

**Leonardo Mecabô**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA  
PARA APOIO À MANUTENÇÃO DE TURBOCOMPRESSORES  
CENTRÍFUGOS DE GÁS NATURAL**

**Florianópolis**

**2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA  
APOIO À MANUTENÇÃO DE TURBOCOMPRESSORES CENTRÍFUGOS DE GÁS  
NATURAL**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LEONARDO MECABÔ**

**Florianópolis, junho de 2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA  
APOIO À MANUTENÇÃO DE TURBOCOMPRESSORES CENTRÍFUGOS DE GÁS  
NATURAL**

**LEONARDO MECABÔ**

**Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final**

---

**Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng. – Orientador**

---

**Prof. Fernando Cabral, Ph. D. – Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Acires Dias, Dr. Eng. – Presidente**

---

**Prof. Nelson Back, Ph. D.**

---

**Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.**

*À minha família pelo suporte e confiança no meu sucesso.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus pela inspiração e luz no meu caminho e a Nossa Senhora pela providência dos meios para que este trabalho chegasse ao fim.

Ao Prof. Jonny, pela orientação e pelos esforços para que este projeto gerasse frutos tangíveis, por sua compreensão e paciência diante de alguns tropeços e dificuldades enfrentadas.

Ao Eng. Newton Moura, por sua colaboração corajosa, incentivo e contribuições preciosas durante etapas críticas deste trabalho.

Aos colegas do curso e do NEDIP, que de uma forma ou de outra contribuíram com idéias, atitudes e companheirismo. Em especial ao colega, professor e parceiro Emerson Rigoni, pelo imprescindível compartilhamento de conhecimento e humilde disposição para superar nossas dificuldades no projeto SECOMP. Ao colega Rodrigo Starr, pelo muito bem-vindo interesse em ajudar e preciosas contribuições sobre programação e IA. Ao colega Roberto Perez pela acessibilidade e franqueza durante nosso convívio junto ao NEDIP.

Ao POSMEC, pela forma imparcial e generosa com que me admitiram no programa, e pela compreensão e bom senso no julgamento dos meus atrasos.

À UFSC, por mais uma vez acolher seu pupilo e novamente ter sido minha fonte inesgotável de conhecimento.

À CAPES, pelo preciso e necessário apoio financeiro.

Por fim, aos meus pais, Nelson e Carmen, que sempre se mantiveram firmes e acreditaram no êxito do meu trabalho apesar das insistentes dificuldades. Aos meus irmãos, Pablo e Luiza que são grandes amigos que Deus me presenteou e ao amigo Thiago, que sempre presente é como um irmão.

*“Nenhum computador tem consciência do que faz.  
Mas, na maior parte do tempo, nós também não”.*

Marvin Minsky

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	x
<b>LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS</b> .....	xii
<b>LISTA DE TABELAS E QUADROS</b> .....	xiv
<b>RESUMO</b> .....	xv
<b>ABSTRACT</b> .....	xvi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVO DO TRABALHO .....	4
1.2 O GÁS NATURAL .....	6
<b>1.2.1 Origem e Constituição</b> .....	6
<b>1.2.2 Cadeia Produtiva</b> .....	8
1.2.2.1 Exploração.....	8
1.2.2.2 Produção.....	8
1.2.2.3 Processamento.....	8
1.2.2.4 Transporte .....	9
1.2.2.5 Distribuição .....	9
<b>1.2.3 Estações de Compressão</b> .....	10
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	13
<b>2 COMPRESSORES CENTRÍFUGOS: DOS FUNDAMENTOS À MANUTENÇÃO</b> ..	16
2.1 HISTÓRICO DA APLICAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO.....	16
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS TURBOMÁQUINAS.....	18
<b>2.2.1 Turbinas</b> .....	19
<b>2.2.2 Compressores</b> .....	22
2.2.2.1 Componentes e Sistemas Auxiliares de Compressores Centrífugos.....	27
2.2.2.2 Perfil Operacional de Compressores Centrífugos.....	31
2.3 MANUTENÇÃO NO CICLO DE VIDA DAS TURBOMÁQUINAS.....	35
<b>2.3.1 Definição e Modalidades de Manutenção</b> .....	35
<b>2.3.2 A Manutenção de Compressores Centrífugos</b> .....	38
<b>2.3.3 FMEA – A Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos</b> .....	40
<b>2.3.4 A Manutenção Baseada na Condição</b> .....	44

2.3.4.1 Aquisição de Dados.....	45
2.3.4.2 Processamento de Dados.....	45
2.3.4.3 Tomada de Decisão de Manutenção .....	47
<b>2.3.5 Aplicações da MBC para Turbomáquinas .....</b>	<b>48</b>
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	53
<b>3 SISTEMAS ESPECIALISTAS .....</b>	<b>55</b>
3.1 SISTEMAS ESPECIALISTAS E A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	55
3.2 MODELOS E FASES DE DESENVOLVIMENTO DE UM SE .....	58
<b>3.2.1 Aquisição de Conhecimento .....</b>	<b>60</b>
<b>3.2.2 Representação do Conhecimento.....</b>	<b>62</b>
<b>3.2.3 Implementação do Conhecimento .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.4 Verificação e Validação .....</b>	<b>65</b>
3.3 MÉTODOS DE REPRESENTAÇÃO E MANIPULAÇÃO DE CONHECIMENTO. ....	67
<b>3.3.1 Ontologias, Redes Semânticas e Quadros.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3.2 Regras de Produção .....</b>	<b>71</b>
<b>3.3.3 Modelo de Dempster-Shafer .....</b>	<b>73</b>
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	79
<b>4 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>81</b>
4.1 ANÁLISES REALIZADAS PELO SISTEMA.....	81
4.2 CONHECIMENTO IMPLEMENTADO .....	82
<b>4.2.1 Análise de Performance Termodinâmica .....</b>	<b>82</b>
4.2.1.1 <i>Head</i> Politrópico .....	82
4.2.1.2 Rendimento Politrópico .....	83
4.2.1.3 Potência de Gás.....	84
4.2.1.4 Potência de Eixo.....	84
4.2.1.5 Potência de Acionamento.....	85
4.2.1.6 Curvas de Performance .....	85
4.2.1.7 Comentários sobre a Análise de Performance .....	87
<b>4.2.2 Diagnóstico de Falhas .....</b>	<b>90</b>
4.2.2.1 Classes e Estrutura de Objetos .....	90
4.2.2.2 Estrutura das Regras do Diagnóstico .....	92
4.2.2.3 Implementação do Modelo de Dempster-Shafer.....	93



4.2.2.4 Apresentação dos Resultados.....	94
4.3 VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	96
<b>4.3.1 Pontos Apresentados pelo Especialista</b> .....	96
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	101
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	102
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	106
<b>APÊNDICE A – ESTRUTURA BÁSICA DE UMA ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO</b>	117
A.1 SISTEMA DE ENTRADA E SAÍDA DE GÁS NATURAL.....	118
A.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE GÁS DE UTILIDADES.....	118
A.3 SISTEMA DE COMPRESSÃO DE GÁS NATURAL.....	118
A.4 SISTEMA DE AR COMPRIMIDO.....	119
A.5 SISTEMA DE GERAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	120
A.6 SISTEMA DE ALÍVIO E DESPRESSURIZAÇÃO DE EMERGÊNCIA.....	120
A.7 SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE.....	121
<b>APÊNDICE B – GESTÃO DA MANUTENÇÃO EM ECOMP’S</b> .....	122
B.1 MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE – MCC .....	123
<b>B.1.1 Definição Básica da Confiabilidade</b> .....	123
<b>B.1.2 Origens da Manutenção Centrada na Confiabilidade</b> .....	126
<b>B.1.3 A Manutenção Preventiva na MCC</b> .....	128
B.1.3.1 Tarefas Baseadas no Tempo (BT).....	131
B.1.3.2 Tarefas Baseadas na Condição (BC).....	131
B.1.3.3 Testes para Descobrir Falhas Ocultas (TDF).....	132
B.1.3.4 Manutenção Corretiva (MC).....	133
<b>B.1.4 O Processo de Análise de Sistemas da MCC</b> .....	134
B.1.4.1 Seleção do Sistema e Coleta de Informações.....	134
B.1.4.2 Definição das Fronteiras do Sistema.....	135
B.1.4.3 Descrição do Sistema e o Diagrama de Blocos Funcionais.....	135
B.1.4.4 Funções do Sistema e suas Falhas Funcionais.....	136
B.1.4.5 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	137
B.1.4.6 Análise da Árvore de Decisão.....	137

B.1.4.7 Seleção das Tarefas de Manutenção.....	138
<b>ANEXO A – DADOS DO BEN 2006 SOBRE O GÁS NATURAL.....</b>	<b>143</b>

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
BC	Tarefas Baseadas na Condição
BT	Tarefas Baseadas no Tempo
BEN	Balanco Energético Nacional
CBR	<i>Case-Based Reasoning</i>
CLIPS	<i>C Language Integrated Production System</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CCGT	<i>Combined Cycle Gas Turbine</i>
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i>
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DoD	<i>Department of Defense</i>
ECOMP	Estação de Compressão de Gás Natural
EC	Engenheiro de Conhecimento
EH	Especialista Humano
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GASBOL	Gasoduto Bolívia-Brasil
GN	Gás Natural
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HRSG	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>
HMM	<i>Hidden Markov Model</i>
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i>
IA	Inteligência Artificial
LAN	<i>Local Area Network</i>
LTA	<i>Logic Tree Analysis</i>
MBC	Manutenção Baseada na Condição

MC	Manutenção Corretiva
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MP	Manutenção Preventiva
MSG	<i>Maintenance Steering Group</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OSA-CBM	<i>Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance</i>
O&M	Operação e Manutenção
PHM	<i>Proportional Hazards Model</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
REPLAN	Refinaria do Planalto Paulista
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
RUL	<i>Remaining Useful Life</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SE	Sistema Especialista
SECOMP	Sistema Especialista para Manutenção de Compressores
SEGRED	Sistema Especialista para Gerenciamento de Redes de Gás Natural
SI	Sistema Internacional de Unidades
SPC	<i>Statistical Process Control</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TBG	Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil
TDF	Testes para Descobrir Falhas Ocultas
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural
V&V	Verificação e Validação

## LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1.1 - Esquema simplificado de uma UPGN .....	9
Figura 1.2 - Comportamento da pressão ao longo de um gasoduto .....	12
Figura 1.3 - Esquema simplificado da estrutura de uma estação de compressão .....	13
Figura 2.1 - Diagrama de classificação das turbomáquinas .....	18
Figura 2.2 - Comparação dos perfis típicos das palhetas de turbinas e compressores axiais..	19
Figura 2.3 - Esquema funcional básico de uma turbina a gás .....	20
Figura 2.4 - Diagrama esquemático de uma planta de geração de energia elétrica baseada numa turbina a gás de ciclo combinado (CCGT) .....	21
Figura 2.5 - Turbina a gás: partes principais .....	22
Figura 2.6 - Compressor centrífugo com um estágio simples .....	24
Figura 2.7 - Foto de um compressor centrífugo multiestágio aberto do tipo “ <i>back-to-back</i> dividido horizontalmente” .....	25
Figura 2.8 - Fluxo interno de gás em um compressor centrífugo de dois estágios em corte longitudinal .....	26
Figura 2.9 - Compressor axial aberto de quinze estágios .....	27
Figura 2.10 - Fotos de impelidores dos tipos aberto e fechado .....	27
Figura 2.11 - Detalhe ampliado do princípio de contenção de vazamentos dos selos tipo labirinto .....	28
Figura 2.12 - Mancais axial (esquerda) e radial (direita) com sapatas oscilantes para aplicação em compressores dinâmicos .....	29
Figura 2.13 - Compressor equipado com resfriadores externos ( <i>intercoolers</i> ) .....	29
Figura 2.14 - Cartucho de selagem a gás seco para compressores dinâmicos .....	30
Figura 2.15 - Curvas características dos tipos de sistemas de compressão .....	31
Figura 2.16 - Curvas características do compressor e suas linhas de <i>surge</i> e <i>stonewall</i> .....	33
Figura 2.17 - Relações entre as aplicações de FMEA na indústria automotiva .....	43
Figura 2.18 - Os três passos da MBC .....	45
Figura 2.19 - Os tipos de degradação de eficiência em turbinas a gás .....	50
Figura 3.1 - Estrutura de um SE baseado em regras de produção .....	57
Figura 3.2 - Esquema de interação entre o EC e o especialista no domínio do problema.....	58
Figura 3.3 - Exemplo de uma ontologia de máquinas de potência mecânica com relações do tipo “é-um” (setas tracejadas) e relações do tipo “composto-por” (setas contínuas)	

que se caracteriza por uma rede semântica de classes e instâncias de objetos possíveis nesse domínio.....	69
Gráfico 4.1 - Exemplo de uma das curvas de performance representadas no protótipo de SE	86
Figura 4.1 - Fluxograma da análise de performance implementada no protótipo de SE .....	89
Figura 4.2 - Diagrama de classes dos objetos representados no protótipo .....	91
Figura 4.3 - Esquema de regra para verificar a temperatura alta no mancal axial .....	92
Figura 4.4 - Tela do CLIPS mostrando as mensagens da análise de performance.....	94
Figura 4.5 - Tela do CLIPS mostrando algumas perguntas ligadas ao diagnóstico de falhas.	95
Figura 4.6 - Arquivo HTML mostrando alguns resultados do diagnóstico de falhas .....	95
Figura A.1 - Vista aérea de uma estação de compressão do GASBOL.....	118
Figura A.2 - Esquema funcional simplificado do sistema de compressão .....	120
Figura A.3 - Esquema funcional simplificado do sistema de ar comprimido .....	121
Figura B.1 - Curva da banheira .....	127
Figura B.2 - Árvore de decisão do MSG-2.....	129
Figura B.3 - Curva de identificação do ponto de falha.....	133
Figura B.4 - Passos para a implementação da MCC .....	135
Figura B.5 - Diagrama de blocos funcionais de um compressor centrífugo típico .....	136
Figura B.6 - Estrutura de desdobramento funcional de um compressor centrífugo típico....	137
Figura B.7 - Estrutura de análise da árvore de decisão .....	139
Figura B.8 - Diagrama de decisão para a seleção de tarefas de manutenção .....	140
Gráfico A.1 - Produção anual de fontes renováveis e não renováveis de energia primária em $10^3$ tep (mil toneladas equivalentes de petróleo).....	144
Gráfico A.2 - Consumo anual do GN em $10^6$ m <sup>3</sup> (milhões de metros cúbicos) para os diversos fins .....	144
Gráfico A.3 - Participação anual das fontes primárias de energia no consumo do setor energético em $10^3$ tep .....	145
Gráfico A.4 - Estrutura percentual do consumo anual de fontes primárias de energia pelo setor industrial.....	145
Gráfico A.5 - Evolução anual das reservas provadas de GN no Brasil em $10^3$ m <sup>3</sup> .....	146
Gráfico A.6 - Distribuição da capacidade instalada de plantas de GN por região do país em 2005 .....	146
Gráfico A.7 - Oferta interna percentual de fontes de energia primária no Brasil em 2005...	147
Gráfico A.8 - Estrutura percentual do consumo de GN por tipo de uso no Brasil em 2005 .	147
Gráfico A.9 - Estrutura percentual da oferta de fontes de energia no mundo em 2004 .....	148

**LISTA DE TABELAS E QUADROS**

Tabela 1.1 - Composição molar (%) do GN das principais fontes consumidas no Brasil.....	7
Quadro 2.1 - Exemplo de FMECA dos selos labirinto de um compressor centrífugo .....	41
Quadro 2.2 - Alguns artigos relacionados à MBC de turbomáquinas .....	52
Quadro 3.1 - Taxonomia dos domínios de problemas genéricos de SE's .....	61
Quadro 3.2 - Combinação dos corpos de evidência do exemplo dado pela regra de Dempster	77
Quadro 3.3 - Alguns intervalos evidenciais possíveis no modelo de Dempster-Shafer.....	79
Quadro B.1 - Exemplos de funções e falhas funcionais .....	137
Quadro B.2 - Exemplos de descritores típicos de modos de falha .....	138

## RESUMO

MECABÔ, Leonardo. **Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para apoio à manutenção de turbocompressores centrífugos de gás natural**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

A alta demanda operacional de turbomáquinas devido ao seu papel motor, seja na geração de energia, transporte de fluidos ou aeronáutica, torna esse tipo de equipamento crítico dos pontos de vista funcional, econômico e, mais recentemente, ambiental. A manutenção, como atividade fundamental do período de vida útil de qualquer equipamento mecânico, elétrico ou eletrônico, é o foco deste trabalho. A adequação dessa atividade, no caso das turbomáquinas e de seus subsistemas auxiliares, à política da manutenção centrada na confiabilidade em geral e à aplicação da manutenção baseada na condição, também conhecida como manutenção preditiva, em específico, é a abordagem principal proposta na implementação de um protótipo de sistema especialista para o apoio à tomada de decisão de manutenção de compressores centrífugos aplicados ao transporte de gás natural. Ferramentas como FMEA e *shells*, e técnicas de representação de conhecimento de inteligência artificial como ontologias, redes semânticas e regras de produção são apresentadas e utilizadas como ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento visando o diagnóstico e o prognóstico de falhas em turbomáquinas por meio do monitoramento *on-line* da condição e da performance termodinâmica do ponto de operação. O protótipo implementado não chegou a tal nível de desenvolvimento, mas é capaz de demonstrar a aplicabilidade dos métodos expostos e a viabilidade da abordagem proposta para o problema da manutenção de turbomáquinas.

**Palavras-chaves:** compressores centrífugos, turbomáquinas, sistemas especialistas, manutenção baseada na condição



## ABSTRACT

MECABÔ, Leonardo. **Development of an expert system prototype for support to maintenance of natural gas centrifugal turbocompressors**. 2007. 147 p. Dissertation (Master's Degree in Mechanical Engineering) - Postgraduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

High operational demands of turbomachinery, mainly due to its role as a prime mover of power plants, fluid transportation or aeronautics makes these kind of equipments critical from the functional, economical and, more recently, environmental points of view. Maintenance, as a fundamental activity of the useful life period of any equipment either mechanical, electrical or electronic, is the focus of this work. The adequacy of this activity, in the case of turbomachinery and its auxiliary subsystems, to the reliability-centered maintenance policy in general and to the application of condition-based maintenance, also known as predictive maintenance, in particular, is the main approach proposed in the implementation of an expert system prototype for support to decision making on maintenance of centrifugal compressors applied to natural gas pipeline transportation. Some tools like FMEA and shells as well as some techniques for knowledge representation from the artificial intelligence field like ontologies, semantic nets and production rules are presented and utilized as a baseline for the development of a knowledge-based system for turbomachinery fault diagnosis and prognosis through on-line condition and thermodynamic performance monitoring of the operating point. The implemented prototype has not reached such a level of development, but is able to demonstrate the applicability of the exposed methods and the feasibility of the proposed approach for the turbomachinery maintenance problem.

**Keywords:** centrifugal compressors, turbomachinery, expert systems, condition-based maintenance

## 1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia, fala-se muito em convergência digital de mídias e, de fato, os avanços tecnológicos na área de telecomunicações e microeletrônica portátil têm proporcionado saltos quânticos na popularização e na produção em escala dos produtos advindos dessa revolução digital, inclusive no Brasil. Os complexos sistemas de engenharia, também necessitam de uma convergência digital de soluções para atingir novos patamares tecnológicos, já que muito tem sido desenvolvido cientificamente e rapidamente absorvido pela indústria, porém de forma fragmentada e isolada. A integração de sistemas, bancos de dados em tempo real, interfaceamento de aplicativos, modularidade, enfim, a comunicação e o compartilhamento de dados e informações associados a sistemas inteligentes híbridos que manipulem o conhecimento gerado é a chave para o desenvolvimento de produtos e sistemas mais seguros, eficientes e autogerenciáveis.

