* sobre os parâmetros do modelo de distribuição de variabilidade  $\varphi(x/\underline{\theta})$ ,  $\underline{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ .

Dado S, a densidade de variabilidade populacional estimada é computada como:

$$\hat{p}(x) = \int_{\underline{\theta}} \varphi(x/\underline{\theta}) d\underline{\theta} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \varphi(x/\underline{\theta}_i)$$

Para a correspondente média e variância, tem-se:

$$\hat{\mu}_x = \int_x x \hat{p}(x) dx = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu(\underline{\theta}_i)$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \int_x (x - \hat{\mu}_x)^2 \hat{p}(x) dx = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma^2(\underline{\theta}_i)$$

Onde  $\mu(\underline{\theta})$  e  $\sigma^2(\underline{\theta})$  são a média e a variância de  $\varphi(x/\underline{\theta})$ .

Portanto, os resultados gerados incluem limites de incerteza da densidade de variabilidade acumulada:

$$P(x) = \int_{X=0}^x p(x) dx$$

E na forma de z-percentis  $P_z(x)$ , definido como  $\Pr(P(x) < P_z) = Z/100$ , pode-se encontrar o valor  $\hat{P}_z(x)$  da seguinte maneira:

$$\int_{X=0}^x \varphi(x/\underline{\theta}_i) < \hat{P}_z(x)$$

Estes limites provêm ao analista uma base para avaliar a incerteza da estimativa da distribuição de variabilidade populacional. Assim, por considerar as correspondentes distribuições acumuladas, é possível construir os limites de incerteza em torno da verdadeira distribuição acumulada de variabilidade.

## **4. APLICAÇÃO EM ESTAÇÕES REDUTORAS DE PRESSÃO DE GÁS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados decorrentes da execução de um projeto piloto de banco de dados de confiabilidade aplicado em estações redutoras de pressão de gás natural (ERPGN) de uma companhia em Pernambuco, seguindo a metodologia discutida anteriormente.

A aplicação da metodologia será realizada primeiramente com a descrição e caracterização do cenário (sistema), identificando as funções dos equipamentos mais importantes do ponto de vista de segurança e controle em ERPGN's.

Em seguida, são apresentados de forma sistemática os modos e causa de falhas considerados relevantes pela Companhia, de equipamentos, subsistemas e componentes que constituem uma ERPGN segundo a hierarquia descrita na seção 3.1.1. Para este fim, utilizou-se a técnica FMEA.

A terceira etapa desta aplicação consiste na coleta de dados de ocorrência de falha de válvulas em operação em três diferentes ERPGN's também chamadas de RGN's (Redutoras de Gás Natural), que posteriormente são identificadas por RGN-A, RGN-B e RGN-C. As estações foram escolhidas em decorrência de suas altas demandas por abastecimento de gás, frequência de intervenção e o impacto associado à indisponibilidade do sistema. Dentro do contexto de análise de dados de populações não homogêneas é importante salientar a evidente não homogeneidade dos dados coletados, já que cada ERGPN abastece consumidores de grande porte, porém com finalidades e características de consumo diferentes para o uso de gás natural.

Posteriormente, é aplicada a Metodologia Bayesiana descrita na seção 3.2.5 para a obtenção das métricas de interesse, isto é, as taxas de falha para os respectivos modos de falha identificados.

### **4.1 Descrição do Sistema**

A distribuição de gás natural é feita em quase toda sua extensão através de tubulações subterrâneas. No entanto, os consumidores dos ramais de distribuição da companhia em estudo somente podem utilizar o gás natural com baixa pressão. Para isso, existem Estações Redutoras de Pressão de Gás Natural (ERPGN) localizadas ao longo do trajeto da tubulação dos ramais e nas dependências dos consumidores. Vale salientar que todo o sistema obedece a normas de segurança nacionais e internacionais.

Antes de prosseguir, é importante citar algumas definições necessárias à compreensão do sistema de distribuição de gás em estudo.

- **Gasoduto de Transporte:** é a tubulação principal que transporta o gás natural, de Guamaré – RN ao município de Cabo – PE, tendo 422 km de extensão. Também chamado de gasoduto Nordeste, interliga os Estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.
- **Ramal de Distribuição:** derivação da tubulação principal ou gasoduto de transporte, também chamado de linha tronco. A partir deste ramal, há sub-ramais ou derivações, de diversos diâmetros, que se destinam à distribuição direta aos consumidores. Em cada ramal há uma ERP (vide definição abaixo).
- **ERP:** estação redutora de pressão que controla a vazão e reduz a pressão do gás transportado pela linha tronco, através de diversos equipamentos. A tubulação que vinha enterrada aflora na ERP, ficando a cerca de um metro de altura do piso, apoiada em suportes. Ao sair da ERP, a tubulação novamente segue enterrada em direção às ERPM's (vide definição abaixo) dos consumidores. Nas ERP's existem dois ramais, o principal e o reserva, o que reduz a chance de alguma interrupção operacional do sistema.
- **ERPM:** estação redutora de pressão e de medição, localizada nas dependências dos consumidores, cuja função é controlar a vazão em função do consumo. A redução é feita de acordo com o consumo do cliente da companhia. As ERPM's são bem menores do que as ERP's. Em função das características do consumidor, podem ter um ou dois ramais operando alternadamente, acionados automaticamente pelo controle de pressão da estação.
- **Equipamentos:** são válvulas controladoras, de bloqueio e de segurança, filtros, manômetros, termômetros, turbinas, discos de ruptura e demais acessórios. São montados na tubulação desenterrada e constituem uma ERP ou ERPM.
- **PCV (*Pressure Control Valve*):** válvula controladora de pressão. Sua função é reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha. Quando a pressão a jusante é menor do que a pressão requerida a mesma abre para permitir um aumento do fluxo de gás. Ao contrário, se a pressão a jusante é maior do que a requerida, a PCV irá fechar.
- **ESDV (*Emergency Shutdown Valve*):** válvula de bloqueio com desarme por alta pressão, também chamada *shut-off*. Funciona numa emergência, fechando

automaticamente a passagem de gás quando a pressão atinge o máximo programado, ou seja, permite o fluxo de gás durante a operação normal e bloqueia o fluxo de gás, durante uma sobre pressão a jusante da linha.

- Válvula Esfera (ou esférica): válvula de segurança manual que permite a passagem do gás quando aberta e bloqueia o fluxo do gás quando fechada, proporcionando flexibilidade nas atividades de manutenção e manobras.
- Válvula de Retenção: válvula de bloqueio que impede o retorno do fluxo de gás. Em uma situação de emergência a portinhola deve ser fechada devido ao refluxo do gás.
- PSV (*Pressure Safety Valve*): válvula de segurança com abertura por alta pressão. Atua quando a pressão atinge um valor máximo programado descarregando o gás natural para a atmosfera, aliviando assim, a pressão a jusante da linha de gás.
- Filtro: sua função é reter os contaminantes presentes no gás.

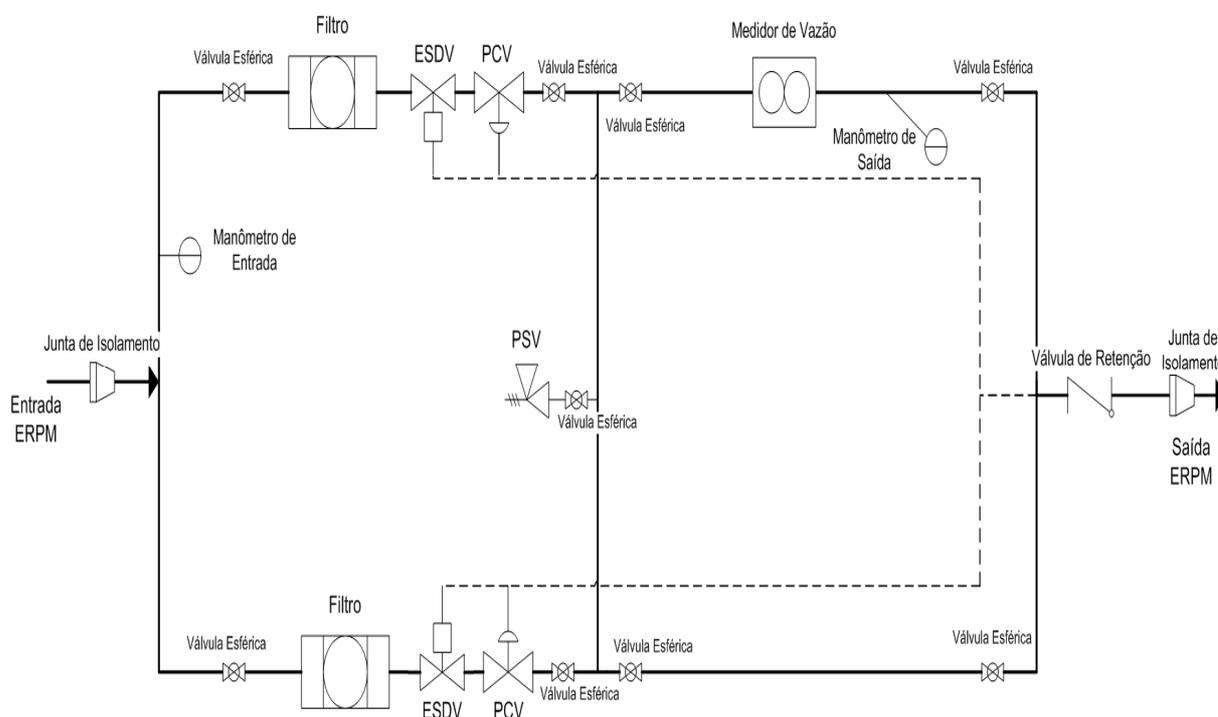
Dadas as definições acima, vale salientar que uma ERPGN pode ser classificada em uma ERP ou ERPM, a depender de sua localização. Deste modo, é interessante ter uma visualização de uma ERPM (Figura 4.1), visto que foi o sistema de estudo para aplicação da metodologia de desenvolvimento de banco de dados.



**Figura 4.1 ERPM Típica**

Em função das características do consumidor, as ERPM's podem ter um ou dois ramais operando alternadamente. Mas em geral, em cada ERPM existem duas linhas de

abastecimento, configuradas em paralelo, uma principal e outra reserva. Caso ocorra indisponibilidade do sistema principal o reserva entra em operação até que seja sanado o problema. A Figura 4.2 contém um fluxo de engenharia que normalmente é adotado nas ERPM's da companhia. Em cada ramo há uma válvula de controle PCV regulando a pressão a jusante das mesmas. A válvula de bloqueio ESDV atua em caso de sobre pressão a jusante da linha, bloqueando a passagem de fluxo de gás dado que a PCV falhe. E em caso de falha de ambas as válvulas PVC e ESDV, a válvula de segurança PSV atua para aliviar a pressão a jusante da linha, descarregando o gás na atmosfera.



**Figura 4.2 Fluxo de Engenharia de uma ERPM**

## 4.2 Equipamentos e Respective Modos de Falha

Como discutido anteriormente, a identificação dos modos de falha de cada tipo de equipamento é de fundamental importância para o desenvolvimento do banco de dados. De fato, dados de falhas e dados de manutenção devem ser coletados para os modos de falha considerados relevantes para o funcionamento do equipamento sendo analisado. Desses dados coletados e analisados, políticas de manutenção otimizadas podem ser adotadas e métricas de confiabilidade obtidas para cada modo de falha identificado.