Diante de um cenário competitivo de abertura econômica e atração de investimentos, principalmente em áreas estratégicas como a geração e transmissão de energia, transporte e telecomunicações, é fundamental a busca por equipamentos críticos com essas qualidades, pois com o aumento dos riscos e incertezas regulatórias devido às mudanças de políticas governamentais e ambientais, é necessário um planejamento e controle de custos de Operação e Manutenção (O&M) rigorosos para manter-se vivo com lucratividade nesses mercados que demandam grandes investimentos iniciais em equipamentos complexos.

Nesse contexto, as turbomáquinas desempenham um papel central ou fundamental na operacionalização de sistemas de geração de energia e no transporte de fluidos nas indústrias química e petroquímica, assim como na aviação comercial e militar. Os avanços tecnológicos da aviação sempre trouxeram lições importantes para a engenharia como um todo, mas influenciaram de forma decisiva no desenvolvimento das turbomáquinas e da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC). Esse tradicional programa de manutenção possui uma das políticas de gestão e análise da manutenção preventiva mais sistemáticas e focadas na função dos equipamentos técnicos e nas consequências de suas falhas funcionais do ponto de vista operacional, tendo a segurança como prioridade, porém buscando otimizar os custos das tarefas de manutenção. Uma das principais heranças de um programa de MCC efetivo e maduro é o aumento do nível de conhecimento do pessoal de O&M sobre os equipamentos críticos de uma planta industrial ou frota de aeronaves baseados em turbinas a gás. Esse

conhecimento explícito e em parte implícito apresenta um potencial enorme para ser agregado a tecnologias capazes de manipular e gerar conhecimento, como a Manutenção Baseada na Condição (MBC) que trata essencialmente do diagnóstico e/ou do prognóstico de falhas e os sistemas baseados em conhecimento que aplicam técnicas de Inteligência Artificial (IA) capazes de manipular conhecimento e gerar análises complexas similares às de especialistas humanos.

O alto índice de disponibilidade das turbomáquinas é comprovado pelos longos períodos de operação sem que haja a necessidade de paradas para a substituição e/ou reparo de peças e componentes internos. A sua concepção relativamente simples trouxe como consequência a alta confiabilidade e a elevada relação potência/dimensões; essas que são algumas das características fundamentais responsáveis pela popularização do uso das turbomáquinas, primeiro na aviação e, mais tarde, na geração de energia e no transporte de grandes volumes de fluidos. Por conseguinte, falhas catastróficas são bastante raras nesse tipo de equipamento, devido, sobretudo, à grande quantidade de instrumentos e dispositivos de proteção e intertravamento, que permitem o monitoramento da condição e o desarme automático da máquina antes do comprometimento físico dos seus componentes, e também devido às características de degradação física lentas e dependentes praticamente apenas da qualidade dos fluidos veiculados e do controle das condições de operação do processo.

Contudo, em função principalmente do elevado consumo de combustível é uma necessidade premente avaliar a eficiência global desses equipamentos, pois sua deterioração excessiva pode significar grandes prejuízos financeiros para uma planta industrial, além de lançar maiores quantidades de resíduos poluentes na atmosfera. A forma de manutenção mais utilizada para evitar a ocorrência de falhas e a redução da eficiência térmica de turbomáquinas é a manutenção/revisão geral, efetuada após o desligamento completo da máquina, onde se executa a limpeza geral das partes internas, repara-se e/ou substitui-se componentes eventualmente danificados e realizam-se inspeções dimensionais e ajustes das partes móveis da turbomáquina. A frequência dessa rotina varia significativamente conforme as características de operação de cada turbomáquina, sendo na maioria das vezes baseada na experiência do pessoal de O&M, utilizando-se um intervalo de tempo predeterminado, obtido normalmente de recomendações do fabricante e refinado de forma empírica.

Uma das formas de reduzir a frequência de paradas programadas é acompanhar o processo de degradação interna de uma turbomáquina para determinar mais precisamente

quando uma parada para manutenção é realmente necessária, ou melhor, quando a queda de eficiência e/ou a perda de potência atingem níveis que justificam tal ação. O monitoramento da performance aero/termodinâmica é uma das formas de se acompanhar esse processo de degradação, sem a necessidade de instalação de instrumentos adicionais ou mais complexos (DE MARIA; GRESH, 2006). As técnicas para a implementação da MBC, tratadas como manutenção preditiva na MCC, são ideais para este tipo de máquina e têm sido aplicadas tanto para o monitoramento da condição/performance como para o diagnóstico ou prognóstico de falhas; seja pela análise ou monitoramento de vibrações como pela determinação de intervalos ótimos de lavagens *on-line* e *off-line* dos componentes internos.

Uma das tecnologias mais promissoras para a implementação da MBC de turbomáquinas é o paradigma computacional de sistemas especialistas (SE's), uma das frentes da abordagem de IA para o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico e prognóstico de falhas. Alguns fatores ressaltam oportunidades e, portanto, justificam a aplicação deste tipo de sistema:

- a) Os problemas de diagnóstico e/ou prognóstico de falhas em turbomáquinas envolvem correlações entre várias variáveis associadas ao processo propriamente dito (*e.g.*, compressão de gases industriais, geração de energia termelétrica) e também aos seus subsistemas auxiliares, as quais devem ser acompanhadas temporalmente para análises de tendência e comparação com a performance esperada o que exige, além da coleta e armazenamento de dados, um modelo amplo e hierarquizado do sistema analisado que represente os componentes e subsistemas da planta em termos de relevância e relação funcional entre si;
- b) Na prática, as falhas podem até serem detectadas pelos próprios subsistemas computacionais ou microeletrônicos instalados nas turbomáquinas diretamente pelo fabricante, conectados a alguma ferramenta centralizadora de dados e informações (*e.g.*, sistema supervisório, CLP). Porém, geralmente é necessária a intervenção de um operador experiente ou especialista para interpretar os sinais de alerta ou alarmes emitidos por essas ferramentas em relação ao equipamento como um todo, a fim de tomar as ações necessárias em resposta a uma determinada situação de falha iminente ou pane;
- c) A forma de análise de um especialista humano que resolve problemas associados a falhas de turbomáquinas é geralmente baseada em informações aparentemente isoladas, mas conscientemente associadas entre si através de algum tipo de

conhecimento advindo de sua experiência de campo; sendo essa normalmente acumulada com o enfrentamento de algumas dezenas de casos que se repetem diante de certas condições ou situações que passam a ser facilmente identificadas pelo especialista. Esse tipo de conhecimento é chamado heurístico, de natureza prática e normalmente adquirido implicitamente;

- d) As informações fornecidas pela intensa instrumentação das turbomáquinas podem ser centralizadas por sistemas supervisórios ou bancos de dados em tempo real com taxas variáveis de amostragem, podendo ser utilizadas por sistemas baseados em conhecimento, como SE's. A capacidade desses sistemas de representar e tratar conhecimento de mais alto nível utilizando modelos cognitivos, através da combinação de diferentes técnicas de IA, é potencializada pela digitalização em massa dos dados do processo e pela implementação de redes industriais de alta velocidade.

Esses fatores estabelecem também a motivação para a implementação de ferramentas computacionais inteligentes com uma abordagem voltada para a emulação da capacidade de resolução de problemas de um especialista humano pela própria natureza da análise exigida, e também, diante da possibilidade de serem integradas a redes industriais que viabilizem a disponibilidade de dados e informações *on-line* sobre um determinado processo industrial para outros sistemas de apoio, como um SE para a MBC de turbomáquinas. Embora uma ênfase maior seja dada ao processo de compressão de gás natural, essa tecnologia também pode ser aplicada à MBC de turbomotores aeronáuticos, implementando-a por meio dos seus sistemas aviônicos. Entretanto, as discussões apresentadas neste trabalho terão sempre como referência a aplicabilidade das técnicas aqui propostas à realidade das turbomáquinas industriais.

## 1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é demonstrar como a técnica de sistema especialista pode ser empregada na implementação de diagnósticos de falhas automatizados para turbomáquinas com o intuito de auxiliar equipes de operação e manutenção. Por meio do monitoramento da performance aero/termodinâmica, esse tipo de sistema visa permitir a redução dos custos de operação e manutenção desses equipamentos com uma maior precisão na identificação de causas de perdas de eficiência para a especificação e planejamento de tarefas de manutenção.

Os objetivos específicos são:

- a) Descrever as características físicas, construtivas e operacionais dos compressores centrífugos e sua relação e semelhança com as demais turbomáquinas com o intuito de demonstrar a extensibilidade da abordagem desenvolvida para essa família de equipamentos;
- b) Apresentar os conceitos e as técnicas de manutenção e análise de falhas que justificam, auxiliam e contextualizam a aplicação de ferramentas inteligentes na decisão de manutenção de turbomáquinas;
- c) Apresentar as principais técnicas de inteligência artificial para representação de conhecimento e tratamento de incerteza que podem ser empregadas no problema do diagnóstico de falhas em turbomáquinas;
- d) Desenvolver um protótipo de sistema especialista para apoio à manutenção de compressores centrífugos que realize uma análise de performance termodinâmica para determinar as causas mais prováveis de falhas;
- e) Apresentar resultados qualitativos considerando-se a adequação dos métodos empregados e a emissão de análises coerentes com o nível do conhecimento disponibilizado e implementado no protótipo.

A solução encontrada será apresentada sob os contextos de sistemas de compressão de gás natural baseados na aplicação de turbocompressores centrífugos como estudo de caso, da manutenção centrada na confiabilidade como política de gestão da manutenção, e da manutenção baseada na condição como conceito de implementação de ferramentas computacionais para o diagnóstico e o prognóstico de falhas em equipamentos mecânicos. Os dados utilizados na implementação do protótipo são baseados em equipamentos reais, especificamente ligados às estações de compressão do GASBOL.

É importante ressaltar que este trabalho surgiu de uma necessidade trazida pela indústria de petróleo e gás natural, cuja idéia de um módulo para a manutenção de estações de compressão surgiu dentro do contexto do projeto SEGRED (v. seção 3.2.3, p. 62), que contempla um SE aplicado ao gerenciamento de redes de transporte de gás natural. Entretanto, o projeto SECOMP (Sistema Especialista para Manutenção de Compressores), que deu origem a este trabalho de mestrado e que seria considerado um desdobramento do projeto SEGRED, não foi efetivado pelas empresas interessadas em tempo hábil para ser considerado no desenvolvimento deste mestrado. Isto em parte limitou a amplitude de desenvolvimento do

protótipo gerado, e também impediu uma especificação de requisitos mais voltada para as necessidades específicas das empresas-alvo, parceiras do projeto. Isto gerou algumas dificuldades no desenvolvimento do protótipo já que algumas etapas do processo de aquisição de conhecimento poderiam ter sido completadas mais rapidamente ou até mesmo eliminadas com uma definição mais precisa do problema, caso houvesse profissionais experientes comprometidos com o projeto SECOMP.

## 1.2 O GÁS NATURAL

O uso do gás natural como fonte de energia era pouco difundido até recentemente, tanto no Brasil quanto no exterior. A expansão recente da demanda por gás está relacionada ao aumento de reservas disponíveis e da produção, sobretudo próximo aos centros consumidores; aos choques internacionais de preços de petróleo, que viabilizaram economicamente a substituição desse energético por outros alternativos; ao progresso técnico, que aumentou a eficiência da geração elétrica de usinas baseadas no consumo de gás natural; e até a fatores ambientais, devido à crescente pressão de governos e consumidores para o uso de energias mais “limpas” (ou que causam menos impactos ambientais) (ANP, 2001).

No Brasil essa expansão se deu mais tardiamente e com algumas diferenças fundamentais em relação ao que ocorreu nos países industrializados. Também o grau de desenvolvimento do mercado de gás brasileiro é inferior ao de países europeus, ou mesmo da Argentina, mas a previsão de demanda para os próximos anos não é nada desprezível. O principal setor de consumo final no país ainda é o industrial, mas, no futuro próximo, a geração de energia termelétrica deve abranger boa parte do mercado, sendo a maior responsável pela impulsão da demanda nacional (ANP, 2001)<sup>1</sup>. O Anexo A traz os últimos dados sobre o uso do gás natural no Brasil, levantados no Balanço Energético Nacional (BEN) de 2006, porém referentes ao ano de 2005.

### 1.2.1 Origem e Constituição

---

<sup>1</sup> De fato, a termelétricidade constitui o que se denomina um “consumo-âncora” para a oferta de gás no Brasil. Urge lembrar que o custo fixo elevado de transporte e de distribuição de gás faz com que seja necessário garantir um consumo mínimo regular para o gás ou, em outras palavras, um consumo-âncora. Este consumo-âncora baseia-se em aparelhos de consumo com elevado fator de utilização; concentrando-se, em geral, em um número restrito de unidades industriais e centrais elétricas com consumo elevado e regular (ANP, 2001).

O Gás Natural (GN) é um combustível fóssil encontrado no subsolo, podendo estar associado ou não ao petróleo. Sua formação é proveniente da matéria orgânica (microflora marinha) acumulada em rochas argilosas que sofrem a ação de elevadas temperaturas (acima de 100 °C). Esse ambiente desencadeia reações químicas que transformam essa matéria orgânica em hidrocarbonetos os quais, ao longo dos anos, se acumulam em rochas porosas (MARTINS, 2005). Ele é extraído de jazidas naturais subterrâneas, compostas por rochas sedimentares porosas e permeáveis e cobertas por extratos impermeáveis que impedem sua saída para o exterior.

O GN é composto por gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados, predominando o metano (cerca de 90%) e, em menores quantidades, etano, propano e butano, entre outros. Existe, ainda, a presença de contaminantes como nitrogênio, dióxido de carbono, vapor d'água, gás sulfídrico e demais compostos de enxofre. O GN permanece no estado gasoso nas condições normais de temperatura e pressão. Mais leve que o ar, o GN se dissipa facilmente na atmosfera em caso de vazamento. Essa característica dificulta a detecção de vazamentos ao longo de gasodutos, mas, por outro lado, favorece a segurança operacional. Para que se inflame, é preciso que seja submetido a uma temperatura de cerca de 600 °C, que caracteriza um valor típico da sua temperatura de auto-ignição. A título de comparação, vale lembrar que o álcool se inflama a 200 °C e a gasolina a 300 °C. Além disso, o GN é incolor e inodoro, queimando com uma chama quase imperceptível, o que o leva a ser odorizado com enxofre por questões de segurança para efeito de comercialização. Sua combustão é limpa, razão pela qual dispensa o tratamento dos produtos lançados na atmosfera (MARTINS, 2005). A Tabela 1.1 mostra exemplos da composição molar do GN distribuído no Brasil proveniente das principais jazidas que abastecem o país atualmente.

Tabela 1.1 - Composição molar (%) do GN das principais fontes consumidas no Brasil.

Componente	GN de Campos	GN de Santos	GN da Bolívia
Metano	89,35	88,321	91,80
Etano	8,03	6,064	5,58
Propano	0,78	3,073	0,97
Iso-Butano	0,04	0,443	0,03
N-Butano	0,03	0,704	0,02
Pentano	0,01	0,273	0,10
Hexano e superiores	-	0,080	-
Dióxido de carbono	0,48	0,157	0,08
Nitrogênio	1,28	0,683	1,42

Fonte: COSTA, 2007.



## 1.2.2 Cadeia Produtiva

Em linhas gerais, a cadeia produtiva do GN pode ser dividida em cinco atividades interligadas: exploração, produção, processamento, transporte e distribuição, as quais serão brevemente elucidadas a seguir (PRAÇA, 2003).

### 1.2.2.1 Exploração

A exploração é a etapa inicial do processo e consiste no reconhecimento e estudo das formações propícias ao acúmulo de petróleo e/ou GN. A perfuração de poços exploradores permite comprovar a existência e a qualidade comercial dos hidrocarbonetos. Existindo a viabilidade econômica, os campos são desenvolvidos pela perfuração de poços e da instalação de infra-estruturas que permitam a extração e o escoamento dos produtos.

### 1.2.2.2 Produção

Na fase de produção, que pode ser em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*), o gás deve passar inicialmente por vasos separadores que são equipamentos projetados para retirar a água, os hidrocarbonetos que estiverem em estado líquido e as partículas sólidas (pó, produtos de corrosão, etc.). Nessa fase, se estiver contaminado por compostos de enxofre, o gás é enviado para Unidades de Dessulfurização, onde esses contaminantes serão retirados. Após essa etapa, uma parte do gás é utilizada no próprio sistema de produção, em processos conhecidos como reinjeção e *gas lift*, com a finalidade de aumentar a recuperação de petróleo do reservatório, no caso de gás associado. O restante é escoado para as unidades de processamento, podendo também ser consumido internamente na geração de eletricidade e vapor. Caso não haja infra-estrutura suficiente que permita o seu aproveitamento, o produto é simplesmente queimado. Em plataformas marítimas, o GN deve ser desidratado antes de ser enviado para terra, para evitar a formação de hidratos, que são compostos sólidos que podem obstruir os gasodutos. Outra situação que pode ocorrer é a reinjeção do gás para armazenamento no reservatório se não houver consumo para o mesmo.

### 1.2.2.3 Processamento

Para adquirir as características comerciais desejadas o GN bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), na qual o produto é desidratado

e fracionado (Figura 1.1), gerando três subprodutos: o GN Processado, formado a partir do Metano ( $\text{CH}_4$ ) e Etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ); o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), originado do Propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) e do Butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) e a Gasolina Natural (Compostos de  $\text{C}_5$ ,  $\text{C}_6$ ,  $\text{C}_7$ , ...).

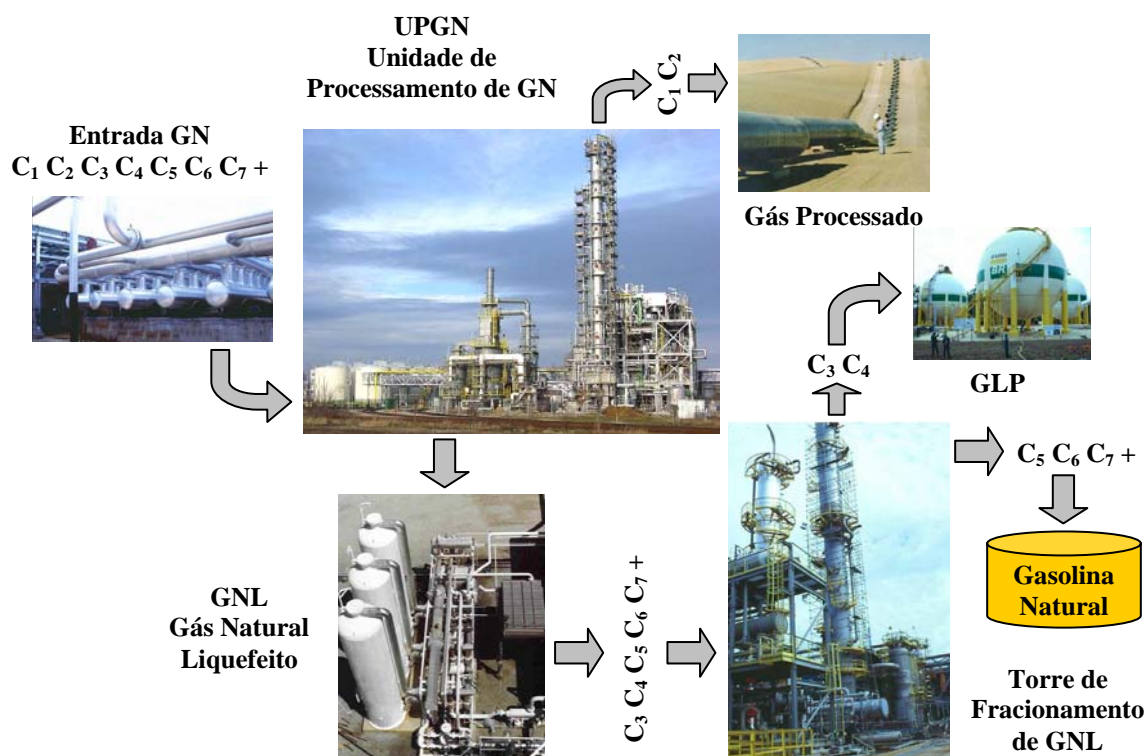


Figura 1.1 - Esquema simplificado de uma UPGN.  
Fonte: adaptado de PRAÇA, 2003.

#### 1.2.2.4 Transporte

O transporte do GN é uma das atividades críticas do processo, podendo ser realizado basicamente de duas maneiras: no estado gasoso e no estado líquido. No estado gasoso, o transporte é feito tradicionalmente por meio de dutos, ou então, valendo-se de tecnologias mais recentes que utilizam cilindros de alta pressão como o Gás Natural Comprimido (GNC) e o Gás Natural Adsorvido (GNA). Já no estado líquido, na forma de Gás Natural Liquefeito (GNL), pode ser transportado por meio de navios, caminhões e trens criogênicos a uma temperatura de  $-160\text{ }^\circ\text{C}$ , sendo seu volume reduzido em cerca de 600 vezes, facilitando o armazenamento. Nesse caso, para ser utilizado, o gás deve ser revaporizado em equipamentos apropriados de plantas de regaseificação.

#### 1.2.2.5 Distribuição

A distribuição é também uma das atividades críticas do processo e constitui-se na etapa final da cadeia, quando o gás chega ao consumidor residencial, comercial, industrial ou automotivo. Em geral, essa atividade é realizada através de gasodutos. Porém, em regiões onde a disponibilidade de redes de gás é pequena, já está sendo possível antecipar a chegada do produto através da distribuição a granel na forma de GNL ou GNC, técnica conhecida como gasoduto virtual. Nessa fase, o gás já deve atender a padrões rígidos de especificação e estar praticamente isento de contaminantes que podem causar problemas aos equipamentos que serão alimentados pelo combustível. Quando necessário, deverá também estar odorizado. Tal prática permite que o combustível seja detectado mais facilmente em caso de vazamentos.

### 1.2.3 Estações de Compressão

Estações de bombeamento para oleodutos e estações de compressão para gasodutos são partes de uma rede de transporte de petróleo e de gás natural respectivamente, tão importantes quanto as linhas propriamente ditas. Existem dois tipos básicos de estações de bombeamento e compressão em um sistema de transporte de petróleo ou de GN: a estação de origem, na entrada da rede, em geral mais complexa; e as estações de propulsão, ao longo da linha principal, que contêm menos equipamentos. Qualquer sistema de transporte de petróleo, derivados ou GN necessita desses tipos de estações, embora existam alguns casos onde a pressão natural do poço de extração é alta o suficiente para fazer com que os fluidos do petróleo cheguem à planta de processamento ou aos tanques de armazenamento (KENNEDY, 1993).

Em geral, os fluidos deixam uma estação de compressão ou bombeamento a uma dada pressão de descarga. À medida que a distância da estação aumenta, a pressão na linha cai devido às perdas por atrito ou elevações do relevo. Se o comprimento da linha é tal que a queda de pressão irá consumir toda a energia fornecida pela bomba ou compressor, fazendo com que a pressão de operação fique abaixo da pressão de entrega, outra estação de compressão ou de bombeamento – uma estação de propulsão – será necessária. O número de estações de propulsão varia bastante tanto em sistemas de GN como de subprodutos líquidos do petróleo. A maioria dos grandes sistemas de transporte com um bom número de estações de compressão ou bombeamento representa um compromisso entre um número pequeno de grandes estações ou um grande número de pequenas estações de propulsão. A vantagem de poucas estações é a operação, controle e manutenção mais centralizados. Entretanto, quanto

maior o tamanho da estação, maiores dimensões de dutos serão necessárias para suportar a pressão de saída. Conforme foi visto, estações de bombeamento e estações de compressão têm muitas características em comum, especialmente do ponto de vista funcional, numa rede de transporte de derivados de petróleo. A diferença fundamental entre essas é o fluido sendo transportado: líquidos são incompressíveis e gases são compressíveis. Compressores, assim como bombas, adicionam energia ao fluxo de massa fazendo com que o fluido se mova ao longo do duto (KENNEDY, 1993).

O principal componente de qualquer sistema de transporte de GN é a estação de compressão (CARTER, 1996). O sistema de compressão, dentre outros que constituem uma estação de compressão (v. Apêndice A), é responsável pela execução da tarefa fundamental da estação que é garantir a capacidade de entrega do GN dentro das especificações de pressão operacionais. Os compressores são os propulsores fundamentais do gás; sem eles não há capacidade de transporte. Eles podem tanto custar muito para entrar em funcionamento como causar grandes perdas de capacidade requerida. Mesmo assim, simplesmente conter custos de operação ou entregar a capacidade contratada pode causar perdas financeiras, pois sua demanda operacional é essencialmente variável, o que exige uma solução de compromisso entre esses fatores. Essa é a razão pela qual a utilização dos compressores deve ser otimizada (WRIGHT *et al.*, 1998).

Na operação de um gasoduto, os controladores de uma estação de compressão (ECOMP) devem trabalhar com dois objetivos básicos em mente: uma pequena “zona de conforto” e uma flutuação mais baixa possível das curvas de pressão do gasoduto. A zona de conforto é um fator de segurança utilizado pelos controladores para garantir o fornecimento adequado de GN independentemente das variações de demanda dos clientes. Uma zona de conforto menor significa menos consumo de combustível. Já uma menor flutuação de pressão no gasoduto significa uma operação mais suave do gasoduto. Assim, flutuações excessivas de pressão causam custos de O&M desnecessários. Os controladores mais experientes são capazes de satisfazer as demandas dos clientes com uma zona de conforto menor e uma flutuação mais baixa da pressão no gasoduto. Sendo assim, os controladores devem tomar duas decisões vitais: (1) quando aumentar e diminuir a compressão do GN e, (2) qual unidade compressora em particular deve ser ligada ou desligada. Essas decisões têm um impacto significativo na eficácia das operações de um gasoduto de GN (SUN *et al.*, 2000).

Nos gasodutos de GN para o transporte de longa distância, as pressões usuais podem atingir de 100 a 150 kgf/cm<sup>2</sup>, logo após a ECOMP, caindo, ao longo do gasoduto, até cerca de 30 a 40 kgf/cm<sup>2</sup>, quando deverá haver outra ECOMP (Figura 1.2). Esse ciclo pode se repetir várias vezes, permitindo atingir distâncias praticamente ilimitadas. Nas redes de distribuição para consumo urbano a pressão nos ramais principais é reduzida para 5 a 6 kgf/cm<sup>2</sup> (ABREU; MARTINEZ, 1999).

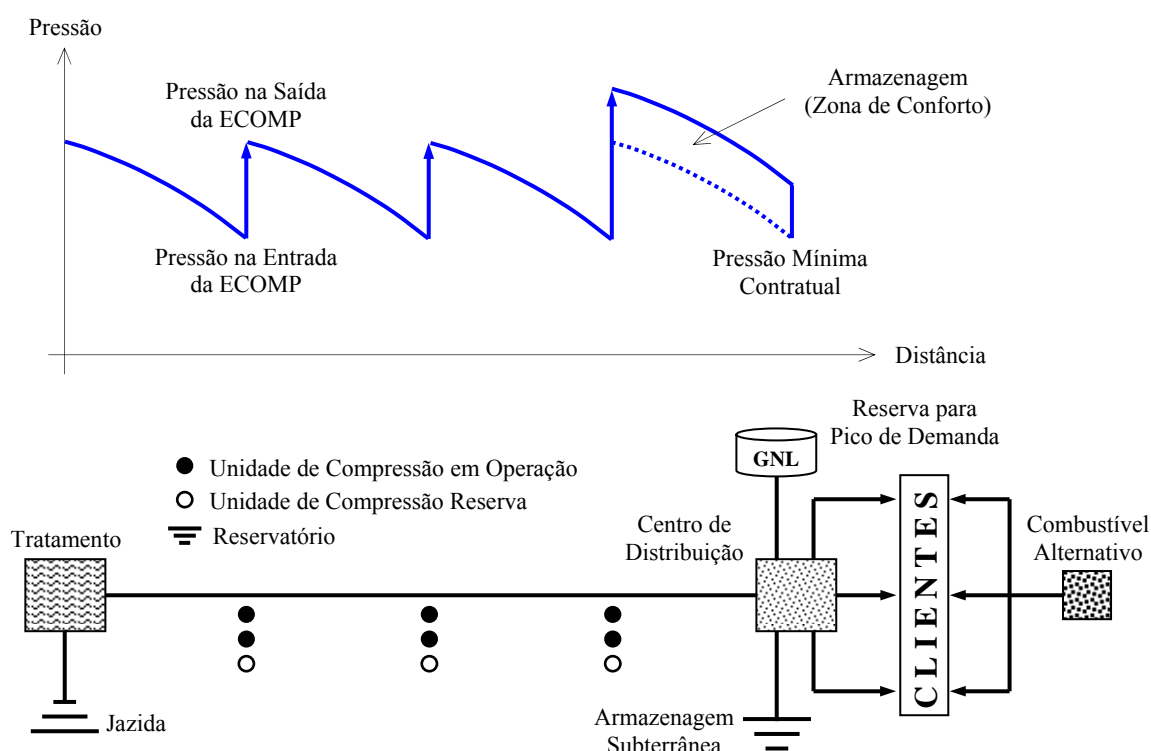


Figura 1.2 - Comportamento da pressão ao longo de um gasoduto.  
Fonte: ABREU; MARTINEZ, 1999.

Um esquema simplificado da estrutura de uma ECOMP é ilustrado na Figura 1.3 para auxiliar a visualização do processo de compressão que ocorre, sucintamente, da seguinte forma nas ECOMP's do GASBOL (trecho norte): o desvio do fluxo de GN para a ECOMP é feito por uma derivação da linha tronco do gasoduto a montante da válvula de *by-pass* da estação. Esse gás, após passar por um *scrubber* (uma espécie de filtro de maior capacidade, mais complexo), onde partículas sólidas de até 10 micrometros e possíveis condensados são removidos, chega até o coletor de sucção do sistema de compressão. Nesse ponto, é feita uma extração de gás para o suprimento do gás de utilidades, necessário ao funcionamento dos motores de partida e combustão nas turbinas que, por sua vez, acionam os compressores centrífugos. O GN após a compressão é enviado para os resfriadores a ar para a redução de

temperatura abaixo do limite máximo de 48 °C. A saída do GN dos resfriadores é então direcionada para o coletor de descarga do sistema de compressão que redireciona o fluxo para a saída da estação pela derivação da linha tronco a jusante da válvula de *by-pass* (MARCELINO, 2005).

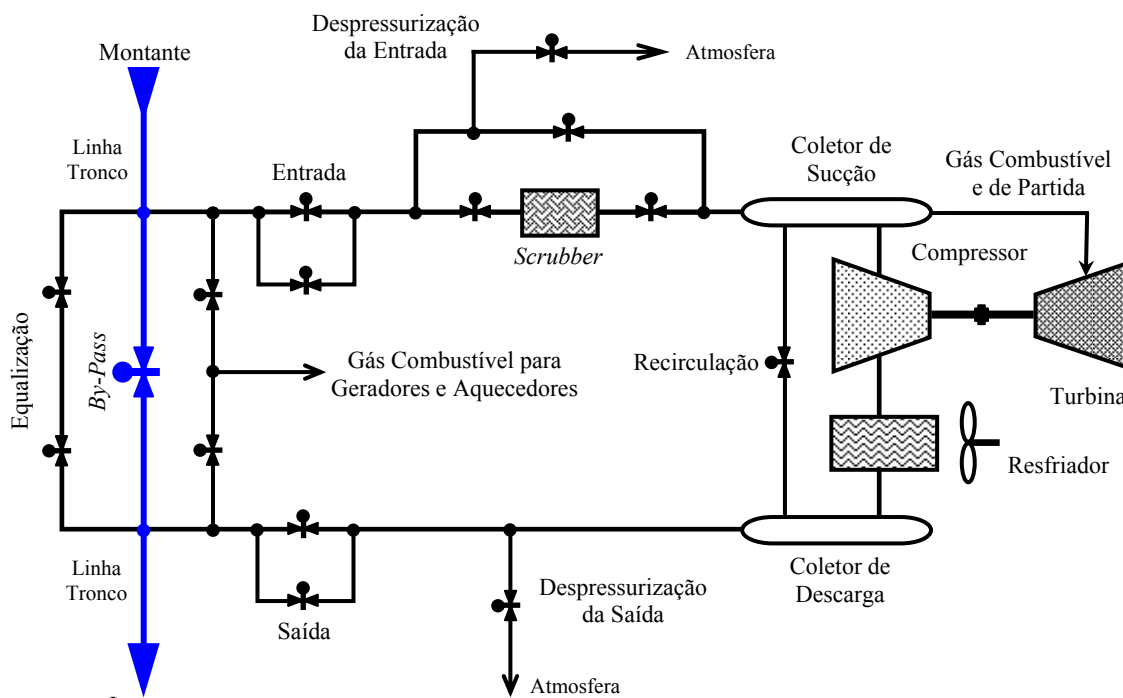


Figura 1.3 - Esquema simplificado da estrutura de uma estação de compressão.  
Fonte: adaptado de MARCELINO, 2005.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto desta dissertação está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 trata da revisão dos conceitos fundamentais das turbomáquinas em geral e dos compressores centrífugos em específico. Além de ser buscada uma breve caracterização dos principais componentes e subsistemas que compõe o maquinário de um compressor centrífugo, já que esse se constitui num dos principais tipos de conhecimento a ser modelado no protótipo desenvolvido, procura-se apresentar os aspectos operacionais básicos das turbomáquinas, pois esses têm uma influência significativa nas possíveis falhas que podem ocorrer durante a sua fase de uso. Como a forma utilizada de sistematização do conhecimento sobre falhas é a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), essa ferramenta será devidamente apresentada e revisada com o propósito de fundamentar sua implementação no SE proposto. Ainda nesse capítulo são abordados os fundamentos da atividade de manutenção com uma

visão de sua aplicabilidade para o caso das turbomáquinas. Serão revisados os fundamentos de um tipo específico de programa de manutenção chamado Manutenção Baseada na Condição que tem sido aplicado como um dos conceitos mais promissores, porém, na visão do autor, ainda pouco explorado como método de implementação da manutenção preditiva de turbomáquinas.

No Capítulo 3, são apresentados os métodos e a metodologia empregados na implementação do protótipo com ênfase nas etapas de desenvolvimento de um SE, assim como, nas características peculiares dos métodos tradicionais de IA para a representação e manipulação de conhecimento que tornam a abordagem de SE interessante aos sistemas para a MBC de equipamentos mecânicos. O modelo de Dempster-Shafer é apresentado com um nível maior de detalhes já que esse método para o tratamento da incerteza ainda não havia sido utilizado nos trabalhos anteriores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Sua abordagem é promissora e alguns trabalhos são referenciados nesta dissertação como base para sua aplicabilidade no diagnóstico de falhas em turbomáquinas.

A descrição do protótipo de SE proposto neste trabalho é realizada no capítulo 4, onde se demonstra como foram implementadas as técnicas e métodos de representação e manipulação de conhecimento apresentados no Capítulo 3, através da sistematização e modelagem do conhecimento parcialmente trazido no Capítulo 2. A solução apresentada não é única e, portanto, seus resultados preliminares serão discutidos em relação ao conhecimento disponibilizado e acumulado ao longo do período de mestrado do autor.

De forma complementar ao Capítulo 1, que apresenta o problema tratado neste trabalho e parte do contexto de sua aplicação, o Capítulo 5 traz as conclusões obtidas, assim como, propõe sugestões para trabalhos futuros que certamente podem evoluir os pontos apresentados e alcançar novas visões e resultados mais concretos sobre a tecnologia de MBC para turbomáquinas e, provavelmente, para outros tipos de equipamentos industriais. Contudo, reconhece-se que essa tarefa não é simples, pois esses equipamentos são caros e dificilmente estarão à disposição de pesquisadores para a condução de testes e experimentos necessários para a implementação efetiva destes sistemas. Ainda assim, sua aplicação é demonstrada viável e os resultados são promissores, tendo em vista que a operação de turbomáquinas é dispendiosa e a própria indústria tem demonstrado crescente preocupação com as perdas advindas do seu uso ineficiente.

O Apêndice A descreve os sistemas fundamentais de uma estação de compressão de gás natural, suas funções e equipamentos principais. O Apêndice B apresenta as origens e os conceitos da MCC que fundamentam o contexto deste trabalho, bem como ilustra de forma sucinta as etapas do processo de análise de sistemas dessa metodologia através de exemplos baseados no tipo de compressor aqui considerado. O Anexo A traz alguns gráficos provenientes do BEN 2006 que ilustram o uso crescente do GN na matriz energética nacional.



## 2 COMPRESSORES CENTRÍFUGOS: DOS FUNDAMENTOS À MANUTENÇÃO

### 2.1 HISTÓRICO DA APLICAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO

O compressor centrífugo pertence à classe das máquinas produtoras de vazão conhecidas como turbocompressores. Assim como em outras turbomáquinas, a energia é transferida dinamicamente para o fluido de trabalho por meio de um componente rotativo (impelidor) que atua de forma contínua no escoamento de forma a aumentar a pressão do fluido a jusante do escoamento. Por isso a evolução do compressor centrífugo sempre esteve diretamente relacionada ao desenvolvimento das turbomáquinas em geral.

Uma das primeiras aplicações documentadas de turbomáquinas data de 60 d.C. aproximadamente. Na época, Heron de Alexandria (de origem grega) presumidamente projetou seu primeiro motor a vapor. Nele foi desenvolvido o princípio da reação ao fluxo radial do vapor bastante semelhante aos modernos borrifadores giratórios de água. Heron também descreveu um modelo acionado por ar quente ao invés de vapor que foi provavelmente uma das primeiras máquinas a utilizar os princípios da turbina a gás. Por volta de 1500, Leonardo da Vinci esboçou uma máquina rotativa movida a gases quentes conduzidos por uma chaminé onde foi montado um ventilador. Essas máquinas foram projetadas somente por observação e sem nenhuma fundamentação teórica de mecânica dos fluidos, já que essa ciência não havia sido desenvolvida até o século XIX. Por volta de 1750, Leonhard e Albert Euler analisaram a turbina a vapor de Heron e realizaram vários experimentos básicos que resultaram em 1754 na “Lei de Newton das Turbomáquinas”, também conhecida como simplesmente “Equação de Euler”. Na primeira parte do século XX, engenheiros como Stodola começaram a fazer uso sistemático das leis fundamentais da dinâmica de fluidos desenvolvidas por Bernoulli e Euler (KRAIN, 2005).

No fim do século XIX, uma vasta gama de aplicações industriais para compressores centrífugos se desenvolveu quando a indústria necessitou de grandes volumes de ar pressurizado. Por exemplo, nas minas para ventilação e no transporte de grãos, malte e fardos de algodão através de esteiras pneumáticas. Naquela época também havia a necessidade de sistemas de sucção e secagem, por exemplo, no transporte de poeira e queima de óleo. Mais tarde, compressores centrífugos foram utilizados para uma variedade de aplicações técnicas: na metalurgia, indústrias químicas, petroquímicas e refinarias, produção e transporte de gás

natural através de dutos, e para a refrigeração de veículos blindados. Eles foram construídos para vazões de 400 a 40000 m<sup>3</sup>/h (KRAIN, 2005).