A fim de identificar os modos de falha e suas causas foi utilizada a técnica FMEA. Este processo envolveu a revisão de componentes, subsistemas, e equipamentos que constituem o sistema de aplicação da análise, as estações de redução de pressão e medição (ERPM). Para cada componente, subsistema e equipamento, os modos de falha e os seus efeitos foram registrados em uma planilha de FMEA. O formato da planilha utilizada é similar ao da Figura 2.6, descrita na secção 2.3.

Cumprido salientar que a identificação dos modos de falha tem algumas limitações. Primeiro, não é possível identificar todos os modos de falha. E segundo, para as falhas identificadas não há garantias de que todas as causas e efeitos foram considerados.

A seguir, são apresentados, portanto, os modos de operação e os modos de falha com as respectivas causas para cada um dos equipamentos, subsistemas e componentes analisados nas estações de redução de pressão e medição (ERPM's) da companhia em estudo. Deve-se ressaltar que o conjunto de modos de falha identificados e apresentados nas tabelas em anexo foi o resultado de trabalho sistemático e em parceria com a equipe da mesma.

### 4.2.1 Modos de Falha da PCV

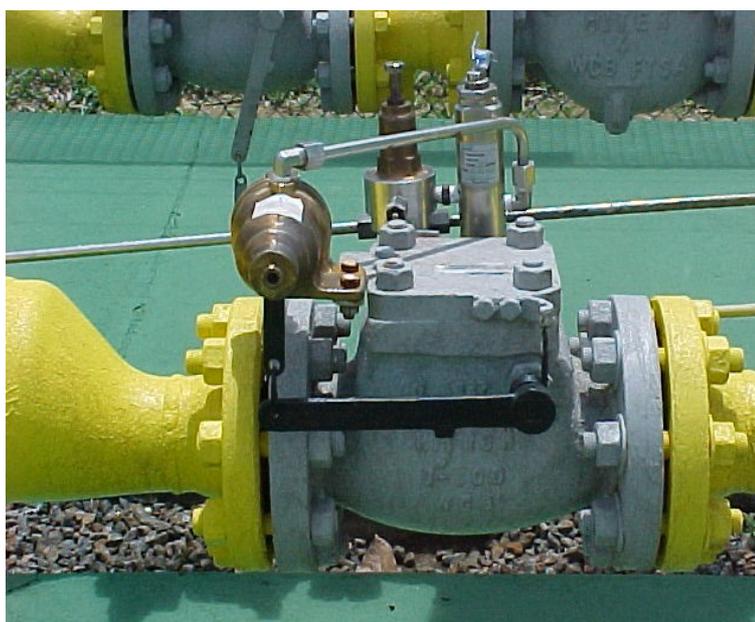
A função da PCV, como citada anteriormente, é manter constante a pressão a jusante da linha. A PCV em estudo, Figura 4.3, é operada por um piloto e dois redutores. As falhas na PCV podem ser causadas pelos redutores, piloto ou a própria PCV. O primeiro redutor reduz a pressão a montante de  $40 \text{ kgf/cm}^2$  para  $5 \text{ kgf/cm}^2$  e o segundo de  $5 \text{ kgf/cm}^2$  para  $2,5 \text{ kgf/cm}^2$ . O piloto da PCV regula a pressão no diafragma da PCV de acordo com a pressão a jusante. As tabelas no Anexo 1 mostram o detalhamento dos modos de operação e de falha, e a suas respectivas causas de falha.



**Figura 4.3 PCV**

#### 4.2.2 Modos de Falha da ESDV

A função da ESDV (Figura 4.4) é permitir o fluxo de gás durante a operação normal do sistema e bloquear o fluxo de gás durante uma sobre pressão a jusante da linha em caso de falha da PCV. As falhas na ESDV podem ser causadas por falhas no redutor, piloto, atuador ou na própria válvula. O piloto da ESDV é responsável pela transmissão ou não do sinal para o atuador. Por sua vez, o atuador é responsável pelo fechamento da ESDV. Os modos de operação e de falha, bem com as causas de falha são detalhados no Anexo 2.



**Figura 4.4 ESDV**

### 4.2.3 Modos de Falha da PSV

Conforme já mencionado, a função da válvula de segurança por alta pressão PSV (Figura 4.5) é de em caso de sobre pressão a jusante da linha aliviar a pressão. Normalmente estão fechadas. Os modos de falha da PSV estão relacionados no Anexo 3.



**Figura 4.5 PSV**

### 4.2.4 Modos de Falha da Válvula Esfera

A intenção da válvula esfera (Figura 4.6) é permitir flexibilidade para as atividades de manutenção e manobras. A válvula esfera quando aberta deve permitir a passagem de gás e quando fechadas, devem impedir a passagem do gás. As válvulas esferas estudadas são de acionamento manual. Os modos de falha e suas respectivas causas são relacionados no Anexo 4.



**Figura 4.6 Válvula Esfera**

#### 4.2.5 Modos de Falha da Válvula de Retenção

A função das válvulas de retenção (Figura 4.7) é impedir o retorno do fluxo de gás durante uma situação de emergência, de sobre pressão a jusante da linha. No Anexo 5 estão os modos de operação, falha e causas relacionadas.



**Figura 4.7 Válvula de Retenção**

#### 4.2.6 Modos de Falha dos Filtros

A função do filtro é reter os contaminantes presentes no gás. Falhas nos filtros podem resultar em redução da pressão a jusante ou em casos extremos de entupimento, na interrupção do consumo de gás. O tipos de filtros encontrados nas ERPM's são do tipo Y ou cesta (Figura 4.8). No anexo 6 estão relacionados os modos de falha e causas de falha dos filtros tipo cesta e Y.



**Figura 4.8 Filtros tipo Cesta e Y**

#### 4.2.6 Modos de Falha dos Medidores de Pressão

Os manômetros (Figura 4.9) são instrumentos de medição de pressão. Os modos de falha e suas causas relacionados estão descritos no Anexo 7.



Figura 4.9 Manômetro

#### 4.3 Dados Coletados

Seguindo a metodologia descrita para estruturação do banco de dados de confiabilidade, apresentada anteriormente, serão apresentados nesta seção os dados de campo coletados de válvulas de controle de pressão (PCV) de gás. A escolha deste equipamento deve-se à evidência empírica de freqüente ocorrência de intervenções corretivas em diversas ERPGN's, provenientes de falhas em PCV's, refletindo em indisponibilidade ou redução do nível de funcionamento das linhas de abastecimento. Além disso, um projeto piloto que contivesse todos os equipamentos analisados na seção anterior demandaria um tempo razoável.

Os dados necessários para o referido estudo foram obtidos através de sucessivas reuniões, onde abrangem todo o histórico de dados disponível no Sistema de Gerenciamento da Manutenção (SIGMA), utilizado na companhia em estudo. Assim, foram coletados dados referentes a 01/10/2002 até 16/09/2005. Para a coleta dos dados relevantes à análise, foi adotada a planilha de coleta de dados da Figura 4.10.

Pode ser observado nos itens da planilha a estrutura do banco de dados descrita na seção 3.2.1. Os itens de 1 a 3 referem-se a informações técnicas do equipamento. Os itens de 4 a 8 são referentes a dados de manutenção. E por fim, os itens 9 a 11 dizem respeito a dados de falha.

Pode-se também notar que as classes de severidade utilizadas (crítica e degradada – item 10) são um subconjunto das classes de severidade definidas na taxonomia do banco de dados (crítica, degradada, incipiente), especificadas na Tabela 3.2. A razão foi em virtude desta aplicação ser algo relativamente novo para a equipe de manutenção, que não tinha experiência prática para identificar uma falha incipiente no equipamento que pudesse levar efetivamente a uma falha crítica ou degradada.

No item 11, componentes falhos, pode-se notar a hierarquização discutida na secção 3.1.1; onde o equipamento em análise é a PCV; os subsistemas são redutor, corpo e atuador; e os componentes falhos são efetivamente aqueles encontrados durante a aplicação de FMEA.

**PCV**  
DADOS DE FALHA

1- OT \_\_\_\_\_  
 2- TAG \_\_\_\_\_  
 3- RGN \_\_\_\_\_  
 4- DATA DA DETECÇÃO: \_\_/\_\_/\_\_\_\_  
 5- HORA DA DETECÇÃO: \_\_\_\_\_  
 6- DATA DE RETORNO DO RAMAL A OPERAÇÃO: \_\_/\_\_/\_\_\_\_  
 7- HORA DE RETORNO DO RAMAL A OPERAÇÃO: \_\_\_\_\_

8- MODO DE DETECÇÃO:

1- <input type="checkbox"/> Manutenção Corretiva	3- <input type="checkbox"/> Manutenção Preventiva
2- <input type="checkbox"/> Manutenção Preditiva	4- <input type="checkbox"/> Inspeção

9- MODO DE FALHA PRINCIPAL (escolha apenas uma opção):

1- <input type="checkbox"/> Falhou em Abrir	5- <input type="checkbox"/> Falhou em Fechar
2- <input type="checkbox"/> Abriu Lentamente	6- <input type="checkbox"/> Fechou Lentamente
3- <input type="checkbox"/> Abriu Parcialmente	7- <input type="checkbox"/> Fechou Parcialmente
4- <input type="checkbox"/> Abriu em Excesso	8- <input type="checkbox"/> Fechou em Excesso

10- CLASSE DE SEVERIDADE (escolha apenas uma opção):

1- <input type="checkbox"/> Crítica	2- <input type="checkbox"/> Degradada
-------------------------------------	---------------------------------------

11- COMPONENTES FALHOS:

11.1 PILOTO:	11.2 CORPO:
1- <input type="checkbox"/> Pino de Fixação do Bico-Palheta	6- <input type="checkbox"/> Haste do Obturador
2- <input type="checkbox"/> Tomada de Pressão	7- <input type="checkbox"/> Diafragma
3- <input type="checkbox"/> Sede da Palheta	8- <input type="checkbox"/> O'Rings
4- <input type="checkbox"/> Conexões	9- <input type="checkbox"/> Conexões
5- <input type="checkbox"/> O'Rings	10- <input type="checkbox"/> Molas
	11- <input type="checkbox"/> Obturador
	12- <input type="checkbox"/> Sede

11.3 REDUTOR:

13- <input type="checkbox"/> Parafuso do Bico-Palheta
14- <input type="checkbox"/> Sede da Palheta
15- <input type="checkbox"/> Tomada de Pressão
16- <input type="checkbox"/> Pino de Fixação do Bico-Palheta
17- <input type="checkbox"/> O'Rings

12- OBSERVAÇÕES:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Figura 4.10 Planilha de Coleta de Dados da PCV**

**4.3.1 Dados de Falha**

O desenvolvimento de uma planilha única que contivesse informações da FMEA da PCV e os dados de falha foi realizado através de reuniões com especialistas. Isto resultou numa planilha simplificada (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3), onde são mostrados dados de falha e os respectivos modos de operação, modos de falha e causas de falha associadas das ERPM's A, B e C. Em seguida, é apresentada uma legenda para compreensão dos dados de falha exibidos nas tabelas.