Os primeiros experimentos com turbinas a gás envolvendo compressores centrífugos apareceram no período de 1900 a 1910. Dentre os vários projetos de pesquisa daquela década que acabaram sendo abandonados após curtos períodos de operação, a máquina de Aegidius Elling – que já em 1884 registrou sua primeira patente industrial de uma turbina a gás – foi a mais bem sucedida e produzia energia positiva já em 1903. Além da grande capacidade inventiva de Aegidius, que desenvolveu difusores com palhetas-guia de geometria variável, algo já bastante avançado, e turbinas do tipo radial (centrípetas), ele possuía uma engenharia visionária para a época, tendo escrito em 1933: “Quando em 1882, eu comecei os trabalhos com turbinas a gás, era a aeronáutica que eu tinha em mente; e eu firmemente acredito que a aeronáutica ainda está esperando pela turbina a gás” (KRAIN, 2005).

Como se sabe atualmente, o ímpeto mais forte para o desenvolvimento tecnológico do compressor centrífugo surgiu de fato com a introdução da propulsão aeronáutica. O inglês Frank Whittle e o alemão Hans Joachim Pabst von Ohain desenvolveram quase que simultânea e independentemente um do outro os primeiros motores a jato na aviação no período de 1928 a 1941. Ambos os pioneiros utilizaram o mesmo princípio na compressão do ar: compressão centrífuga. Depois do primeiro vôo, Whittle dedicou grande parte dos seus esforços no aprimoramento do compressor centrífugo, enquanto von Ohain o substituiu pelo compressor axial que, devido a sua área frontal reduzida e maior vazão, tornou-se o componente essencial das grandes aeronaves. Mesmo assim, o compressor centrífugo ainda possui muitas aplicações no campo da aviação, principalmente em pequenos motores e mais significativamente em helicópteros e APU's para todos os tipos de aeronaves (KRAIN, 2005).

Durante as últimas cinco décadas as taxas de compressão por estágio do compressor centrífugo foram ainda mais ampliadas, o que tornou taxas de compressão da ordem de 8:1 de uso prático. Entretanto, compressores com altas taxas de compressão ( $r_p > 5:1$ ) ainda são raros devido às baixas eficiências e às faixas de operação limitadas. Muitos esforços têm sido conduzidos para superar esses problemas, pois existem grandes demandas para a construção de tais compressores com altas eficiências. Para permitir o avanço dessa tecnologia foram desenvolvidos métodos sofisticados de medição e técnicas de cálculo capazes de fornecer melhores *insights* sobre a estrutura complexa do fluxo interno dessas máquinas. O uso

combinado dessas ferramentas no campo da aviação também estimulou o desenvolvimento do compressor centrífugo no campo estacionário das turbomáquinas (KRAIN, 2005).

## 2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS TURBOMÁQUINAS

As turbomáquinas, também conhecidas como máquinas de fluxo, são basicamente máquinas rotativas que permitem a transferência de energia entre fluido e rotor. Existem em uma infinidade de tipos construtivos destinadas às mais diversas aplicações industriais. A Figura 2.1 dá uma visão geral da classificação e dos tipos de turbomáquinas mais comuns. Tradicionalmente, entretanto, as turbomáquinas são mais especificamente referenciadas como aquelas que operam com gases ou misturas gasosas como fluido de trabalho, ou melhor, baseadas em escoamentos compressíveis. A ASME utiliza a mesma denominação para abranger primordialmente as turbinas a gás e os compressores axiais e centrífugos em seu periódico especializado: *Journal of Turbomachinery*, e a NASA utiliza o mesmo escopo para definir o seu ramo de pesquisa em turbomáquinas no *NASA Glenn Research Center*. A mesma restrição será adotada neste texto e, portanto, fará referência apenas às turbinas a gás e aos compressores centrífugos e axiais.

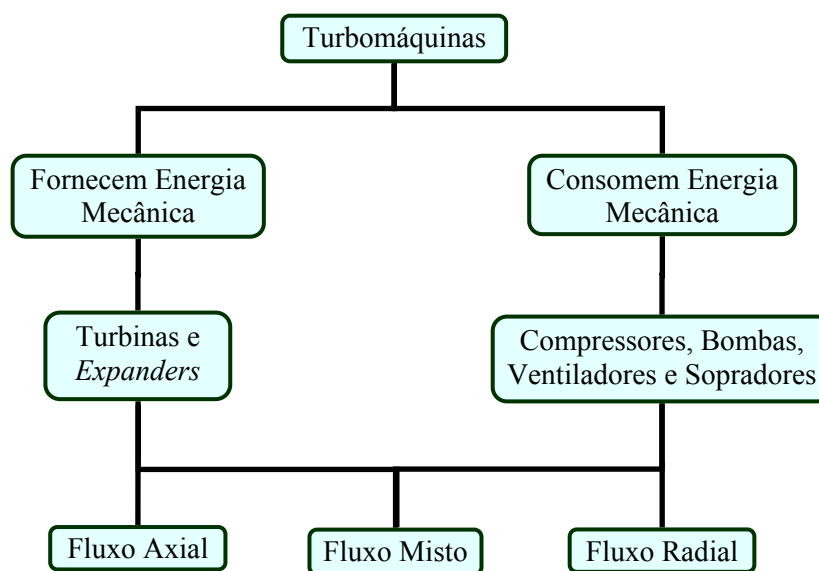


Figura 2.1 - Diagrama de classificação das turbomáquinas.  
Fonte: adaptado de JULIANI, [2003].

As máquinas de fluxo do tipo dinâmico (em oposição às volumétricas) são aquelas em que o intercâmbio de energia entre o fluido e o eixo rotor ocorre por transferência de

quantidade de movimento e essa energia é transformada (do tipo cinético para o de pressão e vice-versa) por meio da mudança das seções de escoamento do fluido (Figura 2.2). Já as volumétricas ou de deslocamento positivo caracterizam-se pela alteração do estado de energia interna do fluido ocorrendo em volumes discretos a cada ciclo de operação (JULIANI, [2003]).

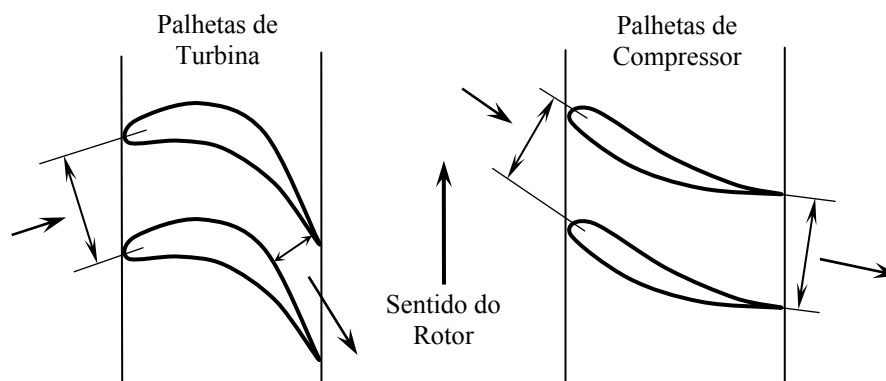


Figura 2.2 - Comparação dos perfis típicos das palhetas de turbinas e compressores axiais.  
Fonte: adaptado de KIAMEH, 2003.

### 2.2.1 Turbinas

As turbinas são definidas como máquinas que retiram energia do fluido nela introduzido pela mudança de seu estado termodinâmico e da quantidade de movimento, e a fornecem ao meio externo na forma de energia mecânica. De forma geral podem ser classificadas em três grandes famílias: hidráulicas, a vapor e a gás. As turbinas a gás são equipamentos que foram inicialmente desenvolvidos para aplicação aeronáutica, com bom rendimento termodinâmico, alta confiabilidade e fácil manutenção. Por esse motivo as turbinas a gás foram adaptadas (turbinas aeroderivadas) para a geração de energia mecânica com as mais diversas finalidades (IENO, 1993).

As turbinas a gás diferem das turbinas a vapor tradicionais pelo fato de utilizarem os gases provenientes da câmara de combustão, conforme o esquema da Figura 2.3. São máquinas térmicas, onde a energia química de combustão é transformada em trabalho mecânico útil por meio do eixo da turbina. Quanto ao seu ciclo termodinâmico, podem ser de ciclo aberto ou de ciclo fechado. O rendimento térmico de um ciclo da turbina a gás (24% a 42%) pode ser elevado pela introdução de um regenerador (VELÁZQUEZ, 2000).

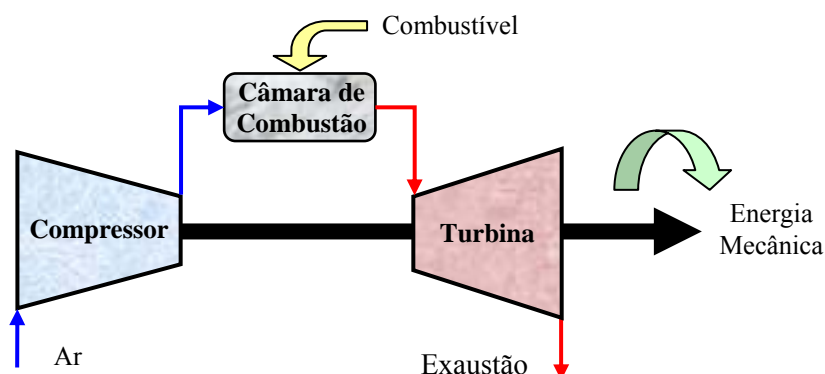


Figura 2.3 - Esquema funcional básico de uma turbina a gás.

Fonte: adaptado de VELÁZQUEZ, 2000.

A turbina a gás, de ciclo aberto, foi idealizada por George Brayton em 1870. O compressor tem a função de comprimir o ar comburente para a câmara de combustão, onde, misturado com o combustível, tem-se uma combustão contínua. Os produtos da combustão, à alta temperatura, realizam o trabalho mecânico no eixo da turbina, pela expansão na mesma. Em geral, a turbina e o compressor estão montados num eixo comum de tal forma, que o trabalho necessário para a compressão do ar é obtido a partir do trabalho de expansão dos gases na turbina. Para fornecer a energia mecânica, em aplicações estacionárias, a turbina a gás é reprojeta para redução da velocidade de saída dos gases (VELÁZQUEZ, 2000).

As turbinas a gás podem operar em ciclos simples, ou em conjunto com turbinas a vapor, por exemplo, formando os chamados ciclos combinados, permitindo um aumento considerável no rendimento do processo e uma maior geração de energia. O rápido avanço da tecnologia das turbinas a gás nos anos 90 levou a eficiência térmica dos ciclos combinados a quase 60% com o uso do gás natural como combustível. Esse tipo de planta com alto rendimento juntamente com baixas emissões de poluentes, capital e custos de operação competitivos tornou a turbina a gás de ciclo combinado (CCGT) a força motriz mais popular na geração de energia elétrica (ZWEBEK; PILIDIS, 2004). Nesse processo (Figura 2.4), os gases de exaustão da turbina a gás, com temperatura ainda elevada, podem ser aproveitados para produzir vapor d'água superaquecido de alta pressão, numa caldeira de recuperação de calor (HRSG), expandindo-se numa turbina a vapor, sendo os gases descarregados para a atmosfera (IENO, 1993).

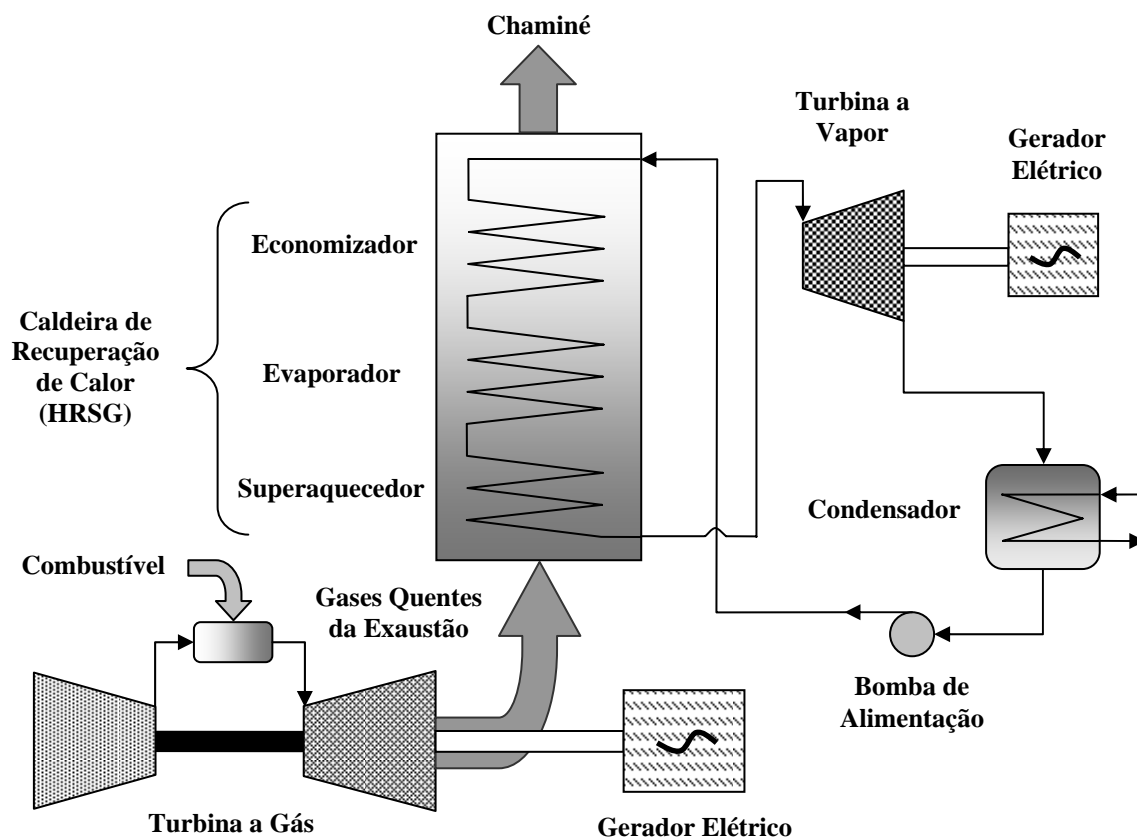
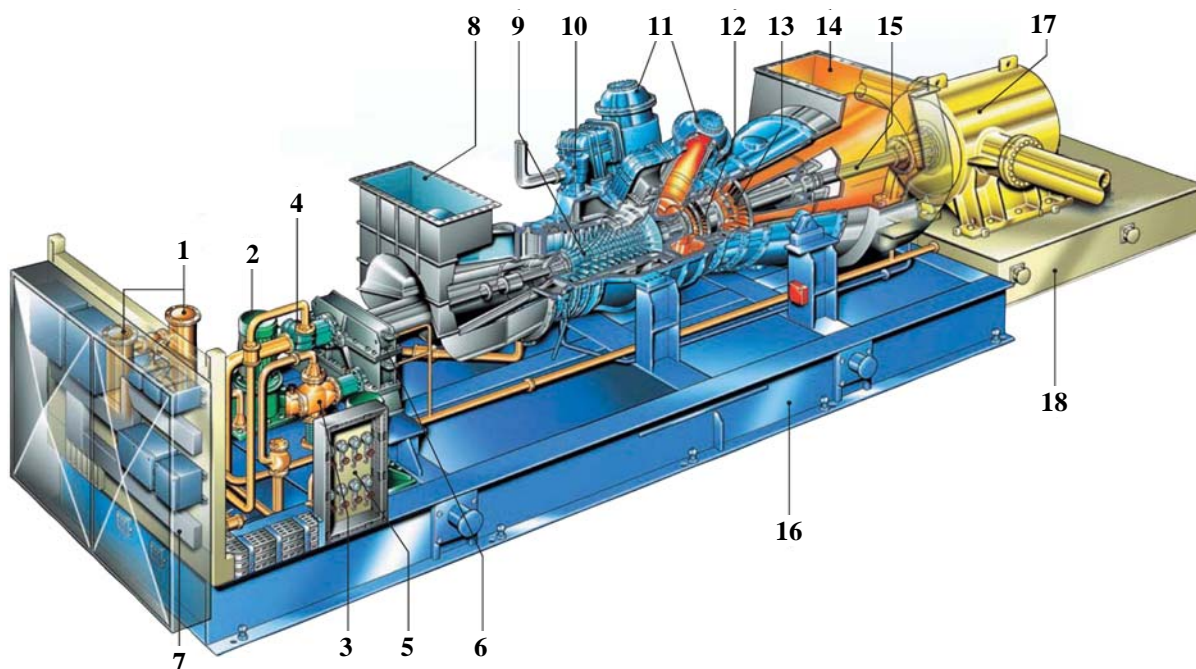


Figura 2.4 - Diagrama esquemático de uma planta de geração de energia elétrica baseada numa turbina a gás de ciclo combinado (CCGT). Fonte: ZWEBEK; PILIDIS, 2004.

A Figura 2.5 ilustra os principais itens que compõe uma turbina a gás. Ar em condição ambiente ou aquecido em um regenerador entra no compressor (8, 9), onde a temperatura e pressão do mesmo são elevadas. O ar pressurizado e aquecido, comburente, entra na câmara de combustão (11), onde é adicionado o combustível. Depois da combustão, são produzidos gases quentes, pressurizados (12), que acionam a turbina de potência (13). Ao final do ciclo (14), os gases produzidos, são rejeitados ou regenerados. Parte da potência produzida pela turbina é utilizada no acionamento do compressor axial da turbina (9), o restante é utilizado para produção de força motriz para movimentar o compressor centrífugo de gás (17). Para aumentar a geração de potência devem ser otimizadas as variáveis fundamentais de projeto: razão ou taxa de compressão no compressor, relação ar/combustível e temperatura de entrada dos gases quentes na turbina de potência (MAN, 2007).



- |  |   |                            |
|--|---|----------------------------|
| 1) Filtro do Óleo Lubrificante;          | 7) Painel de Controle;                    | 13) Turbina de Potência;   |
| 2) Bomba Auxiliar do Óleo Lubrificante;  | 8) Entrada de Ar;                         | 14) Exaustão;              |
| 3) Bomba Principal do Óleo Lubrificante; | 9) Compressor Axial Auxiliar;             | 15) Acoplamento;           |
| 4) Sistema de Partida;                   | 10) Sistema de Alívio do Ar Pressurizado; | 16) Base da Turbina;       |
| 5) Painel de Instrumentos;               | 11) Câmaras de Combustão;                 | 17) Compressor Centrífugo; |
| 6) Sistema de Engrenagem Auxiliar;       | 12) Turbina de Alta Pressão;              | 18) Base do Compressor.    |

Figura 2.5 - Turbina a gás: partes principais.  
Fonte: adaptado de MAN, 2007.

### 2.2.2 Compressores

São equipamentos que transferem a energia recebida do meio externo (normalmente um motor ou turbina) ao fluido veiculado visando aumentar seu estado de energia interna. As máquinas de fluxo operadoras (aquelas que consomem energia do meio externo e a transferem para o escoamento) que desenvolvem pressões menores que 35 kPa ou que aumentam a densidade do gás em menos de 7%, da sucção à descarga, são denominadas ventiladores (*fans*), exaustores (*exausters*) ou sopradores (*blowers*) (GRESH, 2001).

Num equipamento do tipo volumétrico ou de deslocamento positivo, o processo de compressão do gás dá-se num espaço confinado, cujo volume é reduzido por ação mecânica por meio do movimento de um êmbolo (máquinas alternativas) ou de engrenagens, palhetas, lóbulos, etc., a cada ciclo. Os compressores alternativos diferenciam-se dos compressores dinâmicos (centrífugos e axiais) por serem capazes de atingir altas taxas de compressão em

contraposição a uma vazão mais limitada e a um fluxo pulsante. Embora os compressores alternativos (*reciprocating*) exijam maior espaço para a sua instalação, eles apresentam algumas vantagens em relação aos compressores dinâmicos (JULIANI, [2003]):

- a) Menores custos de aquisição e manutenção (em relação à mão-de-obra especializada e logística);
- b) Maior simplicidade operacional;
- c) Maior flexibilidade em termos de capacidade e razão de compressão;
- d) Menor sensibilidade a variações nas condições do gás veiculado.