Tabela 4.1 Resumo de dados coletados da ERPM - A

DATA	i	k	To (horas)	Tm (horas)	MD	MF	S	CF-Piloto	CF-Corpo	CF-Redutor	Observação
14/10/2002	1	0	320.00	8.00	3	0	0	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	Kit de Reparo
5/5/2003	2	1	4867.33	4.67	3	0	1	1, 3, 7	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	13, 14, 15, 16, 17	Substituição das duas PCV's
12/11/2003	3	0	4579.00	5.00	3	0	0	1, 3, 7	7,8,11	14, 16, 17	Kit de Reparo
5/4/2004	4	1	3478.50	1.17	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
10/5/2004	5	0	833.83	5.50	3	0	0	1, 3, 7	7,8,11	14, 16, 17	KIT de Reparo
20/6/2004	6	1	992.00	1.67	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
20/7/2004	7	1	712.58	1.25	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
21/7/2004	8	1	8.33	1.17	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
23/9/2004	9	1	1545.17	1.17	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
2/10/2004	10	1	215.83	1.33	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
18/10/2004	11	1	373.83	2.17	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
28/10/2004	12	1	244.50	1.50	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
29/10/2004	13	1	18.17	2.33	1	2	2	0	9	13	Ajuste Set-Point e Ajuste de Velocidade na válvula agulha
3/11/2004	14	1	126.67	1.33	1	2	2	0	9	13	Ajuste Set-Point e Ajuste de Velocidade na válvula agulha
6/11/2004	15	1	60.67	1.17	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
20/11/2004	16	0	338.17	6.00	3	0	0	1, 3, 7	7,8,11	14, 16, 17	Kit de reparo
17/2/2005	17	1	2132.33	1.17	1	3	2	0	0	13	Ajuste Set-Point
16/5/2005	18	0	2108.50	6.00	3	0	0	1, 3, 7	7,8,11	14, 17	Kit de Reparo

Tabela 4.2 Resumo de dados coletados da ERPM - B

DATA	i	k	To (horas)	Tm (horas)	MD	MF	S	CF-Piloto	CF-Corpo	CF-Redutor	Observação
14/11/2002	1	1	1068.75	3.25	3	0	2	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	Ajuste Set-Point e Kit de Reparo
13/5/2003	2	0	4312.00	8.00	3	0	0	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	Kit de Reparo
10/12/2003	3	0	5061.50	2.50	3	0	0	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	Kit de Reparo
5/5/2004	4	1	3521.50	4.75	1	7	1	0	7, 8, 11	0	Kit de Reparo
8/6/2004	5	0	811.25	6.50	3	0	0	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	Kit de Reparo
15/9/2004	6	1	2374.83	30.33	1	7	1	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	Substituição da PCV: 1321 => 3594 . Motivo: vazamento na sede
20/12/2004	7	0	2258.50	2.50	3	0	0	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	
8/5/2005	8	1	3331.00	4.22	1	2	2	0	7	0	
16/6/2005	9	0	929.78	6.00	3	0	2	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	

Tabela 4.3 Resumo de dados coletados da ERPM - C

DATA	i	k	To (horas)	Tm (horas)	MD	MF	S	CF-Piloto	CF-Corpo	CF-Redutor	Observação
1/2/2003	1	0	2963.08	4.92	3	0	0	1, 3, 5	7, 8, 11	14, 16, 17	Kit de Reparo
23/9/2003	2	0	5611.67	4.33	3	0	0	1, 3, 5	0	14, 16, 17	Kit de Reparo
19/3/2004	3	0	4290.00	6.00	3	0	0	1, 3, 5	0	14, 16, 17	Kit de Reparo
23/9/2004	4	0	4505.50	6.50	3	0	0	1, 3, 5	0	14, 16, 17	Kit de Reparo
21/3/2005	5	0	4290.00	6.00	3	0	0	1, 3, 5	0	14, 16, 17	Kit de Reparo
4/4/2005	6	0	328.67	2.50	3	0	0	1, 3, 5	0	14, 16, 17	Kit de Reparo
3/5/2005	7	1	699.67	1.00	1	2	2	0	0	0	Ajuste de Velocidade, devido a uma falha na válvula agulha

Abaixo é apresentada uma legenda para compreensão dos dados de falha exibidos nas tabelas acima.

**i** : Número de Ocorrência. Trata-se de um número seqüencial começando da ocorrência da primeira falha a partir do marco-zero: 1/10/2002.

**k**: Número de falhas observadas. Neste projeto piloto apenas uma válvula (PCV) está sendo analisada, e portanto só existem no máximo duas falhas em questão, podendo ocorrer na PCV da linha principal e/ou reserva. No caso da Manutenção Preventiva, quando não fosse detectado nenhum problema com o equipamento, convencionou-se não haver nenhuma falha no sistema até então, apesar de ocorrer a substituição de kits de reparo, que a princípio encontram-se degradados e são obrigatoriamente substituídos.

**T<sub>o</sub>**: Tempo até a detecção da falha.

**T<sub>m</sub>**: Tempo em Manutenção. Trata-se do tempo transcorrido desde a hora de detecção da falha até o retorno do equipamento à operação.

**MD**: Modo de Detecção. (0 - Não Aplicável; 1 - Manutenção Corretiva; 2 - Manutenção Preditiva; 3 - Manutenção Preventiva).

**MF**: Modo de Falha. (0 - Não Aplicável; 1 - Falhou em Abrir; 2 - Abriu Lentamente; 3 - Abriu Parcialmente; 4 - Abriu em Excesso; 5 - Falhou em Fechar; 6 - Fechou Lentamente; 7 - Fechou Parcialmente; 8 - Fechou em Excesso.)

**S**: Grau de Severidade. (0 - Não aplicável; 1 - Crítica; 2 - Degradada)

**CF-Piloto**: Componente Falho pertencente ao piloto da PCV. (0 - Não Aplicável; 1 - Pino de Fixação do Bico Palheta; 2 - Tomada de Pressão; 3 - Sede da Palheta; 4 - Conexões; 5 - O'Rings).

**CF-Corpo**: Componente Falho pertencente ao corpo da PCV. (0 - Não Aplicável; 6 - Haste do Obturador; 7 - Diafragma; 8 - O'Rings; 9 - Conexões; 10 - Molas; 11 - Obturador; 12 - Sede).

**CF-Redutor**: Componente Falho pertencente ao redutor da PCV. (0 - Não Aplicável; 13 - Parafuso do Bico-Palheta; 14 - Sede da Palheta; 15 - Tomada de Pressão; 16 - Pino de Fixação do Pico-Palheta; 17 - O'Rings).

#### 4.4 Estimação de Métrica de Confiabilidade

Nesta seção, será utilizada a análise de variabilidade populacional discutida na seção 3.2.5, visto que os dados coletados são provenientes de PCV's submetidas a condições operacionais distintas, caracterizando portanto uma população não-homogênea. Vale salientar que não será analisada a disponibilidade no projeto piloto da válvula PCV, pois não fazia

parte dos objetivos deste trabalho. Sendo assim, os dados utilizados para a simulação são apenas dados de tempo de falha. No entanto, dados de tempo de manutenção foram coletados para avaliação futura da disponibilidade.

A distribuição *a priori*, o estado de conhecimento atual, será construída com a análise Bayesiana de variabilidade populacional. Para se iniciar a análise de variabilidade populacional do parâmetro de interesse (taxa de falha), precisa-se especificar qual a distribuição de probabilidade que melhor descreve a variabilidade populacional, como também a construção da verossimilhança.

Como foi visto, a função de verossimilhança é construída de acordo com o tipo de evidência, ou seja, pode ser baseada em: dados de campo como o número de falhas, conhecimento de especialistas e dados provenientes de banco de dados genéricos. De acordo com as diferentes fontes de evidência, a verossimilhança será uma mistura de funções para melhor representar a evidência disponível. Neste caso, têm-se apenas dados operacionais disponíveis mostrados na Tabela 4.4. Sendo assim, pôde-se construir a função de verossimilhança baseada em uma distribuição de Poisson.

A Tabela 4.4 derivada das tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 resume os dados de falha de válvulas em operação nas três diferentes ERPM's.

**Tabela 4.4 Dados utilizados para determinação de Métrica de Taxa de Falha**

	ERPM A	ERPM B	ERPM C
K	To (horas)	To (horas)	To (horas)
0	320	1068,75	2963,08
1	1487,33	4312	5611,67
0	4579	5061,5	4290
1	3478,5	3521,5	4505,5
0	833,83	811,25	4290
1	992	2374,83	328,67
1	712,58	2258,5	699,67
1	8,33	3331	
1	1545,17		
1	215,83		
1	373,83		
1	244,5		
1	18,17		
1	126,67		
1	60,67		
0	338,17		
1	2132,33		
0	2108,5		

A partir dos dados de falha coletados, são apresentados, nas tabelas 4.5, 4.6 e 4.7, os dados discriminados por modos de falha. Vale salientar que foram observados apenas três

tipos de modos de falha: Fechar Parcialmente; Abrir Parcialmente e Abrir Lentamente. A metodologia para obtenção da métrica, taxa de ocorrência por Modo de Falha, seguirá a mesma do caso taxa de falha agregada.

**Tabela 4.5 Dados utilizados para determinação de Métrica de taxa de ocorrência do Modo de Falha: Fechar Parcialmente**

ERP M B	
k	To (horas)
1	3521.50
1	2374.83

**Tabela 4.6 Dados utilizados para determinação de Métrica de taxa de ocorrência do Modo de Falha: Abrir Parcialmente**

ERP M A	
k	To (horas)
1	3478.50
1	992.00
1	712.58
1	8.33
1	1545.17
1	215.83
1	373.83
1	244.50
1	60.67
1	2132.33

**Tabela 4.7 Dados utilizados para determinação de Métrica de taxa de ocorrência do Modo de Falha: Abrir Lentamente**

ERP M A		ERP M B		ERP M C	
k	To (horas)	k	To (horas)	k	To (horas)
1	18.17	1	3331.00	1	699.6667
1	126.67				

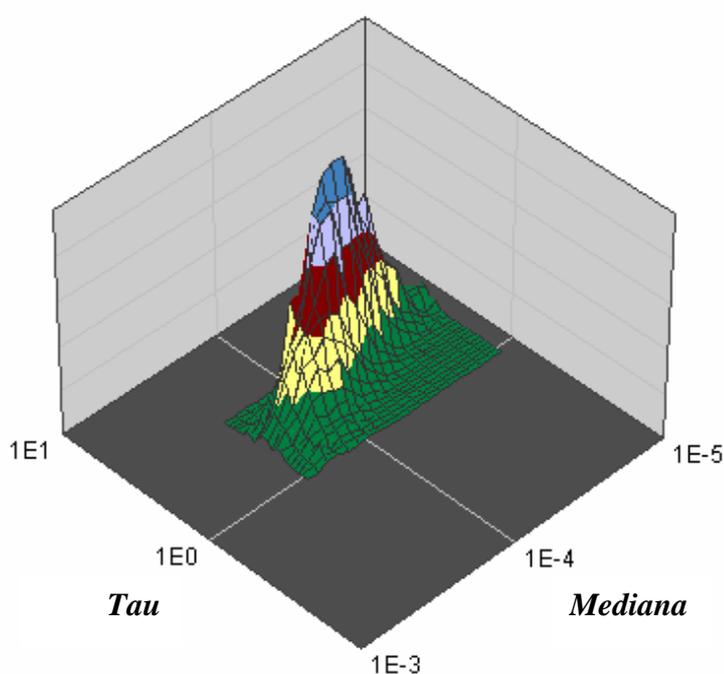
Portanto, é assumido que a variabilidade da taxa de falha é distribuída de acordo com uma distribuição Lognormal (Equação [11]). A distribuição *a priori* foi escolhida como sendo  $\pi(x_{50}, EF) = \pi_{LN}(x_{50} | 10^{-6}, 100)\pi_{LN}(EF | 10, 10)$  onde  $\pi_{LN}(x | x_{50}, EF)$  é a densidade da Lognormal.

A verossimilhança será construída através do caso especial Lognormal-Poisson, discutida anteriormente, cujo resultado será calculado através da Equação [21]. E por fim, a

função verossimilhança total é obtida substituindo-se os resultados da Equação [21] na Equação [6].

Em seguida, é calculada a distribuição *a posteriori* de variabilidade paramétrica da taxa de falha através da aplicação do teorema descrito na Equação [12].

Após a inserção dos dados e resolução das equações com ajuda de um simulador, os resultados são mostrados através de gráficos e tabelas a seguir que fornecem a variabilidade populacional da taxa de falha agregada (sem levar em conta os modos de falha). A seguir é apresentada a distribuição *a posteriori* paramétrica de variabilidade populacional dos dados analisados da taxa de falha.



**Figura 4.11 Distribuição *a posteriori* Conjugada dos Parâmetros de Variabilidade Populacional**

Outro resultado fornecido pelo simulador está apresentado na Figura 4.12 abaixo, que representa a mediana marginal e o desvio padrão (tau) marginal dos parâmetros da variabilidade populacional da taxa de falha.

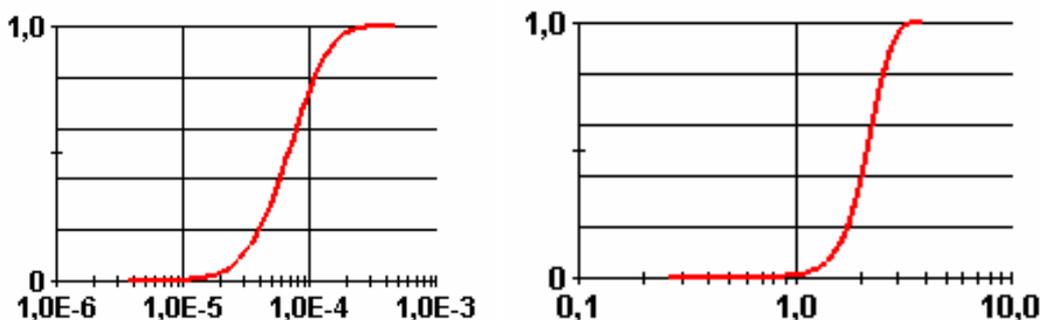
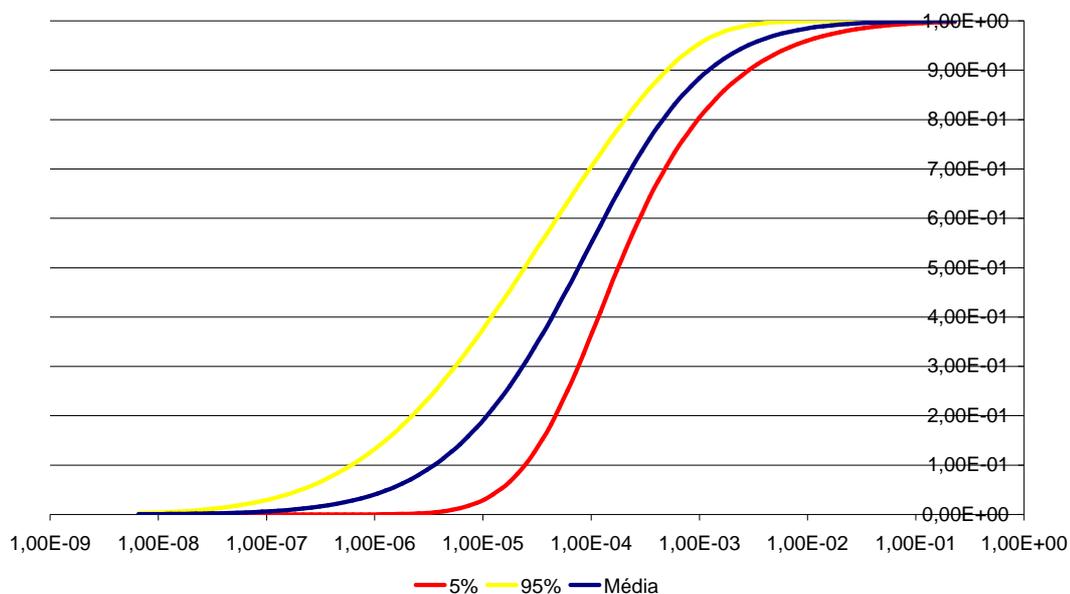


Figura 4.12 Densidade de variabilidade populacional paramétrica

Depois de resolver o modelo Lognormal-Poisson baseado na informação disponível, o resultado esperado da densidade da variabilidade populacional da taxa de falha, pode ser observado na Figura 4.13. A distribuição esperada (média) de variabilidade populacional acumulada da taxa de falha (Figura 4.13) tem 5 e 95 percentis de 1,32E-06 e 2,792E-3, respectivamente, e média de 1,391E-3. A Tabela 4.8 mostra esses e outros valores das curvas 5%, 50% (mediana) e 95% percentil de distribuição acumulada da variabilidade populacional. Também são mostrados na Figura 4.13 as curvas de 5 percentil (linha vermelha) e 95 percentil (linha amarela) da distribuição de variabilidade acumulada da taxa de falha, tendo-se assim, a quantificação explícita da incerteza em torno da taxa de falha desse tipo de PCV.

Tabela 4.8 Estatísticas dos Percentis e Mediana da Taxa de Falha

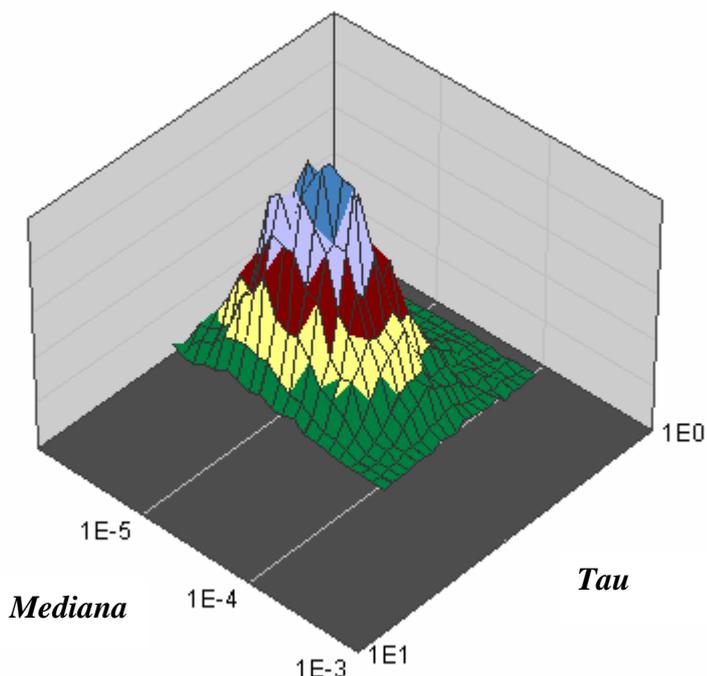
	Média	5%	Mediana	95%
Média	0,001391			
Variância	9,793285			
1st	1,75E-07	5,39E-06	4,32E-07	2,75E-08
5th	1,32E-06	1,44E-05	1,94E-06	2,08E-07
10th	3,54E-06	2,45E-05	4,33E-06	6,09E-07
50th	7,63E-05	1,77E-04	7,27E-05	2,43E-05
90th	0,00121	0,002848	0,001155	5,00E-04
95th	0,002792	0,007472	0,002586	9,37E-04
99th	0,015105	0,050407	0,011718	0,002653



**Figura 4.13 Distribuição de Probabilidade Acumulada da Taxa de Falha**

Em seguida são mostrados os resultados das taxas de falha de cada modo de falha apresentado durante o período de coleta de dados.

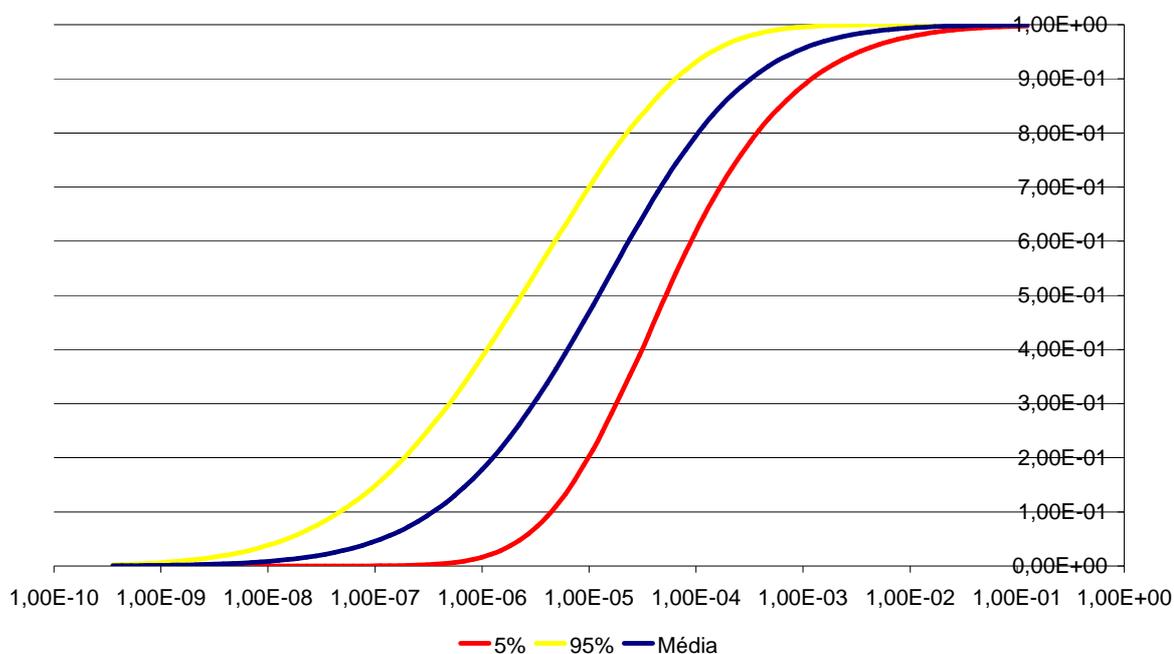
#### 4.4.1 Modo de Falha Abrir Lentamente



**Figura 4.14 Distribuição *a posteriori* Conjugada dos Parâmetros de Variabilidade Populacional do Modo de Falha Abrir Lentamente**

**Tabela 4.9 Percentis e mediana da taxa de ocorrência do modo de falha Abrir Lentamente**

	Média	5%	Mediana	95%
Média	7,35E-04			
Variância	5913687			
1st	1,22E-08	7,25E-07	3,39E-08	1,69E-09
5th	1,15E-07	2,35E-06	1,88E-07	1,48E-08
10th	3,49E-07	4,42E-06	4,64E-07	4,70E-08
50th	1,23E-05	5,24E-05	1,14E-05	2,34E-06
90th	3,23E-04	0,001206	2,78E-04	6,42E-05
95th	8,49E-04	0,003352	6,82E-04	1,40E-04
99th	0,005828	0,025199	0,00374	5,51E-04