Máquinas do tipo alternativo são utilizadas há séculos, enquanto que as centrífugas têm menos de 80 anos de emprego. Inicialmente, os compressores do tipo centrífugo foram largamente utilizados na indústria siderúrgica (anos 30) comprimindo ar para os alto-fornos ou na coqueria e daí passaram a ter múltiplos usos. Sua aplicação original foi estendida para todos os outros gases, incluindo-se o vapor d'água (permitindo o reaproveitamento de energia que, de outra forma, seria perdida), indo desde o fornecimento de ar comprimido para instrumentação ou serviço até a compressão de gases de refrigeração (plantas criogênicas). Dentre os usuários desse tipo de equipamento, menciona-se (JULIANI, [2003]):

- a) Plantas de separação de gases do ar;
- b) Indústrias químicas e petroquímicas;
- c) Indústrias automotivas;
- d) Plantas de papel e celulose;
- e) Indústrias siderúrgicas;
- f) Exploração e refino de petróleo e gás;
- g) Mineração e metalurgia.

Os compressores centrífugos são tão usados hoje quanto os alternativos, sendo o número de máquinas instaladas, atualmente, dos dois tipos, praticamente igual. O acionamento desse tipo de equipamento pode ser feito por meio de turbina a vapor ou a gás, *expanders* ou motores elétricos. Os compressores centrífugos diferenciam-se dos axiais não só pelo sentido predominante do fluxo do gás (que nos primeiros é eminentemente radial), mas também pela vazão e pressão de gás que se alcança nestes tipos de máquinas. Nos compressores centrífugos podem ser atingidas altas taxas de compressão em relação às alcançadas pelos axiais; em compensação, nestes últimos as vazões veiculadas são bem maiores que as dos centrífugos além de serem mais compactos e mais leves para uma mesma



capacidade volumétrica (daí sua aplicação principal como compressores do ar comburente em motores aeronáuticos) (JULIANI, [2003]).

Devido ao grande universo de formas e princípios construtivos dos compressores e à especificidade da aplicação do sistema aqui proposto, será dada ênfase aos compressores dinâmicos, especialmente aos do tipo centrífugo. Esses podem ser projetados com um até dez estágios em série (Figura 2.7), o que permite a amplificação da taxa de compressão ou razão de pressão total. Tradicionalmente, os compressores centrífugos foram construídos com um estágio apenas, com um impelidor e uma voluta difusora (câmara de descarga) (Figura 2.6).

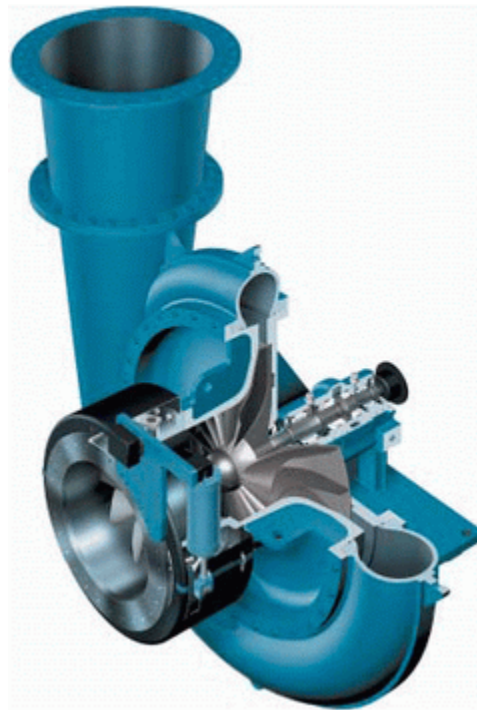


Figura 2.6 - Compressor centrífugo com um estágio simples.  
Fonte: GE, 2007.

O processo de compressão de um fluido num equipamento do tipo dinâmico ocorre da seguinte forma: o impelidor do compressor transfere a energia mecânica que recebe do acionador através de seu eixo para o gás por transferência de quantidade de movimento e de força centrífuga, acelerando as partículas do gás que, assim, tem a sua velocidade aumentada. Na saída do impelidor, o gás tem, portanto, apenas sua energia cinética (de velocidade) aumentada e não de pressão. Os difusores que existem em cada estágio, após cada impelidor, convertem a energia cinética do gás em energia de pressão através do direcionamento e frenagem deste, fazendo essa transformação de acordo com o princípio da Conservação de Energia. Caso o aumento de pressão ocorrido seja suficiente para vencer a pressão reinante à

saída do difusor em qualquer estágio, a operação do compressor é normal, ou seja, o fluxo de gás continua em seu sentido “correto” até a descarga final para a tubulação de processo (JULIANI, [2003]).

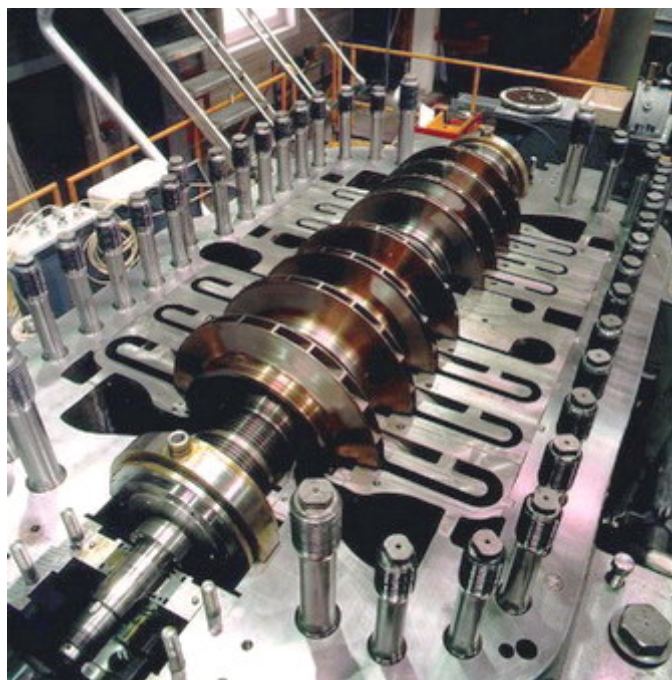


Figura 2.7 - Foto de um compressor centrífugo multiestágio aberto do tipo “back-to-back dividido horizontalmente”. Fonte: CONCEPTS ETI, 2007.

Em relação à eficiência, os compressores de deslocamento positivo são geralmente melhores para pequenas capacidades. Em maiores capacidades, os vazamentos em válvulas e selos, o atrito mecânico dos componentes e o efeito pulsante no fluxo aumentam rapidamente limitando a eficiência desse tipo de compressor. Já em compressores centrífugos, ocorre o efeito oposto: em pequenas capacidades, a superfície de selagem é grande em relação ao elemento de compressão, o impelidor. À medida que o tamanho do impelidor aumenta, os vazamentos na selagem aumentam lentamente em relação à vazão volumétrica (JULIANI, [2003]).

A Figura 2.8 ilustra o caminho do fluxo interno de gás num compressor centrífugo de dois estágios – onde a entrada do fluido no impelidor se dá axialmente ao “olho” anular do impelidor e a saída, radialmente à periferia do impelidor – mostrando também a denominação dos componentes internos a ele.

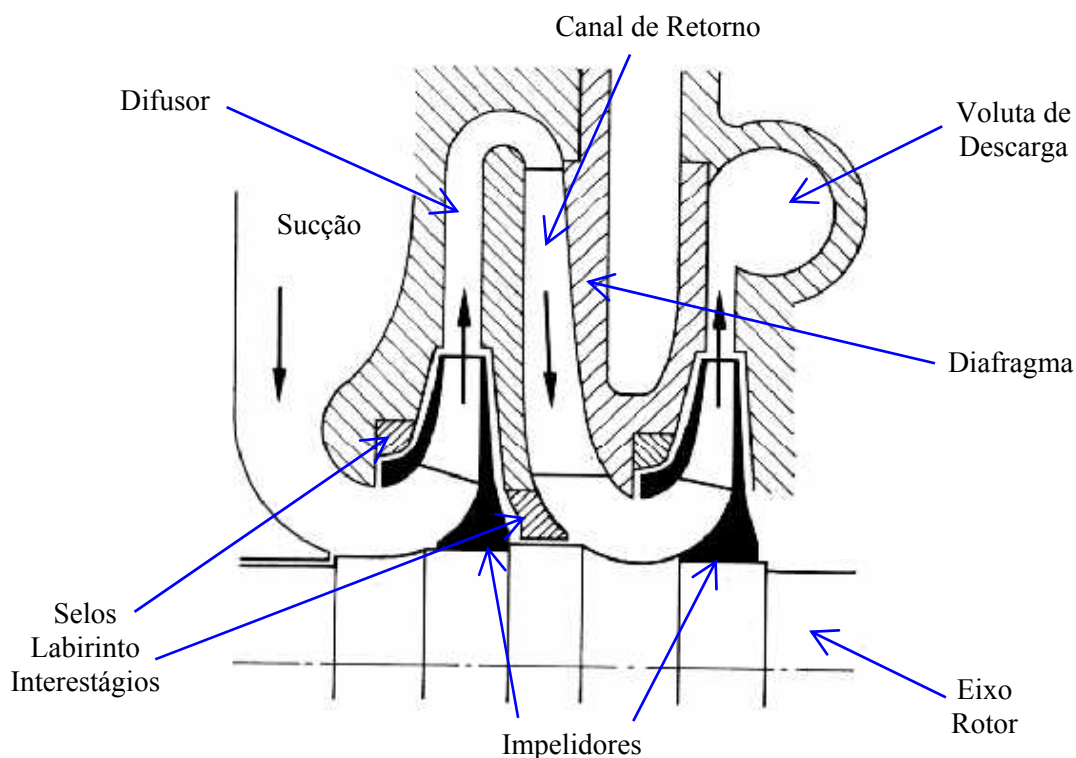


Figura 2.8 - Fluxo interno de gás em um compressor centrífugo de dois estágios em corte longitudinal. Fonte: JULIANI, [2003].

A redução de mecanismos obtida pela simplicidade construtiva e a melhoria contínua da aerodinâmica interna, pelo uso de técnicas de análise sofisticadas como a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) e a velocimetria por imagens de partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*), têm contribuído para o projeto de compressores centrífugos com eficiência termodinâmica maior que 85%. Além disso, os modernos sistemas de selagem de gás seco, os novos materiais empregados na fabricação dos selos labirintos e a evolução crescente das técnicas de análise rotodinâmica, impulsionando o desenvolvimento de mancais mais modernos e de uma instrumentação dedicada à detecção de vibrações, têm garantido uma evolução contínua dessas máquinas, expandindo o seu uso nas mais diferentes aplicações industriais.

Os compressores axiais (Figura 2.9) apresentam, ainda assim, a melhor eficiência dentre todos os tipos construtivos, pois ambas as perdas mecânicas e aerodinâmicas são baixas, resultando em eficiências próximas a 90% ou ainda maiores. Isto se deve às pequenas superfícies de selagem e de contato com o fluxo de gás. Entretanto, esse tipo de compressor possui um projeto complexo, um custo de aquisição maior e a sua confiabilidade é inferior aos demais devido, principalmente, à fragilidade das palhetas do rotor (GRESH, 2001).

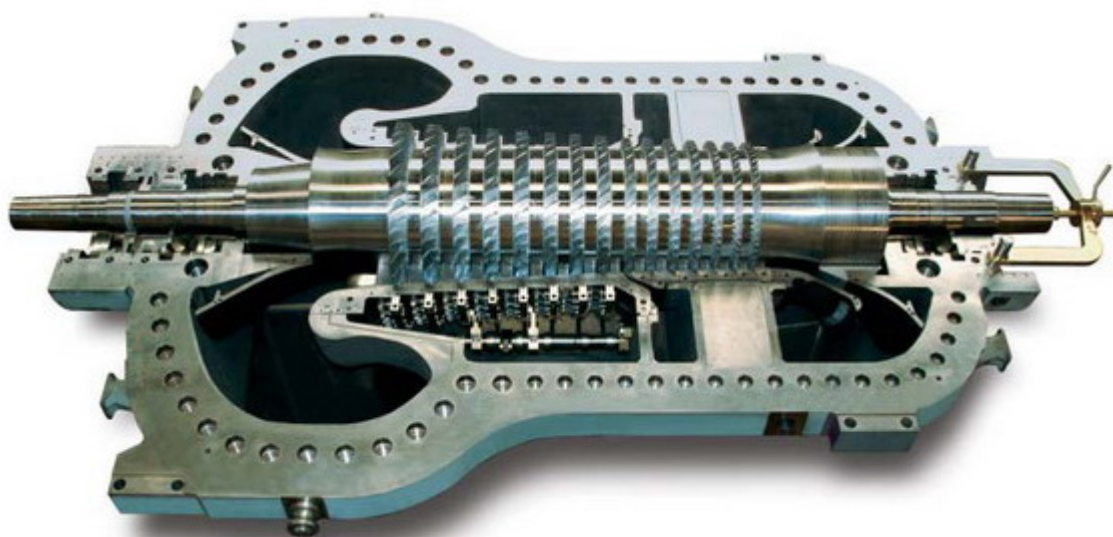


Figura 2.9 - Compressor axial aberto de quinze estágios.  
Fonte: GE, 2007.

#### 2.2.2.1 Componentes e Sistemas Auxiliares de Compressores Centrífugos

Os principais elementos aerodinâmicos de um compressor centrífugo (Figura 2.8) são: o bocal de entrada na sucção, as palhetas-guia da entrada (fixas ou móveis), os impelidores do eixo rotor, os diafragmas (no caso de mais de um estágio) com os difusores radiais e os canais de retorno (com ou sem palhetas-guia fixas), a voluta coletora e o bocal de descarga. Os impelidores, que podem ser fechados ou abertos (Figura 2.10), são montados sobre o eixo do rotor e isolados entre si por meio de selos labirinto interestágio (Figura 2.11), que são buchas com lâminas circunferenciais que apresentam folga mínima em relação ao eixo, formando câmaras de expansão do gás que minimizam sua fuga, fixados normalmente aos diafragmas no caso da configuração multiestágios.

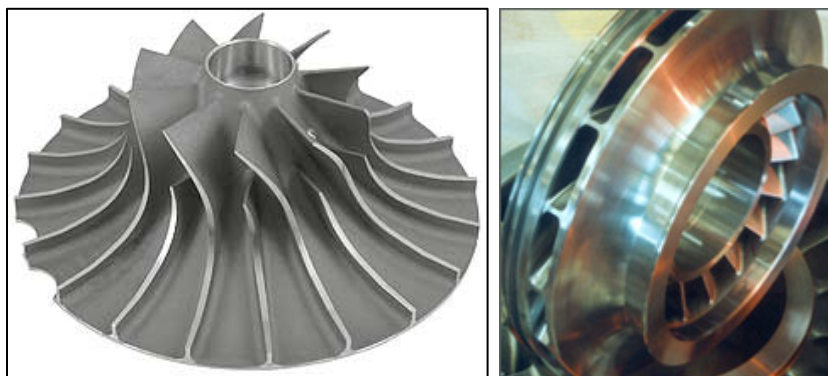


Figura 2.10 - Fotos de impelidores dos tipos aberto e fechado.  
Fonte: GE, 2007.

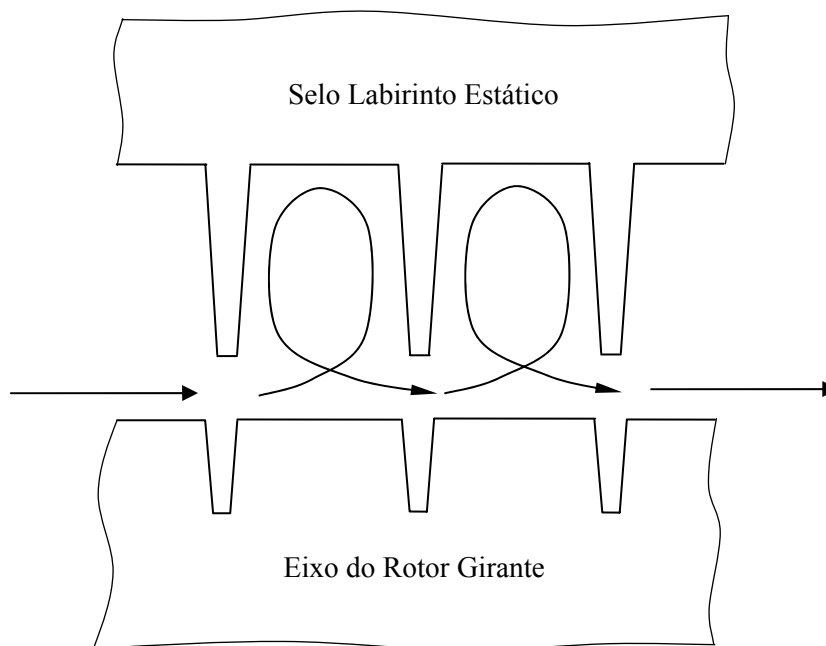


Figura 2.11 - Detalhe ampliado do princípio de contenção de vazamentos dos selos tipo labirinto. Fonte: adaptado de GRESH, 2001.

A selagem externa (*shaft end*) pode ser também por meio de “labirintos”, selos mecânicos com anéis de carvão flutuantes ou ainda os selos de gás seco (*dry gas seals*) que dispensam o uso de óleo de selagem utilizando gás de barragem. Os danos que podem ocorrer dependem do tipo da selagem (labirintos ou selo mecânico), sendo os originados por contato mecânico devido a vibrações anormais do eixo, em qualquer caso, os mais comuns (JULIANI, [2003]). Existem ainda os selos centrais do pistão ou tambor de balanceamento que possui uma câmara que conecta a descarga à sucção como forma de compensar o aumento de pressão e, conseqüentemente, o empuxo axial gerado. Esse elemento permite a seleção de mancais axiais menores, o que resulta em menores perdas de potência no eixo.

Além dos componentes aerodinâmicos, a carcaça do compressor encapsula o eixo rotor apoiado axialmente pelos mancais de escora (*thrust bearings*), cuja função é suportar as cargas ou empuxos axiais, devidos à diferença de pressão entre a sucção a descarga, assim como, devido às forças no sentido do eixo provenientes do acionador, e apoiado verticalmente por mancais radiais (*journal bearings*) que normalmente são dos tipos multilobulares ou de sapatas oscilantes para eixos que operam a maiores rotações, e cilíndricos para rotações menores. Os mancais de escora podem ter sapatas fixas ou oscilantes. A Figura 2.12 ilustra os dois tipos principais de mancais para compressores centrífugos, especialmente para o caso de altas rotações do eixo.

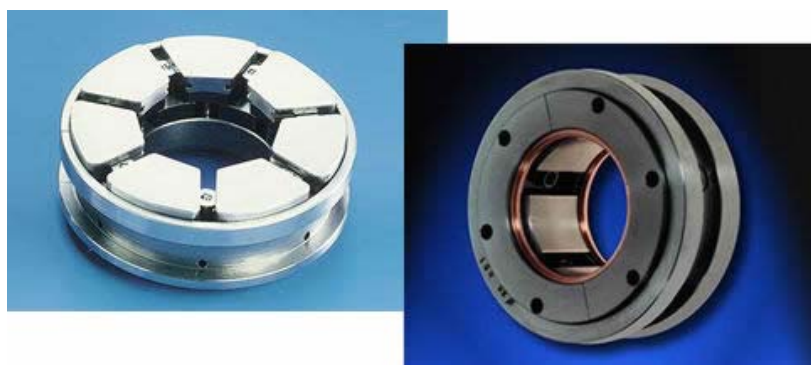


Figura 2.12 - Mancais axial (esquerda) e radial (direita) com sapatas oscilantes para aplicação em compressores dinâmicos. Fonte: SARTORIUS, 2007.