**Figura 4.15 Distribuição de Probabilidade Acumulada da Taxa de Ocorrência do Modo de Falha Abrir Lentamente**

4.4.2 Modo de Falha Abrir Parcialmente

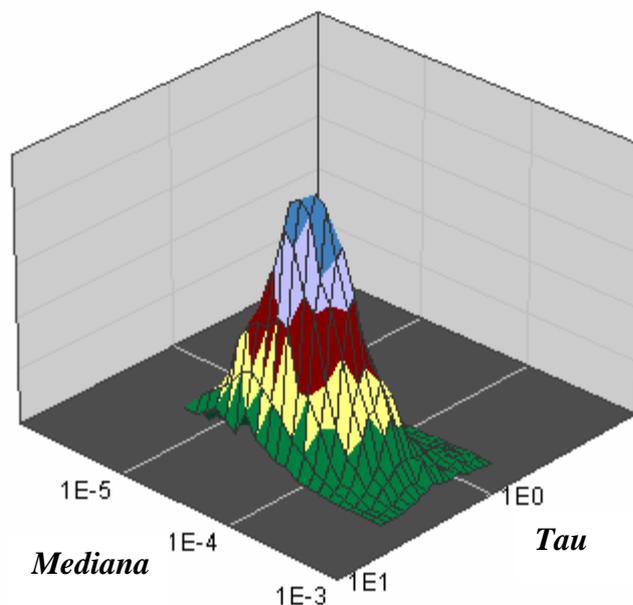
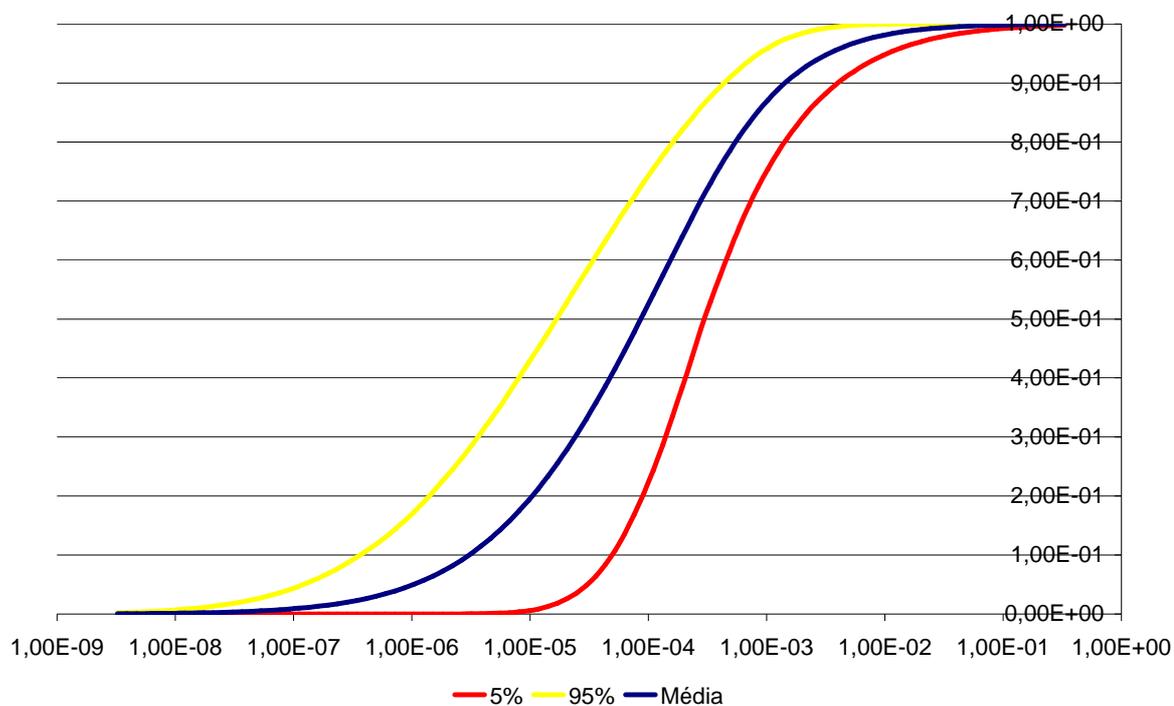


Figura 4.16 Distribuição *a posteriori* Conjuga dos Parâmetros de Variabilidade Populacional do Modo de Falha Abrir Parcialmente

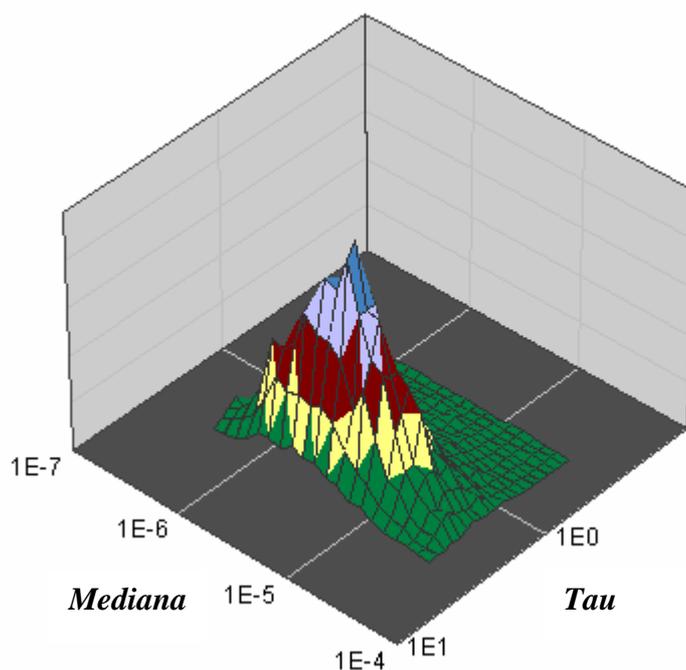
Tabela 4.10 Percentis e mediana da taxa de ocorrência do modo de falha Abrir Parcialmente

	Média	5%	Mediana	95%
Média	0,001995176			
Variância	40316,73838			
1st	1,14E-07	1,26E-05	3,93E-07	1,51E-08
5th	1,03E-06	3,05E-05	1,85E-06	1,22E-07
10th	3,05E-06	4,93E-05	4,21E-06	3,68E-07
50th	8,63E-05	3,00E-04	7,67E-05	1,67E-05
90th	0,001433474	0,003999824	0,001301154	4,40E-04
95th	0,003336859	0,010519687	0,002901709	8,64E-04
99th	0,018933912	0,073033996	0,013566102	0,002596985



**Figura 4.17** Distribuição de Probabilidade Acumulada da Taxa de Ocorrência do Modo de Falha Abrir Parcialmente

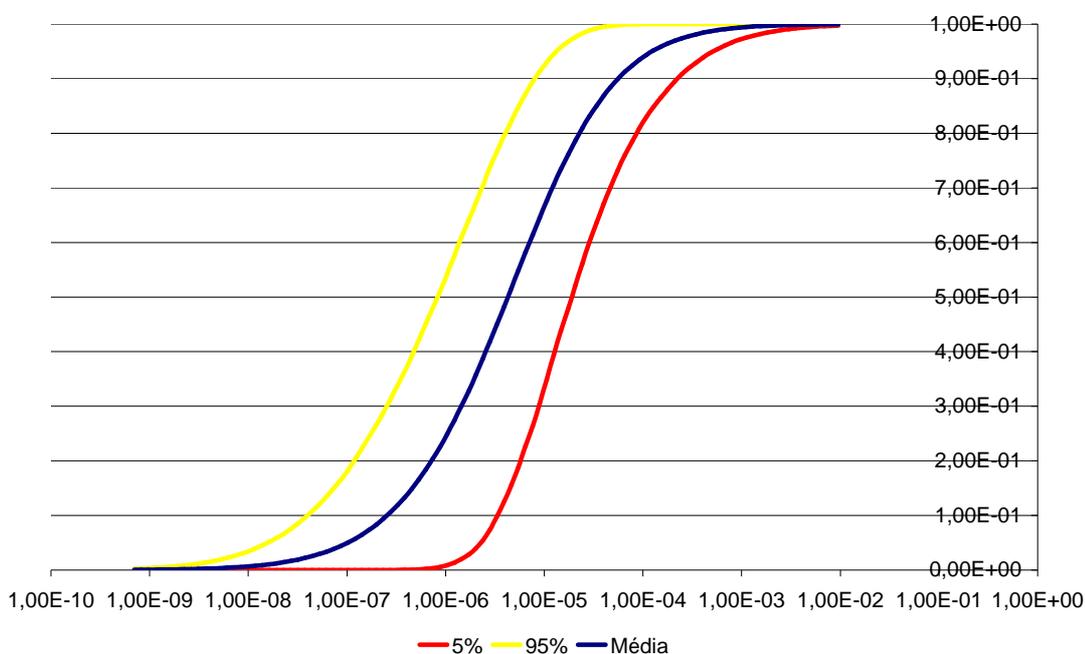
#### 4.4.3 Modo de Falha Fechar Parcialmente



**Figura 4.18** Distribuição *a posteriori* Conjugada dos Parâmetros de Variabilidade Populacional do Modo de Falha Fechar Parcialmente

**Tabela 4.11 Percentis e mediana da taxa de ocorrência do modo de falha Fechar Parcialmente**

	Média	5%	Mediana	95%
Média	6,14E-05			
Variância	0,162948			
1st	1,53E-08	1,08E-06	5,19E-08	2,64E-09
5th	1,01E-07	2,30E-06	1,84E-07	1,57E-08
10th	2,55E-07	3,36E-06	3,69E-07	3,98E-08
50th	4,28E-06	1,88E-05	4,06E-06	8,29E-07
90th	5,60E-05	2,23E-04	4,41E-05	7,96E-06
95th	1,24E-04	5,15E-04	8,76E-05	1,34E-05
99th	6,35E-04	0,002787	3,18E-04	3,08E-05



**Figura 4.19 Distribuição de Probabilidade Acumulada da Taxa de Ocorrência do Modo de Falha Fechar Parcialmente**

## 5. CONCLUSÕES

Como primeira etapa para o desenvolvimento deste trabalho buscou-se uma abordagem da história e evolução de banco de dados de confiabilidade. Etapa esta foi cumprida na Fundamentação Teórica, onde também foi apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre análise de falhas e a importante técnica de *Análise de Modos de Falha e Efeitos* (FMEA).

Em seguida, foi proposta e discutida a metodologia para o desenvolvimento de banco de dados de confiabilidade. Uma das etapas mais importantes consiste na estruturação da taxonomia do banco de dados, que inclui a organização dos dados a serem coletados, a hierarquização dos equipamentos analisados, inventários dos dados de falha, manutenção e informações sobre equipamentos.

Na continuação do trabalho, foi feita a aplicação da metodologia para estações redutoras de pressão de gás de uma companhia de Pernambuco. Inicialmente foi estudado e caracterizado o cenário (sistema), identificando as funções dos equipamentos mais importantes do ponto de vista de segurança e controle em ERPGN's. Análises de modos e causas de falhas considerados relevantes pela Companhia foram apresentadas para equipamentos que constituem uma ERPM típica, a saber: PCV, ESDV, PSV, Válvula Esfera, Válvula de Retenção, Filtros e Manômetro.

As planilhas para a coleta em campo dos dados de falha, manutenção, informações sobre equipamentos e a categorização dos modos de falha e suas causas foram desenvolvidas. À medida em que os modos e causas de falha dos equipamentos e subsistemas eram identificados e documentados, os mesmos foram sendo validados pelas equipes de operação e manutenção da companhia através de reuniões.

A metodologia Bayesiana para a quantificação de métricas de confiabilidade a partir dos dados de campo também foi discutida. Um projeto piloto foi desenvolvido para um equipamento específico, válvula PCV. A escolha de coletar dados de operação apenas de PCV's foi devido à evidência empírica de freqüente ocorrência de intervenções corretivas em diversas ERPM's neste tipo de válvula, refletindo em indisponibilidade ou redução do nível de funcionamento das linhas de abastecimento. Além disso, um projeto piloto que contivesse todos os equipamentos analisados nesta aplicação demandaria um tempo maior.

Todos os dados históricos disponíveis do projeto piloto foram coletados e apresentados; e são provenientes de estações redutoras de pressão com condições operacionais distintas, constituindo-se em uma população não-homogênea. Portanto, tornou-se necessária a análise de variabilidade populacional, para a estimação da métrica de interesse, taxa de falha,

associada a uma faixa de incerteza sobre a mesma. Tal análise foi realizada para a taxa de falha agregada (sem levar em conta os modos de falha) e também particularmente para as taxas de ocorrência dos modos de falha observados.

Desta forma, pode-se concluir que foram alcançados os objetivos deste trabalho

### **5.1 Desafios futuros**

Observa-se porém, que neste desenvolvimento de banco de dados específico, assim como os BDC's genéricos de terceira geração, são fornecidas apenas estimativas das taxas dos modos de falha sobre uma faixa de incerteza, não sendo os modos de falha analisados do ponto de vista de riscos competitivos (os distintos modos de falha de um componente competem entre si para ser o primeiro a 'matar' o componente, ou seja, acarretar na indisponibilidade do componente). Referências ao Processo Homogêneo de Poisson, como no caso do T-BOOK e do EIREDA, sugerem que a teoria de Processos de Poisson Coloridos seja usada para estimar taxas de modos de falha competitivos considerados como independentes (CROWDER, 2001). Conseqüentemente, a taxa de ocorrência de cada um dos riscos não é afetada pela remoção dos outros riscos. Para riscos correspondendo à falha crítica e a atividades de manutenção preventiva, esta suposição implica que a taxa de ocorrência de falhas críticas (que cessam uma ou mais funções do sistema) não seria afetada pela suspensão total das atividades de manutenção preventiva. Suposição, no mínimo, questionável.

Desta forma, a análise do impacto da manutenção preventiva na taxa de ocorrência dos diversos modos de falha não é tratada nesta metodologia de desenvolvimento de banco de dados ou de forma apropriada em outros modernos BDC's.

Portanto, dentro do contexto de componentes e sistemas de distribuição de gás, a hipótese de riscos competitivos (modos de falha) deverá ser cuidadosamente testada e analisada, principalmente quando da operação de equipamentos sujeitos à manutenção preventiva. De modo que, discussões detalhadas sobre o tratamento probabilístico de riscos competitivos devem ser feitas em etapas futuras deste trabalho.

Vale salientar que não houve análise da disponibilidade no projeto piloto da válvula PCV, pois não fazia parte dos objetivos deste trabalho. Através da metodologia Bayesiana foi realizada a análise no contexto apenas da confiabilidade. Sugere-se que em trabalhos futuros sejam realizadas análises da disponibilidade da ERPM, utilizando-se os dados de tempo de manutenção já disponíveis. Além disso, seria importante que projetos futuros abranjam os outros equipamentos que constituem as ERPM's, como válvula ESDV, PSV, etc.

Uma outra recomendação é aplicar esta metodologia em outros contextos. E neste estudo de caso, a indústria do gás natural, seria muito interessante a continuidade deste projeto de desenvolvimento do banco de dados de confiabilidade. A partir da consolidação deste banco de dados, poderão ser obtidas melhorias significativas na confiabilidade e disponibilidade operacional de equipamentos em estações redutoras de pressão, assim como a realização de análises de risco quantitativas. Deve-se ressaltar ainda a necessidade de etapas futuras deste projeto contemplarem outros equipamentos como, por exemplo, tubulações enterradas e não-enterradas.

Portanto, este trabalho é importante para a indústria de gás e reflete a necessidade de novos estudos com dados mais completos, que forneçam informações para o aprimoramento do banco de dados de confiabilidade, resultando em maior credibilidade e eficiência nos processos de distribuição de gás.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AICHE/CCPS (1989)-*Guidelines for Improving Plant Reliability through Data Collection and Analysis*, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- AICHE/CCPS (1998) - *Guidelines for Process Equipment Reliability Data*, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- CAMPELLO DE SOUZA, F. M. (2002) - *Decisões Racionais em Situações de Incerteza.*, Ed. Universitária da UFPE, Recife.
- CARLSON, L. et al. (1987) *T-Book Reliability Data of Components in Nordic Nuclear Power Plants*, ATV Office, Vattenfall AB, S-162, 87 Vallingby, Sweden.
- CATOLA, S. (1983) *Reliability Centred Maintenance Handbook*, Naval Sea Systems Command, S9081-AB-GIB-010/MAINT, US Navy.
- COOKE, R. M. (1996) The Design of Reliability Data Bases, Part I: Review of Standard Design Concepts, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol 51, p 139-146.
- COTTRELL, D.F. (1969) - *RADC Nonelectronic Reliability and Maintainability Notebook*, RADC-TR-69-458, Rome, NY.
- CROWDER, M. (2001) - *Classical Competing Risks*, Chapman & Hall/CRC, New York.
- DEELY, J.J. & LINDLEY, D. V. (1981) – Bayes Empirical Bayes, *J Am Stat Assoc*, Vol 76, p 833-841.
- DROGUETT, E. L (2002) *Estimando a Confiabilidade de Produtos em Desenvolvimento*, p.1-13, PPGEP/UFPE, Recife.
- DROGUETT, E. L. & MOSLEH, A. (2002) - *Methodology for the Treatment of Model Uncertainty*, Center for Technology Risk Studies, University of Maryland, USA, Technical Report.
- DROGUETT, E. L. & de SOUZA, A. N. C. (2003) - Taxonomia de banco de dados de confiabilidade para distribuição de gás natural, *XXIII ENEGEP* – Ouro Preto, MG.

- DROGUETT, E. L., GROEN, F. & MOSLEH, A. (2004) – The combined use of data and expert estimates in population variability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 83, p. 311-321.
- DUARTE, D. C. de L. (2004) – A performance overview about fire risk management in the Brazilian hydroelectric generating plants and transmission network, *Journal of Loss Prevention*.
- EIREDA (1991) - *The European Industry Reliability Data Bank Handbook*, Eurospstat, Paris.
- EPSTEIN, B. (1960) - *Tests for the Validity of the Assumption that the Underlying Distribution of Life is Exponential*, Technometrics.
- FIRMINO, P. R., MENÊZES, R. C. & DROGUETT, E. L. (2005) - Método aprimorado para quantificação do conhecimento em análises de confiabilidade por redes Bayesianas, XXXVII SBPO - Gramado, RS.
- FIRMINO, P. R., MENÊZES, R. C. & DROGUETT, E. L. (2006) - Eliciting Engineering Judgments in Human Reliability Assessment, *Proceedings of the 52nd Annual Reliability & Maintainability Symposium (RAMS)*, Newport Beach, USA.
- FOX, J. (1993) – *Quality Trough Design. The Key To Successful Product Delivery*, Ed McGraw-Hill, London.
- FRAGOLA, J. R. (1996) - Reliability and Risk Analysis Data Base Development: An Historical Perspective, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol 51, p 125-136.
- GIDEP (1960) - *Summaries of Failure Rate Data*, GIDEP Operations, Center, Corona, CA.
- GILKS, W. R.; RICHARDSON, W. R. & SPIEGELHARTER, D.J. (1996) – *Markov Chain Monte Carlo in Practic*, Ed. Chapman & Hall, London.
- GROEN, F. J. & DROGUETT, E. L. (2003)- Bayesian Estimation of the Variability of Reliability Measures. *Reliability, Availability and Maintainability Symposium – RAMS*, Florida, USA.
- HOYLAND, A. & RAUSAND, M. (1994) – *System Reliability Theory: Models and Statistical Methods*, Ed. John Wiley & Sons, New York.

- IAEA (1992) – *Manual on Reliability Data Collection for Research Reactor, PSAs*.  
Internacional Atomic Energy, Vienna.
- IEC 50(191) (1990) - *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*, Chapter 191 –  
*Dependability and quality of service*, International Eletrotechnical Commission, Geneva.
- IEEE Std. 352 (1982) - *IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear  
Power Generating Station Protection Systems*, IEEE, New York.
- ISO 14224 (1999) - *Petroleum and Natural Gas Industries – Collection and Exchange of  
Reliability and Maintenance Data for Equipment*, International Organization for  
Standardization, Switzeland.
- KAPLAN S. (1983) - *On a Two Stage Bayesian Procedure for Determining Failure Rates  
from Experimental Data*, IEEE Trans Power Appar Syst.
- MARTIN Co. (1959) - *Procedure and Data for Estimating Reliability and Maintainability*,  
Report No. M-M-P-59-21, Denver.
- MARTZ, H. F. & WALLER, R. A. (1982)- *Bayesian reliability analysis*, 2<sup>a</sup> edição Krieger  
Publishing Company, Florida.
- MIL-HDBK-217E (1982) - *Reliability Prediction of Electronic Equipment*, Department of  
Defence, Washington DC.
- MODARRES, M., KAMINSKIY, M. & KRIVTSOV, V. (1999) - *Reliability Engineering and  
Risk Analysis*, Ed. Marcel Dekker, New York.
- MOSLEH, F.J. (1983) - *Elicitation and Use of Expert Opinion in Reliability and Risk  
Assessment*, p 55, Mestrado – University of Maryland, USA.
- MOUBRAY, J. (1991) – *Reliability-centred Maintenance*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- NOWLAN, F. S. & HEAP, H. F. (1978) – *Reliability-centred Maintenance*, Springfield,  
Virginia.
- OREDA (2002) - *Offshore Reliability Data Handbook*, 4<sup>a</sup> edição, SINTEF.

PORN, K. (1996) – The Two-Stage Bayesian Method Used for The T-book Application, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol 51, p 169-179

RAUSAND, M. & OIEN, K. (1996) - The Basic Concepts of Failure Analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol 53, p 73-83.

SINGPURWALLA, N. D. (1988) - Foundational Issues in Reliability and Risk Analysis, *SIAM Review*, Vol 30 (2), p 264-282.

SIU, N. O. & KELLY D. L. (1998) – Bayesian Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol 62, p 89-116.

WELLMASTER (1995) - *User's Guide and Reliability Data Collection Guidelines for Well Completion Equipment*, SINTEF.

## ANEXOS

## ANEXO 1 (FMEA - PCV)

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PCV	Reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha	ABERTURA	FALHA EM ABRIR	<p><b>CORPO DA PCV</b>  Empenamento da haste do diafragma;  Engripamento da haste do diafragma;  Atrito na haste do diafragma;  Empenamento da haste do obturador;  Engripamento da haste do obturador;  Atrito na haste do obturador;  Engripamento do pino de fixação entra a haste do obturador e a alavanca;  Falha do anel de pressão do pino de fixação da haste do obturador com a alavanca;  Entupimento da tomada de pressão da parte superior do diafragma;  Vazamento pela tomada de pressão da parte superior do diafragma;  Entupimento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Falha de vedação do diafragma;  Rompimento do diafragma;  Vazamento pela câmara da mola do diafragma;  Erro de setagem da mola do diafragma (setagem em excesso);  Falha no pino de fixação da haste do obturador.</p> <p><b>PILOTO</b>  Entupimento da tomada de pressão;  Vazamento pela tomada de pressão;  Entupimento da saída de pressão;</p>

				<p>Vazamento pela saída de pressão;  Entupimento do filtro;  Entupimento do bico;  Perda das propriedades elásticas da mola;  Erro de setagem da mola (setagem de menos)  Falha de vedação dos diafragmas;  Rompimento dos diafragmas;  Desgaste do obturador superior;  Desgaste da sede.</p>
--	--	--	--	--

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PCV	Reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha	ABERTURA	ABRE LENTAMENTE	<p>CORPO DA PCV  Empenamento da haste do diafragma;  Engripamento da haste do diafragma;  Atrito na haste do diafragma;  Empenamento da haste do obturador;  Engripamento da haste do obturador;  Atrito na haste do obturador;  Engripamento do pino de fixação entra a haste do obturador e a alavanca;  Entupimento da tomada de pressão da parte superior do diafragma;  Vazamento pela tomada de pressão da parte superior do diafragma;  Entupimento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Falha de vedação do diafragma;  Rompimento do diafragma;  Vazamento pela câmara da mola do diafragma;  Erro de setagem da mola do diafragma (setagem em excesso).</p>