Pelas leis da termodinâmica, sabe-se que qualquer processo de compressão resultará num aumento da temperatura do gás ou mistura gasosa. Nos casos de compressores que operam com altas taxas de compressão, esse fator torna-se crítico, podendo comprometer fisicamente a máquina. Nesses casos, procura-se fazer o resfriamento do gás entre os estágios, podendo esse ser realizado interna ou externamente ao compressor. No resfriamento interno, os diafragmas que separam dois estágios sucessivos são providos de camisas d'água. O resfriamento externo é feito em trocadores de calor especiais (*intercoolers*) montados na mesma base, ou construídos na carcaça do compressor (Figura 2.13) ou ainda, em unidades separadas. O objetivo do resfriamento é reduzir a potência e baixar a temperatura de descarga. Em comparação com compressores não resfriados, o resfriamento resulta em uma redução do tamanho ou rotação dos impelidores, ou ainda, num menor número de estágios (FALCO, [200?]).



Figura 2.13 - Compressor equipado com resfriadores externos (*intercoolers*).  
Fonte: MAN, 2007.

Os principais sistemas auxiliares dos compressores são: o sistema de lubrificação dos mancais e o sistema de selagem, sendo esse um item opcional no caso de baixas pressões e fluidos de trabalho baratos, não tóxicos e não inflamáveis (como o ar, por exemplo). Esses sistemas podem ser combinados no caso de sistemas de selagem com injeção de óleo, diminuindo sensivelmente os custos desses sistemas. No entanto, a contaminação do óleo lubrificante pelo gás de trabalho pode comprometer a segurança operacional da máquina. Uma alternativa mais moderna para o sistema de selagem é a que utiliza gás de selagem, conhecida como selos de gás seco (*dry gas seals*). O uso desses selos requer um sistema de suprimento de gás de selagem específico que pode utilizar um sistema de controle baseado em pressão diferencial ou vazão. Ambos controlam o fluxo de gás de selagem na câmara de barragem do gás de processo. Segundo Stahley (2003), mais de 80% dos compressores manufaturados atualmente são equipados com esse tipo de sistema de selagem (Figura 2.14), substituindo o sistema de selagem a filme de óleo tradicional.



Figura 2.14 - Cartucho de selagem a gás seco para compressores dinâmicos.  
Fonte: CRANE, 2007.

A instrumentação e os dispositivos de proteção dos compressores também fazem parte da infra-estrutura necessária para a sua operação. Eles representam em geral uma grande parcela do custo inicial do compressor, e sua manutenção requer pessoal especializado devendo ser feita regularmente para evitar o mascaramento das leituras (FALCO, [200?]). Dentre os principais instrumentos necessários ao controle do processo de compressão (v. seção A.3) pode-se citar: medidor de vazão, medidores de temperatura e pressão, na sucção e na descarga, medidor de velocidade de rotação do compressor além dos instrumentos do acionador e dos equipamentos auxiliares. Os dispositivos de proteção mais comumente empregados são os alarmes e os desarmes (*trips*) de emergência que monitoram temperaturas

do gás e dos mancais, níveis dos reservatórios de óleo e condensados, perda de carga nos filtros, vibração nos mancais e deslocamento axial do rotor.

### 2.2.2.2 Perfil Operacional de Compressores Centrífugos

A melhor maneira de analisar a operação de qualquer bomba ou compressor consiste em comparar, por meio de um gráfico do *head* versus vazão volumétrica, as curvas características da máquina e do sistema em que ela irá atuar. O *head* é a grandeza que representa o trabalho cedido a cada unidade de massa do fluido no processo de compressão (equivalente à altura total de elevação para bombas). As curvas de *head* e eficiência versus vazão volumétrica à rotação constante representam uma característica do compressor e são determinadas, principalmente, pelo projeto do impelidor e do difusor. Essas curvas, estabelecidas em teste para uma rotação, podem ser calculadas para qualquer rotação pelas leis de semelhança, fazendo-se correções em função dos efeitos aerodinâmicos que podem ser traduzidos pelos números de Mach e de Reynolds (FALCO, [200?]).

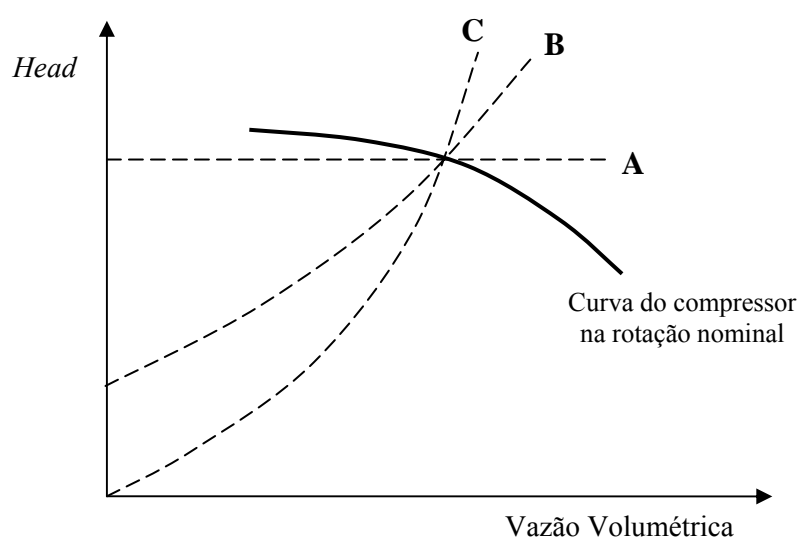


Figura 2.15 - Curvas características dos tipos de sistemas de compressão.  
Fonte: adaptado de FALCO, [200?].

Já a curva característica do sistema de compressão representa o *head* necessário para que o fluido possa escoar e vencer a resistência (contrapressão e atrito interno com a tubulação) do sistema, em função da vazão em volume de fluido (Figura 2.15). Essa curva pode ser do tipo A, no caso em que a tubulação do sistema é muito pequena, sem restrições, e todo o *head* cedido ao fluido deve ser utilizado para um diferencial de pressão. Por outro lado, em outros sistemas, todo o *head* pode ser utilizado para compensar as perdas por atrito



provenientes do escoamento do fluido em tubulações longas, com nenhuma diferença de pressão entre os reservatórios de sucção e descarga. Nesse caso, a curva característica do sistema na Figura 2.15 é a curva C, uma parábola passando pela origem. O transporte de fluido a longas distâncias, através de gasodutos, é um exemplo desse tipo de sistema. Se apenas parte do *head* desenvolvido pelo compressor é utilizado para compensar perdas por atrito, sendo a outra parte necessária para vencer um diferencial de pressão, o sistema apresenta uma curva característica do tipo B (caso mais comum) (FALCO, [200?]).

Todos os compressores chamados “dinâmicos” (tipo centrífugo ou axial) são susceptíveis a um fenômeno de instabilidade operacional conhecido como *surge* (em inglês) ou *pompage* (em francês). Tal fenômeno é bastante prejudicial e necessita ser evitado a qualquer custo uma vez que, quando um compressor “entra em *surge*”, as pressões e vazões do gás pulsam erraticamente, as temperaturas de sucção e descarga elevam-se consideravelmente, o rotor entra em vibração anormal e a intensidade de ruído pode atingir níveis assustadores. Com o aumento da vibração podem ocorrer danos por contato entre partes fixas e móveis sendo afetados, geralmente, os labirintos e até mesmo os mancais radiais e de escora (axial). A explicação de como o mesmo ocorre não é muito simples. Ele está ligado ao modo como opera o compressor tipo dinâmico (JULIANI, [2003]).

O fenômeno do *surge* acontece exatamente quando a pressão que o gás adquire na saída do difusor não é suficiente para vencer aquela existente no meio seguinte (pressão de descarga do estágio). Aí há, então, a frenagem da corrente de gás mesmo com o rotor do compressor girando. Instantaneamente ocorrem problemas de turbilhonamento do gás dentro dos estágios e inicia-se o seu refluxo para a sucção. Nesse ponto, entretanto, a pressão na descarga do difusor começa a se reduzir uma vez que ela era mantida com o fluxo constante do gás da sucção para a descarga. Quando essa pressão cai, o conjunto impelidor-difusor, imediatamente, fica em condições de fazer o gás vencer a nova pressão do meio, restabelecendo o fluxo em direção à descarga. Em consequência, a pressão no meio começa a se elevar outra vez até a mesma condição inicial, repetindo-se o processo.

O intervalo de tempo entre cada ciclo varia, em geral, de caso para caso, não passando, porém, de frações de segundo, fazendo com que o compressor oscile e trepide com violência, gerando ondas sonoras características. O problema só pode ser resolvido reduzindo-se a pressão na descarga ou alterando-se sua rotação para uma nova condição de equilíbrio. A partir da compreensão de como e por que o *surge* ocorre, fica fácil entender a importância de

se saber em que condições ele acontece para um determinado compressor. Conhecendo-se sua “linha” podemos determinar a curva de proteção ao *surge* (aquela que regula a abertura das válvulas de alívio atmosférico (*blow-off*) ou de reciclo) e a faixa operacional do compressor (JULIANI, [2003]).

Da maneira como foi descrito, percebe-se que o *surge* pode ocorrer em qualquer dos estágios do compressor, pois cada estágio “preocupa-se” apenas com as suas condições de sucção e descarga. Em geral, quando o *surge* ocorre, não se pode afirmar *a priori* em qual dos estágios. Entretanto, a redução da pressão de descarga do compressor, como um todo, reflete-se em todos os estágios, sendo essa a forma mais comum para o controle do fenômeno. As pressões de sucção e descarga e a vazão do compressor dependem do sistema ao qual o mesmo está ligado, portanto a condição em que o *surge* ocorre depende da instalação e varia de um compressor para outro e do gás que está sendo comprimido.

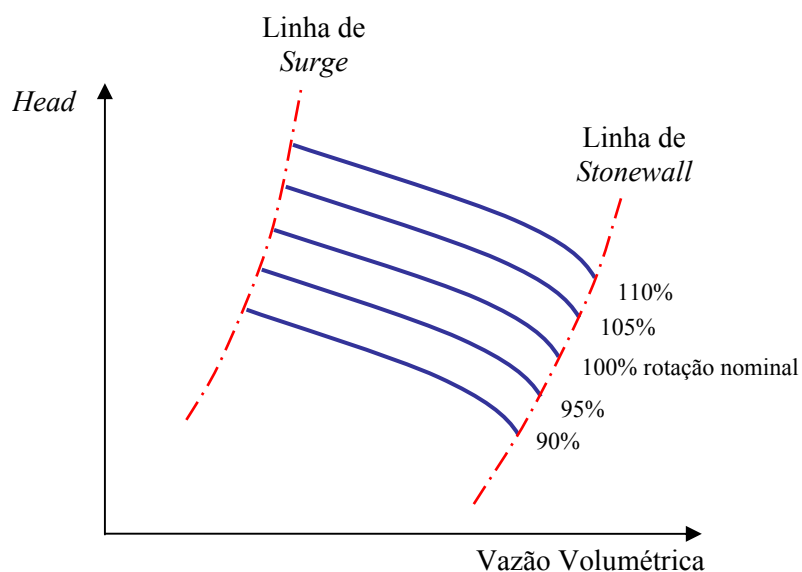


Figura 2.16 - Curvas características do compressor e suas linhas de *surge* e *stonewall*.

Fonte: adaptado de GRESH, 2001.

Nas curvas características do compressor são assinalados os pontos de ocorrência do *surge* e a linha que une esses pontos é chamada de “linha de *surge*” (Figura 2.16). Com o conhecimento dessa linha são desenvolvidos sistemas automatizados de proteção contra a ocorrência desse fenômeno. Tais sistemas são conhecidos como “sistemas de controle *anti-surge*” e possuem, basicamente, um sensor de vazão do gás, outro de pressão de descarga e um dispositivo lógico que compara essas informações com a posição da linha de segurança contra o *surge*. Quando o compressor estiver operando numa condição sobre ou à esquerda

dessa linha de proteção, o dispositivo lógico comanda a abertura da válvula *anti-surge* que aumenta a vazão e/ou reduz a pressão de descarga. Essa válvula é conhecida como válvula de reciclo para sistemas fechados ou *blow-off* para sistemas abertos (ar). Normalmente, essa linha de segurança situa-se 10% em vazão a mais do que a linha de *surge* para se evitar qualquer risco. Salienta-se que a válvula de controle *anti-surge* deve permanecer fechada quando a máquina estiver em operação normal para a economia de energia (JULIANI, [2003]).

Além do limite mínimo de vazão determinado pelo fenômeno do *surge*, existe também um limite máximo para a vazão denominado limite de *stonewall* ou *choke*. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento excessivo da velocidade de escoamento do fluido no interior do compressor quando essa se aproxima à velocidade do som ( $Mach = 1$ ), geralmente iniciado no primeiro impelidor. A onda de choque gerada no interior do compressor causa uma queda abrupta do *head* (ou da pressão de descarga), degradando sensivelmente a performance do compressor e podendo gerar danos físicos aos seus componentes, sendo, portanto, um modo de operação estritamente indesejável (GRESH, 2001).

Para os regimes de operação normal dos compressores centrífugos (e axiais), que visam atender às necessidades do processo, e desconsiderando-se a faixa de operação atuada pelo sistema *anti-surge*, existe o chamado controle de capacidade, que pode ser realizado por diferentes métodos citados aqui resumidamente (FALCO, [200?]):

- a) **Variação de rotação.** Com rotação variável o compressor pode facilmente atender a demandas do tipo vazão constante, pressão constante ou uma combinação vazão e pressão variáveis. Esse método de controle é o mais eficiente, pois não introduz perdas de energia do fluido adicionais, sendo bastante interessante para compressores acionados por turbina, embora possa reduzir a eficiência em alguns acionadores;
- b) **Estrangulamento da sucção.** Realizado por meio de uma válvula borboleta instalada na tubulação de sucção. Esse método consiste, basicamente, em aumentar a resistência do sistema para diminuir a vazão, podendo ser feito de modo análogo a partir da tubulação de descarga. O controle por esse método não é tão eficiente quanto a variação de rotação, pois existem perdas de energia disponível do fluido devido à expansão irreversível na válvula. Além disso, fazendo-se uso do

estrangulamento da sucção ou da descarga, a temperatura de descarga do fluido aumenta ainda mais;

- c) **Palhetas-guia ajustáveis na entrada.** Elas reduzem a pressão na entrada do compressor (como no estrangulamento da sucção), aumentando a vazão em volume na entrada para uma certa vazão em massa do fluido, e impondo uma pré-rotação no fluxo que pode tanto diminuir como aumentar o *head* fornecido por estágio dependendo do sentido concordante ou discordante com a rotação do impelidor. Por meio de um controle mais fino do estrangulamento, este sistema é mais eficiente que aquele realizado por válvulas borboleta. Palhetas-guia ajustáveis podem ser colocadas na entrada de todos os estágios do compressor, mas é muito mais comum tê-las apenas no primeiro estágio.

Além desses métodos, existem outros, embora menos comuns, como: recirculação e descarga para a atmosfera – que é um método bastante antieconômico –, palhetas ajustáveis nos difusores e palhetas ajustáveis nos impelidores. A complexidade e o alto custo dessas duas últimas construções tornam o seu uso bastante raro. Na Europa, o alto custo da energia e do combustível em relação à matéria-prima e à mão-de-obra já justifica tipos de controle mais elaborados para a economia de potência.

## 2.3 MANUTENÇÃO NO CICLO DE VIDA DAS TURBOMÁQUINAS

### 2.3.1 Definição e Modalidades de Manutenção

O termo manutenção teve origem no vocábulo militar cujo significado era manter nas unidades de combate, o efetivo e o material em um nível constante. Ao longo do tempo, essa atividade foi sendo mais estudada e desempenha hoje uma função estratégica na maioria das organizações industriais (MONCHY, 1989 *apud* ALVES, 2001). Atualmente, a norma brasileira NBR-5462 (ABNT, 1994) define manutenção como sendo “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item<sup>2</sup> em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”. A manutenção é um elemento chave para a produtividade de um produto. Se a confiabilidade<sup>3</sup> e

<sup>2</sup> De acordo com a norma brasileira NBR-5462/1994, “item é qualquer parte, subsistema, sistema ou equipamento que possa ser considerado individualmente e ensaiado separadamente”.

<sup>3</sup> *Ibidem*, “confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições de uso especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

a manutenibilidade<sup>4</sup> são atributos do produto integrados ao projeto, a manutenção é, por assim dizer, uma inexorável consequência. Ou seja, mesmo para os produtos de alta confiabilidade a manutenção é imprescindível (DIAS, 2004). A confiabilidade tem sido um aspecto importante na avaliação de produtos ou equipamentos industriais. Um bom projeto do produto é certamente essencial em produtos com alta confiabilidade. Entretanto, por melhor que seja o projeto do produto, ele se deteriorará ao longo do tempo por estar operando sob certas condições de esforço ou carga no ambiente real, muitas vezes envolvendo aleatoriedades. A manutenção foi introduzida como uma forma eficiente de se assegurar um nível satisfatório de confiabilidade durante o período de vida útil de um sistema físico (JARDINE *et al.*, 2006).

Independentemente do sistema de gestão da manutenção adotado na organização, seja ela uma planta industrial ou fábrica de produtos manufaturados, existem certos tipos ou modalidades de manutenção empregadas que são amplamente conhecidas e essas serão apresentadas aqui sob duas definições: a da norma brasileira NBR-5462/1994 e a de Smith (1993), um dos maiores especialistas em MCC (v. Apêndice B). As definições dos tipos clássicos de manutenção são:

- a) **Manutenção preventiva** é aquela efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha<sup>5</sup> ou a degradação do funcionamento de um item (ABNT, 1994). Para Smith (1993), é a execução de tarefas de inspeção e serviços que foram pré-planejadas (ou seja, agendadas) para serem realizadas em intervalos específicos de tempo com o propósito de manter a capacidade funcional de sistemas e equipamentos operantes. A palavra pré-planejada é a mais importante nessa definição; ela é o elemento chave no desenvolvimento de uma cultura de manutenção proativa;
- b) **Manutenção corretiva** é aquela efetuada após a ocorrência de uma pane<sup>6</sup>, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida (ABNT, 1994). Já para Smith (1993), é a execução não planejada (ou seja, não

---

<sup>4</sup> De acordo com a norma brasileira NBR-5462/1994, “manutenibilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”.

<sup>5</sup> *Ibidem*, “falha é o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”.

<sup>6</sup> *Ibidem*, “pane é o estado de um item, caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos”. Nota: Uma pane é normalmente resultado de uma falha de um item, mas pode existir sem uma falha anterior.

esperada) de tarefas de manutenção para recuperar a capacidade funcional de sistemas e equipamentos em malfuncionamento ou em pane;

- c) **Manutenção preditiva ou controlada** é aquela que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados, ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (ABNT, 1994). Smith (1993) não utiliza um novo termo para definir tarefas de manutenção que visam à detecção de falhas iminentes ou ao monitoramento da condição de um equipamento, tratando essa técnica complementar de manutenção como um subtipo de manutenção preventiva (v. seções 2.3.4 e B.1.3.2).

Além dos tipos de manutenção, Smith (1993); Veer e Bolland (2003) definem alguns termos relacionados às paradas resultantes de falhas nos equipamentos em operação:

- a) **Paradas planejadas** (*planned outages*): Designadas para tarefas de manutenção preventiva;
- b) **Paradas forçadas** (*forced outages*): Resultantes de falhas inesperadas;
- c) **Paradas de manutenção** (*maintenance outages*): Resultantes de problemas inesperados em equipamentos que não chegaram à falha, mas cuja operação normal está comprometida. Dessa forma, pode-se adiar o desligamento ou o corte do fornecimento de um serviço até que uma parada seja mais tolerável, por exemplo, fora de um período de pico de demanda ou de um processo crítico da planta.