				<p>PILOTO</p> <p>Entupimento da tomada de pressão;          Vazamento pela tomada de pressão;          Entupimento da saída de pressão;          Vazamento pela saída de pressão;          Entupimento do filtro;          Entupimento do bico;          Perda das propriedades elásticas da mola;          Erro de setagem da mola (setagem de menos)          Falha de vedação dos diafragmas;          Rompimento dos diafragmas;          Desgaste do obturador superior;          Desgaste da sede.</p>
--	--	--	--	--

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PCV	Reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha	ABERTURA	ABRE PARCIALMENTE	<p>CORPO DA PCV</p> <p>Empenamento da haste do diafragma;          Engripamento da haste do diafragma;          Atrito na haste do diafragma;          Empenamento da haste do obturador;          Engripamento da haste do obturador;          Atrito na haste do obturador;          Engripamento do pino de fixação entra a haste do obturador e a alavanca;          Entupimento da tomada de pressão da parte superior do diafragma;          Vazamento pela tomada de pressão da parte superior do diafragma;          Entupimento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;</p>

				<p>Falha de vedação do diafragma;  Rompimento do diafragma;  Vazamento pela câmara da mola do diafragma;  Erro de setagem da mola do diafragma (setagem em excesso);  <b>PILOTO</b>  Entupimento da tomada de pressão;  Vazamento pela tomada de pressão;  Entupimento da saída de pressão;  Vazamento pela saída de pressão;  Entupimento do filtro;  Entupimento do bico;  Perda das propriedades elásticas da mola;  Erro de setagem da mola (setagem de menos)  Falha de vedação dos diafragmas;  Rompimento dos diafragmas;  Desgaste do obturador superior;</p>
--	--	--	--	---

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PCV	Reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha	ABERTURA	ABRE EM EXCESSO	<p><b>CORPO DA PCV</b>  Desgaste da sede;  Desgaste do obturador;  Perda das propriedades elásticas da mola do diafragma;  Erro de setagem da mola do diafragma;  Falha de vedação da junta.  <b>PILOTO</b>  Perda das propriedades elásticas da mola dos obturadores;  Desgaste do obturador inferior;  Entupimento da sede do obturador superior.</p>

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PCV	Reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha	FECHAMENTO	FALHA EM FECHAR	<p><b>CORPO DA PCV</b>  Empenamento da haste do diafragma;  Engripamento da haste do diafragma;  Atrito na haste do diafragma;  Empenamento da haste do obturador;  Engripamento da haste do obturador;  Atrito da haste do obturador;  Engripamento do pino de fixação entra a haste do obturador e a alavanca;  Falha do anel de pressão do pino de fixação da haste do obturador com a alavanca;  Falha do pino de fixação da haste do obturador,  Entupimento da tomada de pressão da parte superior do diafragma;  Entupimento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Vazamento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Desgaste da sede;  Desgaste do obturador;  Perda das propriedades elásticas da mola do diafragma;  Erro de setagem da mola do diafragma;  Falha de vedação da junta.</p> <p><b>PILOTO</b>  Perda das propriedades elásticas da mola dos obturadores;  Desgaste do obturador inferior;  Entupimento da sede do obturador superior;  Entupimento da saída de pressão;  Rompimento do diafragma superior;  Falha de vedação do diafragma superior.</p>

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PCV	Reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha	FECHAMENTO	FECHA LENTAMENTE	<p><b>CORPO DA PCV</b>  Empenamento da haste do diafragma;  Engripamento da haste do diafragma;  Atrito na haste do diafragma;  Empenamento da haste do obturador;  Engripamento da haste do obturador;  Atrito na haste do obturador;  Engripamento do pino de fixação entra a haste do obturador e a alavanca;  Entupimento da tomada de pressão da parte superior do diafragma;  Entupimento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Vazamento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Perda das propriedades elásticas da mola do diafragma;  Erro de setagem da mola do diafragma;  Falha de vedação da junta.</p> <p><b>PILOTO</b>  Perda das propriedades elásticas da mola dos obturadores;  Desgaste do obturador inferior;  Entupimento da sede do obturador superior;  Entupimento da saída de pressão;  Rompimento do diafragma superior;  Falha de vedação do diafragma superior.</p>

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PCV	Reduzir e manter a pressão constante a jusante da linha	FECHAMENTO	FECHA PARCIALMENTE	<p><b>CORPO DA PCV</b>  Empenamento da haste do diafragma;  Engripamento da haste do diafragma;  Atrito na haste do diafragma;  Empenamento da haste do obturador;  Engripamento da haste do obturador;  Atrito na haste do obturador;  Engripamento do pino de fixação entre a haste do obturador e a alavanca;  Entupimento da tomada de pressão da parte superior do diafragma;  Entupimento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Vazamento da tomada de pressão da parte inferior do diafragma;  Desgaste da sede;  Desgaste do obturador;  Perda das propriedades elásticas da mola do diafragma;  Erro de setagem da mola do diafragma;  Falha de vedação da junta.</p> <p><b>PILOTO</b>  Perda das propriedades elásticas da mola dos obturadores;  Desgaste do obturador inferior;  Entupimento da sede do obturador superior;  Entupimento da saída de pressão;  Rompimento do diafragma superior;  Falha de vedação do diafragma superior.</p>

		FECHAMENTO	FECHA EM EXCESSO	<b>CORPO DA PCV</b> Vazamento da tomada de pressão da parte superior do diafragma; Vazamento pela câmara da mola do diafragma; <b>PILOTO</b> Perda das propriedades elásticas da mola; Erro de setagem da mola (setagem de menos)
--	--	------------	------------------	--

SUBSISTEMA	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Piloto da PCV	Regular a pressão do diafragma da PCV de acordo com a pressão a jusante da linha de gás.	Abertura da PCV (pressão a jusante é menor do que a setada na mola deste piloto): força da mola vence a pressão atuando no diafragma do piloto da PCV, levantando a haste de redução e aumentando a pressão que atua no diafragma da PCV, fazendo esta aumentar o fluxo de gás.	Falha em transmitir o sinal para o diafragma da PCV.	Entupimento do furo; Vazamento do tubo que conecta o piloto e a PCV; Vazamento pelas conexões; Rompimento no diafragma do piloto. Falha do redutor (40-5); Falha do redutor (5 – 2.5)
		<u>Fechamento da PCV</u> (pressão a jusante é maior do que a setada na mola deste piloto): força da mola é vencida pela pressão atuando no diafragma do piloto da PCV, abaixando a haste de redução e reduzindo a pressão que atua no diafragma da PCV, fazendo esta reduzir o fluxo de gás.	Transmissão lenta do sinal para o diafragma da PCV.	Presença de ranhuras na haste móvel do piloto da PCV; Falha da mola (perda das propriedades elásticas); Atrito da haste com o corpo do piloto. Falha do redutor (40-5); Falha do redutor (5 – 2.5)
			Falha no comando de fechar.	Rompimento no diafragma do piloto; Falha da mola; Atrito na haste móvel do piloto da PCV.
			Falha no comando de abrir.	Falha da mola; Atrito na haste móvel do piloto da PCV.

SUBSISTEMA	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Redutor de pressão da PCV – Filtro regulador (5kgf/cm <sup>2</sup> – 2.5 kgf/cm <sup>2</sup> )	Reduzir a pressão de 5kgf/cm <sup>2</sup> proveniente do primeiro redutor (40kgf/cm <sup>2</sup> – 5kgf/cm <sup>2</sup> ) para 2.5kgf/cm <sup>2</sup> .  Filtrar o gás para evitar que a sujeira contamine a PCV.  Drenar condensado.	A pressão proveniente do primeiro redutor é admitida pelo furo de admissão, sofrendo uma redução de pressão (5kgf/cm <sup>2</sup> – 2.5kgf/cm <sup>2</sup> ) causada pela perda de carga ao passar pelo orifício entre o obturador e a sede. No caso de uma variação da pressão proveniente do primeiro redutor o mecanismo de auto compensação garantirá uma saída de 2.5 kgf/cm <sup>2</sup> .	Reduz a pressão proveniente do primeiro redutor para uma pressão acima da pressão de trabalho do diafragma do piloto da PCV	Desgaste do obturador; Perda da propriedade elástica da mola do obturador; Falha na vedação pelo diafragma; Falha no diafragma; Falha do redutor (40-5).
			Não reduz a pressão proveniente do primeiro redutor para a pressão de trabalho do diafragma do piloto da PCV	Rompimento total do obturador. Falha do redutor (40-5)
			Reduz a pressão proveniente do primeiro redutor para uma pressão abaixo da pressão de trabalho do diafragma do piloto da PCV	Vazamento do o´ring; Perda da propriedade elástica da mola de auto compensação; Entupimento do filtro; Vazamento pelo dreno; Falha do redutor (40-5).
			Não transmite sinal de pressão para o diafragma do piloto da PCV.	Bloqueio no furo de admissão; Bloqueio no furo de saída. Falha do redutor (40-5)

SUBSISTEMA	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Redutor de pressão da PCV (40 –5)	Reduzir a pressão a montante da linha à pressão de trabalho de 40 para 5 kgf/cm <sup>2</sup> para o segundo redutor de pressão (5 – 2,5)	(Não há distinção entre operação de emergência e normal) A pressão a montante é admitida pelo furo inferior desta válvula, sofrendo uma redução de pressão (40kgf/cm <sup>2</sup> – 5kgf/cm <sup>2</sup> ) causada pela perda de carga ao passar pelo orifício entre o obturador e a sede (teflon). No caso de uma variação de pressão a montante (no lado de 40kgf/cm <sup>2</sup> ) o mecanismo de auto compensação garantirá uma saída de 5 kgf/cm <sup>2</sup> .	Reduz a pressão a montante da linha a uma pressão acima de 5kgf/cm <sup>2</sup> .	Desgaste da sede de teflon; Perda da propriedade elástica da mola do obturador; Desgaste na arruela de fixação do obturador; Desgaste do o´ring. Falha nos diafragmas
			Não reduz a pressão a montante da linha à pressão de trabalho do segundo redutor de pressão da PCV	Rompimento total da sede de teflon.
			Reduz a pressão a montante da linha a uma pressão abaixo da pressão de trabalho do segundo redutor de pressão da PCV	Perda da propriedade elástica da mola de auto compensação; Entupimento na admissão (incrustação na sede por pó preto ou outros resíduos); Vazamento pelo manômetro
			Não transmite sinal de pressão para segundo redutor de pressão da PCV.	Bloqueio no furo de admissão; Bloqueio no furo de saída. Vazamento pelo manômetro

**ANEXO 2 (FMEA - ESDV)**

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
ESDV	Permitir o fluxo de gás durante a operação normal e bloquear o fluxo de gás, durante uma sobre pressão a jusante da linha.	Operação Normal: Portinhola aberta liberando a passagem de gás.	Fechamento indevido	Falha da arruela de pressão para fixação da portinhola; Falha na mola do gatilho; Vibração; Perda da propriedade elástica da mola (acima do diafragma) setagem; Vazamento entre a haste de acionamento do gatilho e seu mancal; Erro de setagem da mola (acima do diafragma).
		Operação Emergência: Portinhola fechada impedindo a passagem do gás.	Falhou em fechar	Engripamento entre a portinhola e o seu eixo; Engripamento entre o gatilho e o seu eixo; Haste de gatilho empenada; Falha de vedação do diafragma; Rompimento do diafragma; Falha nas conexões (com o piloto e a tubulação); Má lubrificação na haste de acionamento do gatilho (atrído pelo mancal).
			Fechamento parcial	Sujeira na sede da válvula; Desgaste do anel de vedação da portinhola; Engripamento entre a portinhola e o seu eixo; Folga do parafuso de fixação da portinhola; Folga anel de pressão de fixação da portinhola.
		Fechamento lento	Engripamento entre a portinhola e o seu eixo; Engripamento entre o gatilho e o seu eixo; Haste do gatilho empenada; Falha de vedação do diafragma; Rompimento do diafragma; Falha nas conexões (com o piloto e a tubulação); Má lubrificação na haste de acionamento do gatilho (atrído pelo mancal).	