Vale a pena destacar que esses termos e outras métricas, importantes para a definição e quantificação dos fatores de disponibilidade e confiabilidade, são mais ou menos consensuais na indústria de geração de energia, pois de fato existem variações de nomenclatura. Veer e Bolland (2003) fazem uma análise crítica sobre as dificuldades de se estabelecer um padrão de terminologias entre normas internacionais e padrões internos de empresas fabricantes de turbinas a gás no cenário europeu tipicamente regulatório. Além de proporem melhorias nas definições dessas métricas, parcialmente eliminando ambigüidades comuns a essas nomenclaturas, apontam as deficiências relacionadas ao clássico tratamento binomial do tipo falha ou sucesso (BILLINTON; ALLAN, 1983), já que as falhas mais comuns em turbomáquinas se manifestam como um processo de degradação progressivo ao longo do período de operação. Eles propõem, então, fórmulas e fatores de correção, assim como boas

práticas de medição para uma avaliação mais coerente e precisa da confiabilidade e disponibilidade de turbomáquinas.

### **2.3.2 A Manutenção de Compressores Centrífugos**

Os compressores centrífugos, e as turbomáquinas de um modo geral, são equipamentos de elevada confiabilidade, podendo operar continuamente por longos períodos cobrindo uma ou mais campanhas de operação anuais. Isso se deve em parte a sua concepção mecânica relativamente simples, com praticamente ausência total de partes móveis em contato com partes estacionárias. Conforme foi visto, são máquinas de tecnologia avançada que incorporam desenvolvimentos de engenharia com vistas a torná-las cada vez mais confiáveis e eficientes. Periodicamente, entretanto, dever-se-á efetuar uma revisão geral no equipamento visando a verificação detalhada de seu estado interno e a preparação para novas campanhas de longa duração (JULIANI, [2003]).

Os intervalos para execução dessa manutenção geral dependem muito das condições de operação da máquina e do gás veiculado. Se, por exemplo, o gás for muito “sujo” e/ou com elementos contaminantes, recomenda-se a realização de inspeções mais freqüentes, em prazos de 2 a 3 anos de operação. Para a tomada de decisão recomenda-se que sejam analisados, periodicamente, os níveis de vibração e a eficiência do compressor. Com “gases limpos”, as campanhas de operação podem ser bem maiores; nesses casos, o ideal seria efetuar-se uma revisão completa a cada 5 ou 6 anos de operação para se verificar se nenhuma anormalidade está se desenvolvendo nas partes estacionárias. Há casos de máquinas em operação há mais de 10 anos sem terem sido abertas, havendo, porém, um risco potencial que não pode ser desprezado: o longo tempo de operação resulta em probabilidade de aparecimento de problemas devido ao envelhecimento dos componentes (JULIANI, [2003]).

Nas revisões recomenda-se, no ato de abertura da carcaça, observar o estado interno do rotor, difusores, planos de junta, etc. e efetuar medição de folgas entre as partes fixas e móveis antes da remoção do rotor. Isso possibilitará a análise criteriosa de detalhes importantes que serão perdidos após sua limpeza. Em seguida, o rotor e os difusores devem ser removidos para limpeza cuidadosa (normalmente, o rotor é “jateado” com óxido de alumínio), inspeção com líquido penetrante para a pesquisa de eventuais fissuras e controle dimensional e geométrico. Deve-se ainda examinar os mancais e sistemas de selagem quanto a seu estado, folgas, aparência e aderência do metal-patente, etc. Os equipamentos auxiliares,

como os sistemas de óleo de lubrificação e selagem, devem também ser revisados; o óleo do tanque precisa ser cuidadosamente avaliado quanto a seu estado. Na montagem, após a revisão, deverá ser realizado um cuidadoso *oil flushing* com o fluxo desviado dos mancais com telas de malha fina, para avaliação do estado de limpeza do sistema de lubrificação como um todo (JULIANI, [2003]).

A questão central deste trabalho é, portanto, determinar de forma mais precisa “quando” esta manutenção programada/revisão geral deve ser conduzida, pois ela é feita de forma preventiva, baseada principalmente na experiência dos especialistas de manutenção da máquina. A proposta é utilizar técnicas de sistemas especialistas e manutenção preditiva para avaliar o estado interno do compressor baseado na performance termodinâmica da sua operação. Além disso, como existe uma série de sistemas auxiliares e dispositivos de proteção e desarme da máquina, pode-se monitorar os dados dos sensores automaticamente e, com a integração da instrumentação, realizar diagnósticos mais rápidos e precisos quando situações anormais são detectadas como um aumento dos níveis de ruído ou vibração, ou no caso de ocorrer uma parada de emergência. Isso sem contar com a possibilidade, ou melhor, com a necessidade de monitorar as condições de operação do acionador e a sua provável influência no compressor.

Ainda assim, existem procedimentos básicos de manutenção preventiva, a serem realizados diariamente, semanalmente e mensalmente, que podem ser úteis ao diagnóstico de falhas. A política da Manutenção Centrada na Confiabilidade (v. seção B.1) defende a idéia de que muitos modos de falha possuem efeitos de aviso que podem ser identificados pelas sensações humanas de um operador, por exemplo. Segundo Vinadé (2003), uma das vantagens desse tipo de monitoramento é o baixo custo, pois pode ser executada por pessoas que estão normalmente próximas ao equipamento. Além disso, o ser humano tem a capacidade de julgar a severidade da falha e adotar uma ação apropriada ao passo que os dispositivos de monitoramento da condição necessitam de sistemas computacionais inteligentes para processar sinais e tomar decisões. Por outro lado, ele aponta o fato que a maioria das falhas iminentes detectadas pelas sensações humanas normalmente já se encontram em estágio avançado, ou seja, o tempo disponível para tomar uma ação de reparo ou substituição é geralmente curto.

Outro ponto interessante a destacar é a execução de testes para a detecção de falhas ocultas (v. seção B.1.3.3). Afonso (2002) fornece um exemplo prático desse tipo de falha que,



neste caso, levou à ocorrência do desarme de um compressor de grande porte devido à queda de pressão do sistema de lubrificação:

... após a parada da turbina [auxiliar] que aciona a bomba de óleo, a bomba reserva entrou em funcionamento normalmente, mas a existência de uma válvula de retenção emperrada permitiu que o óleo existente nos acumuladores (ali instalados para fornecer óleo enquanto a bomba reserva acelera até a rotação nominal) fosse drenado e que a pressão do sistema caísse além do ponto onde há o desarme do conjunto. A causa básica da falha foi a parada da turbina auxiliar [devido a um vazamento no resfriador de óleo], mas o problema foi grandemente amplificado devido à falha [em aberto] da válvula de retenção [que deveria ter bloqueado o retorno do óleo dos reservatórios pressurizados].

Nesse e em muitos outros casos de componentes e sistemas redundantes ou reservas, devem ser realizados procedimentos de testes para verificar o estado de funcionamento desses dispositivos. Ao ligar a bomba de óleo reserva no modo *off-line*, durante uma manutenção programada da máquina, por exemplo, poder-se-ia identificar o emperramento da válvula de retenção do sistema de lubrificação reserva, evitando assim a parada de emergência do compressor.

Dentre os modos de falha mais comuns em compressores centrífugos pode-se citar (JULIANI, [2003]):

- a) Danos nos mancais devido a um elevado desalinhamento entre os eixos do compressor e do acionador (acoplamento). Os danos no conjunto rotativo devido a falhas nos mancais normalmente atingem todos os estágios, já que eles estão sobre um mesmo eixo;
- b) Depósitos de “sujeira” nos difusores ou mesmo nos impelidores do rotor devido à presença de líquidos condensáveis no gás;
- c) Desgaste em selos labirinto interestágio e do pistão de balanceamento devido à sucção de partículas, resultando na redução da performance e sobrecarga do mancal de escora.

### 2.3.3 FMEA – A Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos

A FMEA teve origem na FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*), desenvolvida nos anos 50 pela indústria aeroespacial e pelas forças armadas americanas para tratar e classificar as falhas de acordo como o seu impacto no sucesso das missões e nas questões críticas de segurança. Ela possui atualmente uma norma ou padrão militar específico

para sua aplicação, a MIL-STD-1629A<sup>7</sup>. Segundo Blanchard *et al.* (1995), a FMECA consiste de duas análises distintas: a FMEA e a Análise de Criticidade ou Criticalidade (CA). Sendo, portanto, um desdobramento da FMECA, a FMEA foi inicialmente utilizada de forma independente por engenheiros de confiabilidade nos anos 60 e 70, e especificamente desenvolvida pelos fabricantes de automóveis que desejavam avaliar os modos de falha potenciais de um componente e/ou processo e seus efeitos na performance do produto. Atualmente, existem um manual de referência<sup>8</sup> e uma norma SAE<sup>9</sup> desenvolvidos respectivamente pelo Grupo de Ação da Indústria Automotiva (AIAG) e pelo Comitê de Melhoria do Processo e Qualidade Automotiva, formado pela *Ford Motor Company*, *General Motors Corporation* e *DaimlerChrysler Corporation*.

Sistema		Identificação		Data		14/01/02		
Função		Analistas		Revisão				
Modos de Falha		Efeitos da Falha						
Modo de Falha	Causa	Frequência Ocorrência	Efeitos Locais	Efeitos Globais	Método Detecção	Grau de Severidade	Probabilidade de Detecção	RPN
<i>Expansão Térmica</i>	<i>Temperatura</i>	<i>1</i>	<i>Vazamento de Gás</i>	<i>Perda de Performance</i>	<i>Inspeção</i>	<i>6</i>	<i>10</i>	<i>60</i>
<i>Quebra</i>	<i>Vibração</i>	<i>3</i>	<i>Vazamento de Gás</i>	<i>Perda de Performance</i>	<i>Inspeção</i>	<i>6</i>	<i>10</i>	<i>180</i>

Quadro 2.1 - Exemplo de FMECA dos selos labirinto de um compressor centrífugo.

Fonte: adaptado de TASSELI *et al.*, 2002.

Tanto a FMEA quanto a FMECA são ferramentas de análise destinadas à identificação de deficiências potenciais de projeto, onde deve-se considerar todas as formas possíveis nas quais um componente pode falhar (os modos de falha), as causas possíveis para cada falha, os seus efeitos na operação do sistema (e em outros componentes), e as ações corretivas que podem ser iniciadas para prevenir (ou reduzir a probabilidade de) problemas potenciais que possam ocorrer no futuro. A FMECA considera ainda a criticidade do modo de falha de um componente avaliando a frequência provável de sua ocorrência, o grau de severidade e a probabilidade de detecção do efeito do modo de falha, representando-a em um número apenas, o chamado “número de prioridade de risco” (RPN) o qual corresponde à

<sup>7</sup> MIL-STD-1629A, *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, Department of Defense, Washington, DC, 1984.

<sup>8</sup> FMEA-3, *Potential Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), Reference Manual, AIAG, 2001.

<sup>9</sup> SAE J1739, *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design* (Design FMEA) and *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes* (Process FMEA) and *Effects Analysis for Machinery* (Machinery FMEA), Automotive Quality and Process Improvement Committee, 2002.

multiplicação dos valores quantitativos dos três elementos. No Quadro 2.1, um exemplo de formulário típico de FMECA de sistema aplicado a um componente de um compressor centrífugo.

Além dos benefícios mais evidentes como a identificação de ações ou modificações que podem eliminar ou reduzir a chance de falhas potenciais ocorrerem e avaliar os riscos envolvidos na pane de um sistema, a FMEA e FMECA aumentam o nível de conhecimento dos analistas e fornecem *insights* sobre seu comportamento esperado. Portanto, mais do que uma ferramenta de projeto, a FMEA se constitui num registro sobre os mecanismos e conseqüências de falhas que pode evitar que problemas passados venham a ocorrer novamente, buscando uma melhoria contínua e sendo um documento “vivo”, que deve ser atualizado para representar as últimas mudanças realizadas no produto. Na manutenção, ela auxilia na busca por soluções mais eficazes no tratamento das falhas, suas prevenções e conseqüências, podendo indicar pontos a serem melhorados no projeto do equipamento sob o ponto de vista da manutenibilidade e da confiabilidade.

A FMEA é um método padrão de análise de falhas utilizada no projeto de produtos e sistemas. Uma FMEA rigorosamente executada contém informações valiosas sobre os vários componentes e montagens de um produto, que podem ajudar na detecção antecipada de pontos fracos do seu projeto. Essa ferramenta, entretanto, é ainda considerada muito laboriosa e cara por muitas organizações (TUMER *et al.*, 2003). Uma das maiores dificuldades encontradas é a baixa reusabilidade do conhecimento gerado devido a descrições redundantes e inconsistentes das funções dos componentes e sistemas e das suas falhas correspondentes. Isto se deve principalmente à falta de uma metodologia para se conduzir uma FMEA e ao uso de linguagem natural para descrever as informações relativas à análise. Tumer *et al.* (2003) propõem o uso de uma taxonomia para mapear funções e falhas de maneira inequívoca, baseando-se numa descrição física do mecanismo de falha, enquanto Xu *et al.* (2002) apresentam um método baseado na lógica difusa (*fuzzy*) para representar a linguagem natural tipicamente utilizada na FMEA e permitir o compartilhamento de informações entre especialistas de diversas áreas. Embora esse não seja o propósito deste trabalho, ambas as propostas podem ser tratadas por sistemas baseados em conhecimento (v. Capítulo 3).

A relação entre modo de falha e efeito, se bem compreendida, pode tornar-se numa fonte de conhecimento importante para a análise de confiabilidade e também para as sistemáticas de manutenção a serem adotadas. Entretanto, a dificuldade na determinação dessa

relação, normalmente, é grande, uma vez que diferentes modos de falha podem se manifestar da mesma maneira, ou seja, podem apresentar o mesmo efeito. Essa complexidade torna-se ainda mais evidente quando um item está associado a outro. Sakurada (2001) ilustra uma situação desse tipo:

Por exemplo, um eixo enquanto um elemento de máquina isolado pode ter modos de falha do tipo: fratura abrupta, fratura por fadiga, empenamento. Se associado ao mancal, e o eixo estiver girando, pode-se considerar, ainda, os modos de falha: eixo trancado e eixo desalinhado. Tanto o modo de falha “empenamento” quanto “eixo desalinhado” tem como efeito, quando o eixo gira, a vibração. Esse efeito pode ser produzido também por problemas específicos nos mancais que suportam o eixo ou por outros componentes que estão montados no eixo.

Outro aspecto importante a ser abordado na FMEA é a causa geradora do modo de falha. Embora muitos modos de falha sejam inerentes ao item sob análise, o estudo das causas permite aprofundar a relação entre o item e a função, e gerar procedimentos mais consistentes para tirar maior proveito dos efeitos nas suas primeiras manifestações, no sentido de tomar as providências necessárias antes da perda da função devido à ocorrência do modo de falha. Mais uma vez, a manutenção preditiva encontra apoio nas técnicas de análise discutidas neste trabalho, essa que é certamente a categoria de manutenção mais importante a ser aplicada em compressores de grande porte.

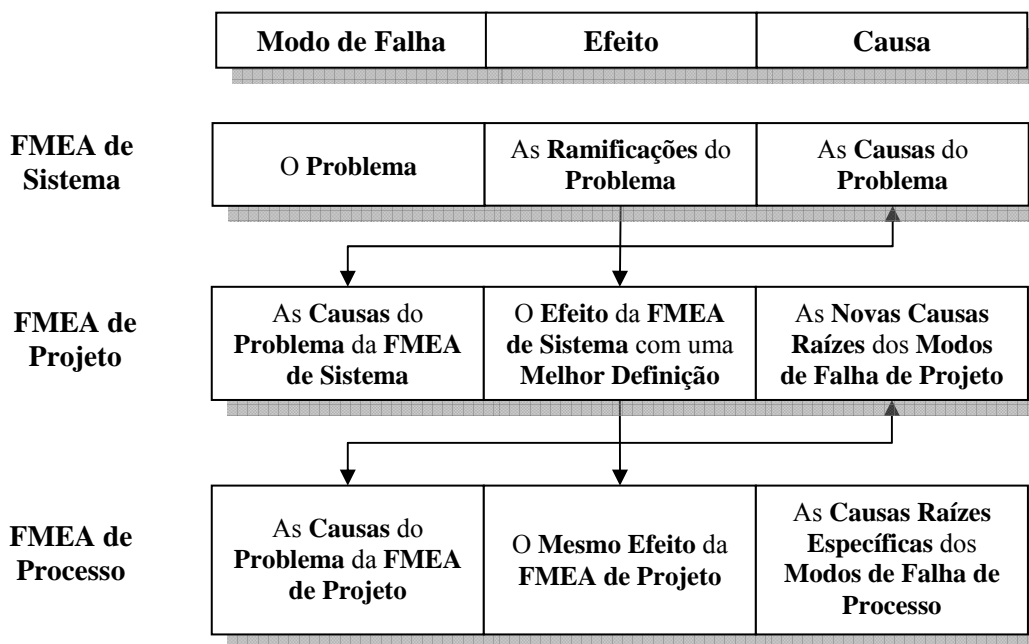


Figura 2.17 - Relações entre as aplicações de FMEA na indústria automotiva.

Fonte: adaptado de SMITH, 1998.

O processo de desenvolvimento da FMEA deve ser conduzido por uma equipe multidisciplinar que conheça o projeto, os modos de operação e as tarefas de manutenção utilizadas no produto ou sistema. Se possível, é útil incluir pessoas que conheçam o processo de fabricação dos componentes do sistema sob análise, assim como os eventuais instrumentos e dispositivos eletrônicos auxiliares que possuam relação direta com a função desempenhada pelo equipamento. Essas equipes podem e devem fazer uso de ferramentas como FTA, QFD e *brainstorming*. Como no processo de análise da MCC (v. seção B.1.4), toda a documentação disponível, relacionada ao sistema, deve ser analisada e considerada como fonte de conhecimento para o processo da FMEA. Na Figura 2.17 são ilustrados os relacionamentos entre as diferentes aplicações de FMEA na indústria automotiva, onde é possível visualizar a hierarquia das FMEA's de sistema, projeto e processo. Essa é a forma de se mapear as causas raízes dos modos de falhas de um sistema ou componente numa indústria de manufatura.

### 2.3.4 A Manutenção Baseada na Condição

A manutenção baseada na condição (MBC) é um programa de manutenção que recomenda decisões de manutenção baseadas nas informações coletadas por meio do monitoramento da condição. A MBC consiste em três passos principais: aquisição de dados, processamento de dados e tomada de decisão de manutenção. O diagnóstico e o prognóstico são dois aspectos importantes de um programa de MBC. O diagnóstico trata da detecção, isolamento e identificação de falhas. A detecção de falhas é uma tarefa para indicar se há algo de errado no sistema monitorado; o isolamento da falha é uma tarefa para localizar o componente defeituoso; e a identificação da falha é uma tarefa para determinar a natureza de uma falha quando ela é detectada. O prognóstico trata da predição da falha antes de sua ocorrência. A predição da falha é uma tarefa para determinar se uma falha é iminente e para estimar quando provavelmente essa falha irá ocorrer. O diagnóstico é uma análise posterior ao evento e o prognóstico é uma análise anterior ao evento. O prognóstico é muito mais eficiente do que o diagnóstico para alcançar a quebra-zero. O diagnóstico, entretanto, é necessário quando a predição de falha do prognóstico erra e a pane ocorre. As três fases (Figura 2.18) da MBC que serão descritas nesta seção são baseadas no trabalho de Jardine *et al.* (2006).



Figura 2.18 - Os três passos da MBC.  
Fonte: JARDINE *et al.*, 2006.