			Mau encaixe da portinhola	Presença de sujeira resultando em um mau encaixe da portinhola; Abrasão da portinhola;
--	--	--	---------------------------	---

SUBSISTEMA	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Piloto da ESDV	Transmitir ou não o sinal para o atuador destravar a ESDV. Manter uma pressão constante de 5kgf/cm <sup>2</sup> no atuador.	Operação normal: Entrada de pressão pelo furo 2 e saída para o atuador pelo furo 1 para manter a ESDV armada.	Falhou em transmitir o sinal de pressão (5kgf/cm <sup>2</sup> ) para manter a ESDV armada (alarme falso). Não houve sinal de saída.	Furo 1 bloqueado; Furo 2 bloqueado; Furos 1 e 2 bloqueados; Falha no redutor.
			Transmissão de sinal de pressão insuficiente para manter o atuador armado (abaixo de 5kgf/cm <sup>2</sup> (alarme falso)).	Vazamento no o ring 3; Vazamento nos o rings 4 e 5; Vazamento nos o rings 3, 4 e 5; Falha no redutor; Vazamento pelas conexões que une ao atuador e a Redutora RG.
		Operação emergência: Entrada de pressão pelo furo 1 e saída para a atmosfera pelo furo 3, para desarmar a ESDV	Falhou em liberar o sinal de pressão para a atmosfera para o desarmamento da ESDV.	Furo 1 bloqueado devido a poeira, etc.; Furo 3 bloqueado devido a poeira, etc.; Furos 1 e 3 bloqueados devido a poeira, etc.; Haste do piloto não se movimentou devido ao atrito (má lubrificação, ou presença de sujeira).
			Liberação lenta do sinal para o desarmamento da ESDV	Haste do piloto se movimentou lentamente devido ao atrito (má lubrificação, presença de sujeira); Entupimento do furo 1 devido a poeira, etc.; Entupimento do furo 3 devido a poeira, etc.; Entupimento dos furos 1 e 3 devido a poeira, etc.;

SUBSISTEMA	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Atuador da ESDV	Acionar/liberar o conjunto de haste para desarmamento da ESDV.	Operação normal da linha de gás: Câmara do atuador pressurizada a 5kgf/cm <sup>2</sup> , ou seja, mantendo o conjunto de haste para liberação da ESDV travada (ESDV armada).	Liberou o conjunto de haste para desarmamento da ESDV sem que haja uma sobre pressão na linha.	Vazamento pelo o´ring 3; Vazamento pelo o´ring 1 Vazamento pelos o´rings 3 e 1; Pressão na câmara do atuador inferior a 5kgf/cm <sup>2</sup> ; O vazamento através dos o´rings poderá ser resultado de falha nos procedimentos de manutenção neste equipamento; Falha no redutor de pressão; Falha no piloto; Vazamento nas conexões que une ao piloto; Impacto acidental durante inspeção/manutenção (falha humana).
			Câmara do atuador alimentada com uma pressão superior a 5kgf/cm <sup>2</sup>	Falha do redutor da ESDV (falhou em reduzir de 40 – 5)
		Operação de emergência na linha de gás (sobre pressão a jusante da linha): Câmara do atuador despressurizada (liberando os 5kgf/cm <sup>2</sup> ), desarmando a ESDV	1) Falhou em liberar o conjunto de haste para desarmamento da ESDV durante uma situação de emergência de sobre pressão na linha.	Mola do atuador sem propriedade elástica (desgaste, danos, etc.); Travamento da haste do atuador causado por engripamento; Lubrificação inadequada (atrimento); Falha do piloto.
			2) Liberou com atraso o conjunto de haste para desarmamento da ESDV.	Lubrificação inadequada (atrimento); Mola sem propriedade elástica (desgaste, danos, etc.); Engripamento (causa um destravamento lento da haste do atuador); Falha do piloto.

SUBSISTEMA	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Redutor de pressão da ESDV	Reduzir a pressão a montante da linha à pressão de trabalho do atuador da ESDV.	(Não há distinção entre operação de emergência e normal) A pressão a montante é admitida pelo furo inferior desta válvula, sofrendo uma redução de pressão (40kgf/cm <sup>2</sup> – 5kgf/cm <sup>2</sup> ) causada pela perda de carga ao passar pelo orifício entre o obturador e a sede (teflon). No caso de uma variação de pressão a montante (no lado de 40kgf/cm <sup>2</sup> ) o mecanismo de auto compensação garantirá uma saída de 5 kgf/cm <sup>2</sup> .	Reduz a pressão a montante da linha a uma pressão acima da pressão de trabalho do atuador da ESDV.	Desgaste da sede de teflon; Perda da propriedade elástica da mola do obturador; Desgaste na arruela de fixação do obturador; Desgaste do o´ring; Falha nos diafragmas; Presença de sujeira (pó preto, material da tubulação/pig, pedaço de tela de filtro etc.) fazendo o obturador manter-se levantado.
			Não reduz a pressão a montante da linha à pressão de trabalho do atuador da ESDV	Rompimento total da sede de teflon.
			Reduz a pressão a montante da linha a uma pressão abaixo da pressão de trabalho do atuador da ESDV (alarme falso).	Perda da propriedade elástica da mola de auto compensação; Entupimento na admissão (incrustação na sede por pó preto, material da tubulação/pig, pedaço de tela de filtro, etc.).
			Não transmite sinal de pressão para o atuador.	Bloqueio no furo de admissão; Bloqueio no furo de saída; Quebra da mola de auto compensação; Perda das propriedades elásticas da mola de auto compensação.

## ANEXO 3 (FMEA - PSV)

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
PSV	Aliviar a pressão a jusante da linha de gás em caso de sobre pressão.	OPERAÇÃO NORMAL FECHADA	Falha em manter-se fechada.	Perda das propriedades elásticas da mola; Falha do parafuso de setagem da mola; Erro humano no ajuste da mola.
			Falha em fechar após uma abertura correta após uma sobre pressão na linha.	Sujeira na gaiola; Haste empenada; Atrito no mancal do obturador; Erro humano no ajuste da mola; Perda das propriedades elásticas da mola; Falha do parafuso de setagem da mola.
			Vazamento.	Desgaste da sede (contato metal-metal); Falha nas conexões; Desgaste do o´ring; Perda das propriedades elásticas da mola; Erro humano no ajuste da mola; Falha do parafuso de setagem da mola.
		OPERAÇÃO EMERGÊNCIA ABERTA	Falha em abrir.	Empenamento da haste; Erro humano de setagem da mola; Obstrução da tubulação de alívio em contato com a atmosfera (corpos estranhos, água da chuva, sujeira, etc.) Vazamento nas conexões.
			Abre lentamente, i.e., abriu a uma pressão maior do que a setada na mola.	Empenamento da haste; Atrito no mancal do obturador; Falha no o´ring.
			Abriu parcialmente.	Empenamento da haste; Atrito no mancal do obturador; Falha no o´ring; Obstrução da tubulação de alívio em contato com a atmosfera (corpos estranhos, água da chuva, sujeira, etc.).

**ANEXO 4 (FMEA - Válvula Esfera)**

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA
VÁLVULA ESFERA	Permitir a passagem do gás quando aberta e bloqueia o fluxo do gás quando fechada.	ABERTA	FECHA TOTALMENTE	Falha humana; Sabotagem.
			FECHA PARCIALMENTE	Falha humana; Sabotagem; Deformação na alavanca; Deformação do pino de movimentação da esfera; Sujeira.
		FECHADA	PERMANECE ABERTA TOTALMENTE	Falha humana; Sabotagem.
			PERMANECE ABERTA PARCIALMENTE	Falha humana; Deformação na alavanca; Deformação do pino de movimentação da esfera; Desgaste da sede de teflon.
			VAZAMENTO (ESFERA TOTALMENTE FECHADA)	Falha nas conexões, juntas e o-rings; Desgaste da sede de teflon.

**ANEXO 5 (FMEA - Válvula de Retenção)**

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODOS DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
VÁLVULA DE RETENÇÃO	Impedir o retorno do fluxo de gás. Em uma situação de emergência a portinhola deverá ser fechada devido ao refluxo do gás.	OPERAÇÃO DE PARTIDA	Reabriu lentamente (abriu lentamente após a interrupção do fluxo de gás)	Engripamento do eixo.
		OPERAÇÃO NORMAL ABERTA	Vazamento (para a atmosfera)	Desgaste das juntas metálicas; Falhas nas conexões; Vazamento pelo furo de fixação do eixo da portinhola.
		OPERAÇÃO EMERGÊNCIA FECHADA	Falhou em fechar	Engripamento do eixo; Dimensionamento do projeto; A turbulência do gás poderá causar uma rotação na portinhola, causando falha do grampo que prende a porca de fixação da portinhola.
			Fechou parcialmente	Sujeira na sede; Engripamento do eixo; Folga da portinhola.

## ANEXO 6 (FMEA - Filtro)

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Filtro Tipo cesto	Filtrar o gás, ou seja reter possíveis contaminantes presentes no gás.	CONTÍNUO	Bloqueio do fluxo de gás	Acumulo excessivo de sujeira no gás, i.e., entupimento.
			Bloqueio parcial do fluxo de gás	Acumulo excessivo de sujeira no gás, i.e., entupimento.
			Falha de filtragem	Falha da tela de filtragem; Desgaste do o'ring do cesto; Rompimento da tela de filtragem.
			Vazamento	Falha nas juntas; Desgaste do o'ring da tampa; Falhas nas conexões.
Filtro tipo Y	Filtrar o gás, ou seja, reter possíveis contaminantes presentes no gás.	CONTÍNUO	Bloqueio do fluxo de gás	Acumulo excessivo de sujeira no gás, i.e., entupimento.
			Bloqueio parcial do fluxo de gás	Acumulo excessivo de sujeira no gás, i.e., entupimento.
			Falha de filtragem	Falha da tela de filtragem; Rompimento da tela de filtragem.
			Vazamento	Falha nas juntas; Falhas nas conexões.

**ANEXO 7 (FMEA - Manômetro)**

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO	MODO DE OPERAÇÃO	MODOS DE FALHA	CAUSA DA FALHA
Manômetro	Medir a pressão.	CONTÍNUO	VAZAMENTO	Falha nas conexões; Falha do bordon (rompimento no corpo, etc.); Falha na solda de fixação do bordon; Falha da junta de vedação do relógio.
			FALHA EM MEDIR PRESSÃO	Folga do ponteiro; Falha do bordon (rompimento no corpo, etc.); Falha na solda de fixação do bordon; Entupimento na admissão (tomada de pressão); Empenamento do bordon; Quebra da mola do ponteiro; Empenamento do ponteiro; Sujeira nas engrenagens; Falha na aferição (erro humano); Desgaste da mola; Desgaste da cremalheira; Entrada de corpos estranhos; Engripamento do eixo do ponteiro; Vibração; Erro na colocação do painel de leitura.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)