#### 2.3.4.1 Aquisição de Dados

A aquisição de dados é o processo de coleta e armazenamento de dados (informações) dos equipamentos para a implementação de um programa de MBC. Os dados coletados em um programa de MBC podem ser categorizados em dois tipos principais: dados de eventos e dados de monitoramento da condição. Os dados de eventos incluem as informações sobre o que aconteceu (*e.g.*, instalação, quebra, revisão, etc., e quais foram as causas) e/ou o que foi feito (*e.g.*, pequeno reparo, manutenção preventiva, troca de óleo, etc.) no equipamento físico sob monitoramento. Os dados de monitoramento da condição são medidas relacionadas ao estado/condição de “saúde” do equipamento (*e.g.*, vibração, ruído, análise do óleo lubrificante, umidade, pressão, temperatura, etc.). Enquanto a aquisição de dados de monitoramento é feita diretamente por meio de sensores e pode ser transmitida por redes industriais de comunicação para bancos de dados em tempo real, a coleta de dados de eventos requer entrada manual no sistema de informações de manutenção. Isto requer a implantação de uma cultura de registro das informações de forma correta, completa e consistente, exigindo um treinamento específico do pessoal de manutenção.

#### 2.3.4.2 Processamento de Dados

O primeiro passo do processamento de dados é a filtragem de dados. Essa é uma etapa importante, uma vez que os dados, especialmente aqueles de eventos que são normalmente inseridos manualmente, sempre contêm erros. A filtragem de dados garante (ou pelo menos aumenta a chance) que apenas dados livres de erros sejam usados para análises e modelagens futuras. A filtragem de dados de eventos pode ser feita com ferramentas gráficas que facilitem a visualização de inconsistências, enquanto os dados de monitoramento da condição podem ser filtrados automaticamente por algoritmos computacionais ou mesmo filtros digitais conforme a intensidade da presença de ruídos no sistema de aquisição de dados. Essa é uma área ampla que deve ser investigada e que possui inúmeros trabalhos de pesquisa relacionados ao tema.

O passo seguinte é a análise de dados. Uma imensa variedade de modelos, algoritmos e ferramentas estão disponíveis na literatura para coletar e interpretar os diferentes tipos de dados de monitoramento da condição, os quais se enquadram em três categorias básicas:

- a) **Tipo valor:** dados coletados em períodos de tempo específicos relativos a uma variável de monitoramento da condição que possui apenas um valor escalar. Por exemplo: temperatura, pressão, vazão;
- b) **Tipo forma de onda:** dados coletados em períodos de tempo específicos relativos a uma variável de monitoramento da condição que possui um valor vetorial representado pelo seu espectro de frequência. Por exemplo: vibração, ruído;
- c) **Tipo multidimensional:** dados coletados em períodos de tempo específicos relativos a uma variável multidimensional de monitoramento da condição. Por exemplo: imagem digital, termografia infravermelha, imagem de raios X.

O processamento de dados dos tipos forma de onda (*waveform*) e multidimensional também é conhecido como processamento de sinais. Várias técnicas foram desenvolvidas para analisar e interpretar esses tipos de dados para extrair informações úteis para o diagnóstico e o prognóstico de falhas. O processamento de sinais para dados multidimensionais é similar, mas normalmente mais complicado que para dados em forma de onda devido ao acréscimo dimensional de informações analisadas. O tipo mais comum de dado tipo forma de onda são sinais de vibração e emissões de ruído. Na literatura existem três categorias principais de análises de dados tipo forma de onda: análise no domínio do tempo, análise no domínio da frequência e análise nos domínios de tempo e frequência. As técnicas de análise de tendência como a regressão linear e os modelos de séries temporais são comumente utilizadas na análise de dados do tipo valor.

A análise de dados de eventos é conhecida como análise de confiabilidade, a qual procura ajustar a distribuição de probabilidade de intervalos entre eventos a um modelo de distribuição para análises futuras. Como a MBC também possui dados de monitoramento da condição disponíveis, pode-se construir um modelo matemático que descreva o mecanismo subjacente da falha combinando-se, de forma apropriada, ambos os tipos de dados. O modelo desenvolvido é a base da tomada de decisão de manutenção do diagnóstico e prognóstico a ser discutida na próxima seção. Segundo Jardine *et al.* (2006, tradução nossa), um modelo popular na análise de riscos com base temporal, o modelo de riscos proporcionais (PHM), é adequado para tratar conjuntamente os dados de eventos e monitoramento da condição. Outro

modelo disponível, paramétrico, é a função de risco da distribuição de Weibull. O modelo de Markov oculto (HMM) também seria adequado para a análise combinada desses dados, sendo composto por uma cadeia de Markov com um número finito de estados descrevendo os mecanismos subjacentes da falha e um processo de observação dependendo do estado oculto.

#### 2.3.4.3 Tomada de Decisão de Manutenção

O último passo do programa de MBC é a tomada de decisão de manutenção. Nessa fase, as duas categorias de suporte à decisão – diagnóstico e prognóstico – devem fornecer informações suficientes para que o pessoal de manutenção possa tomar decisões corretas e realizar ações de manutenção eficientes. Como foi mencionado anteriormente, o prognóstico é superior ao diagnóstico no sentido em que o prognóstico pode prevenir falhas e panes e, quando possível, deixar o pessoal da manutenção preparado (com itens sobressalentes e recursos humanos planejados) para os problemas resultantes, reduzindo os custos extras com manutenção corretiva. Mesmo assim, o prognóstico não consegue substituir o diagnóstico completamente, uma vez que, na prática, sempre existem alguns modos de falhas que não são previsíveis ou cuja iminência não seja detectada. Além disso, o prognóstico, como qualquer técnica de previsão, nunca estará 100% certo de sua conclusão. Nesse caso, o diagnóstico pode ser uma ferramenta complementar ao prognóstico, já que as suas informações podem ser úteis para melhorar a precisão dos dados de eventos e, portanto, subsidiar a construção de modelos mais adequados para o prognóstico, sendo, muitas vezes, bastante úteis inclusive no reprojeto de sistemas ou componentes.

O diagnóstico de falhas em máquinas é um procedimento de mapeamento das informações extraídas dos dados de monitoramento da condição e de eventos em um espaço de modos de falha, também conhecido como reconhecimento de padrões. Geralmente esse reconhecimento de padrões é realizado por especialistas num domínio específico de diagnóstico. Dessa forma, é necessário pessoal altamente treinado e habilitado ou então, o que é altamente desejável, o reconhecimento automático de padrões. Várias técnicas de diagnóstico automático foram desenvolvidas com ênfase nas abordagens estatísticas e de inteligência artificial (IA). Serão mencionados aqui, os principais métodos de cada abordagem existente:



- a) **Abordagem Estatística:** teste de hipótese estruturado, controle estatístico de processos (SPC), análise estatística multivariável, medidas de distância (*e.g.*, Euclidiana, Bayesiana, etc.), máquina de vetor suporte (SVM), dentre outros;
- b) **Abordagem de IA:** redes neurais artificiais (ANN), sistemas especialistas (SE), sistemas ou modelos difusos e lógica nebulosa (*fuzzy*), sistemas híbridos *neuro-fuzzy*, raciocínio baseado em casos (CBR) e algoritmos genéticos (GA);
- c) **Abordagem Baseada em Modelos:** principalmente os modelos físicos e matemáticos baseados em resíduos, como filtro Kalman, estimação de parâmetros (associada à identificação de sistemas) e relações de paridade.

O prognóstico de falhas possui, quantitativamente, uma literatura relacionada muito inferior ao diagnóstico. Entretanto, as abordagens utilizadas são as mesmas do diagnóstico. O método de predição de falhas em máquinas mais amplamente difundido é o modelo da vida útil restante (RUL), cuja idéia é prever ou estimar o quanto de tempo de vida resta antes que a falha ocorra, dados o estado atual da máquina e o histórico do perfil operacional. Outras técnicas de prognóstico visam à otimização das políticas de manutenção de acordo com certos critérios como: riscos, confiabilidade, disponibilidade e custos. Outras questões abordadas pelo monitoramento da condição são: a observabilidade de sistemas (divididos em completamente e parcialmente observáveis), o monitoramento de dados contínuo (em tempo real) ou periódico e a fusão de múltiplos sensores.

Espera-se que com a enumeração das diversas técnicas de MBC tenha sido possível evidenciar a enorme aplicabilidade desse tipo de programa de manutenção no diagnóstico e prognóstico de falhas de máquinas. As técnicas de IA aplicadas ao diagnóstico de máquinas têm demonstrado desempenho superior aos métodos convencionais, embora haja dificuldades inerentes ao processo de treinamento (na linha conexionista) e obtenção de conhecimento especializado necessários ao desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento (*v.* seção 3.2.1). A maioria das aplicações de MBC pesquisadas e apresentadas na próxima seção faz uso dessas técnicas.

### 2.3.5 Aplicações da MBC para Turbomáquinas

Em termos de manutenção e falhas, o mais comum é ocorrer o chamado processo de degradação de performance das turbomáquinas, cujos efeitos são perceptíveis mais ou menos lentamente ao longo do seu período de operação. Por exemplo, mesmo sob as melhores

condições de operação possíveis, a performance de uma turbina a gás está sujeita à deterioração devido ao acúmulo de sujeira ou corrosão no compressor de ar, entupimento do filtro de entrada de ar, fadiga térmica e oxidação dos componentes da seção quente (saída da câmara de combustão e palhetas da turbina). A degradação de performance atribuída ao acúmulo de sujeira no compressor de ar comburente é devida, principalmente, à formação de depósitos nas palhetas do compressor em função das partículas carregadas pelo ar que não são grandes o suficiente (tipicamente com diâmetro de poucos microns) para serem barradas pelo filtro de ar. Dependendo do local e do ambiente da planta essas partículas podem variar desde poeira e fuligem até gotículas de água ou mesmo pequenos insetos. Esses depósitos resultam na redução da vazão mássica, eficiência e razão de pressão do compressor que, por sua vez, causam uma queda na potência produzida pela turbina e o aumento da razão de calor gerado. Esse tipo de degradação é o modo de falha dominante em turbinas a gás. Vários estudos de turbinas a gás industriais sugerem que o decréscimo de potência resultante desse tipo de deterioração pode facilmente alcançar 5% após um mês de operação (GÜLEN *et al.*, 2002).

Felizmente, o acúmulo de sujeira no compressor é um tipo de degradação “recuperável” no sentido em que pode ser amenizado por lavagens *on-line* e/ou *off-line* periódicas do compressor. Em uma lavagem *on-line*, água destilada é injetada no compressor enquanto a turbina está em funcionamento de tal forma que as gotículas de água se chocam à alta velocidade contra as palhetas do compressor para desprender e remover os depósitos de sujeira. Contudo, a recuperação completa da performance do compressor somente é possível com a lavagem *off-line* onde água destilada (algumas vezes misturada a um tipo especial de detergente) é borrifada à alta pressão no interior da turbina enquanto ela é acionada somente pelo sistema de partida na velocidade de ignição (*crank speed*), porém com a injeção de combustível e o sistema de ignição desativados. A degradação dos componentes da seção quente (*hot gas path*), normalmente mais lenta que os demais mecanismos, é influenciada por vários fatores como a qualidade do combustível, número de partidas, quantidade de água/vapor injetados, etc., e é comumente referida como do tipo “não recuperável”. Nesse caso, somente uma manutenção programada, normalmente com atualização tecnológica, dos componentes da seção quente da turbina a gás permite recuperá-la à condição de “tão bom quanto novo” (GÜLEN *et al.*, 2002). A Figura 2.19 ilustra as relações entre os diferentes tipos de degradação e a influência das lavagens e da manutenção programada nas perdas de eficiência das turbinas a gás ao longo do tempo.

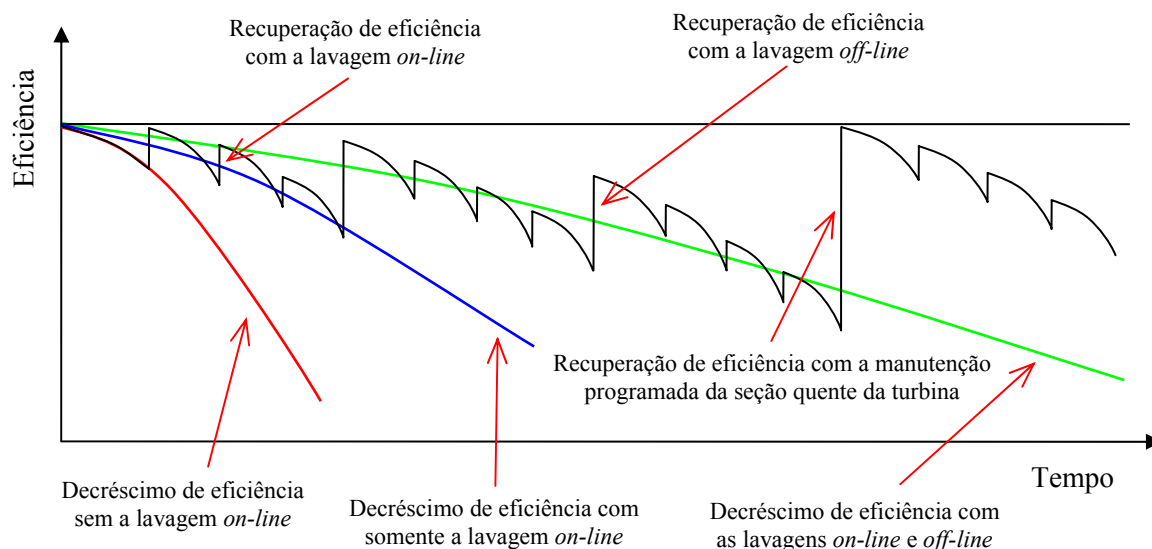


Figura 2.19 - Os tipos de degradação de eficiência em turbinas a gás.

Fonte: adaptado de KACPRZYNSKI *et al.*, 2001.

Como foi comentado na seção 2.3.2, o compressor centrífugo também apresenta um processo de degradação ao longo do tempo dependendo do nível de “sujeira” do gás de processo, o que pode ser devido a contaminantes sólidos e líquidos ou mesmo polímeros derivados de hidrocarbonetos pesados formados devido às altas temperaturas, podendo danificar os impelidores ou mesmo formar camadas de sujeira nas superfícies aerodinâmicas aumentando a sua rugosidade e, conseqüentemente, as perdas por fricção viscosa. São conhecidos casos em que compressores de gasodutos perdem cerca de 5% da eficiência devido a camadas de detritos oleosos nas superfícies de impelidores e difusores (KURZ; BRUN, 2001).

Vários sistemas de diagnóstico e prognóstico foram desenvolvidos e continuam sendo aperfeiçoados para implementar a MBC de turbomáquinas. Os trabalhos de Kacprzyński *et al.* (2001) e Byington *et al.* (2003) são baseados nos modelos de degradação das turbinas a gás com o prognóstico de falhas voltado para a decisão de manutenção através das lavagens *on-line* e *off-line*, e a revisão da seção quente. Ambos os trabalhos fazem parte de um grande programa de desenvolvimento das tecnologias de MBC no DoD; em especial na Marinha americana. Um relatório publicado pelo Instituto de Gestão de Logística (LMI) do Departamento de Defesa americano (BUTCHER, 2000) apresenta a definição e o propósito do programa de MBC no DoD:

- Definição: MBC é um conjunto de ações de manutenção baseadas em avaliações das condições dos equipamentos em tempo real ou quase tempo real obtidas de

sensores embarcados e/ou testes externos e de medições realizadas por dispositivos portáteis.

- Propósito: O propósito da estratégia da MBC é executar a manutenção somente quando existem evidências objetivas da sua necessidade, garantindo-se a segurança, a confiabilidade dos equipamentos e a redução do custo total das instalações.

Além dessas definições, nesse relatório são feitas uma revisão e uma avaliação dos principais programas de MBC no DoD sejam eles voltados para o exército, marinha ou aeronáutica (frota de caças e helicópteros). Outros artigos que tratam das técnicas de MBC na Marinha americana podem ser citados: Bennett e Hadden (1999) e Hadden *et al.* (2000). Enquanto os artigos de Kacprzyński *et al.* (2001) e Byington *et al.* (2003) tratam de aspectos específicos da MBC de turbinas a gás, os demais artigos discutem as arquiteturas de MBC aplicadas aos sistemas navais em geral. Três aspectos interessantes desses trabalhos são úteis destacar:

- a) A utilização de uma arquitetura genérica para o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico e prognóstico modulares e reusáveis. O padrão OSA-CBM é um sistema de especificações não proprietário cuja proposta é dividir o *software* e o *hardware* para a MBC em módulos funcionais que possuam uma interface bem definida entre si cujos benefícios seriam, segundo a organização MIMOSA<sup>10</sup> (SETHIYA, 2005):
  - Aumento da facilidade de *upgrade* dos sistemas componentes;
  - Componentes de *software* e *hardware* intercambiáveis;
  - Uma comunidade de fornecedores mais ampla;
  - Um maior leque de escolhas tecnológicas para o usuário;
  - Desenvolvimento mais rápido de tecnologias;
  - Redução de preços.
- b) O uso de repositórios orientados a objeto para a recuperação de informações sobre o estado das máquinas utilizadas para a comunicação entre os vários módulos de diagnóstico e prognóstico existentes numa embarcação. Além desses relatórios, é possível manter modelos sobre as características físicas, mecânicas e energéticas das máquinas que estão sendo monitoradas;

---

<sup>10</sup> A Aliança de Sistemas Abertos para a Gestão da Informação de Maquinários (MIMOSA), fundada em 1994, tem como objetivo desenvolver convenções abertas para a troca de informações entre sistemas de informação para a manutenção de máquinas e plantas industriais. Essa organização apresenta as especificações da OSA-CBM através de 7 camadas ou módulos funcionais na forma de um diagrama UML (MIMOSA, 2007).

- c) A fusão de conhecimento proveniente da análise de dados individuais de vários sensores. Dessa forma, o mecanismo de inferência desse módulo é capaz de tratar dados que são incompletos, desordenados no tempo, fragmentados, inconsistentes ou contraditórios. O diagnóstico é implementado por heurísticas que agrupam falhas similares em grupos lógicos e a manutenção da crença é realizada pelo modelo de Dempster-Shafer (v. seção 3.3.3).

O Quadro 2.2 apresenta um levantamento preliminar de alguns artigos relacionados ao diagnóstico e prognóstico de falhas em turbomáquinas que aplicam as diferentes técnicas de suporte à tomada de decisão de manutenção da MBC mencionadas na seção 2.3.4.3. É importante ressaltar que a maioria dos sistemas apresentados e implementados não emprega exclusivamente um tipo de abordagem, mas sim uma combinação dessas técnicas de forma complementar; embora haja o predomínio ou maior ênfase seja dada numa determinada técnica sobre as demais. Outros trabalhos apresentam as diversas abordagens de maneira geral discutindo as vantagens e desvantagens de cada método, levando-se em conta sua aplicabilidade para o diagnóstico e prognóstico de falhas em turbomáquinas, tais como: Brotherton *et al.* (2000), Roemer *et al.* (2001) e Jaw (2005).

Métodos Estocásticos/Probabilísticos	Roemer e Kacprzyński (2000); Kacprzyński <i>et al.</i> (2001); Romessis e Mathioudakis (2005)
Redes Neurais/ <i>Neuro-Fuzzy</i>	Simani <i>et al.</i> (1998); Bettocchi <i>et al.</i> (2005a); Bettocchi <i>et al.</i> (2005b)
Lógica/Classificação <i>Fuzzy</i>	Applebaum e Ha'Emek (2001); Ganguli (2003); Gayme <i>et al.</i> (2003)
Identificação/Modelos	Kurosaki <i>et al.</i> (2004); Simani (2005); Surender e Ganguli (2005)
Sistemas Especialistas/Raciocínio Baseado em Casos	DePold e Gass (1999); Kubiak <i>et al.</i> (2002); Decoussemaeker (2005)

Quadro 2.2 - Alguns artigos relacionados à MBC de turbomáquinas.

Em virtude de ter-se dado ênfase aos métodos de decisão baseados em IA neste trabalho, as demais abordagens (modelos físicos/matemáticos ou probabilísticos) não foram comparadas entre si quanto às vantagens e desvantagens relativas. Dentre as técnicas de IA que podem ser aplicadas no diagnóstico de falhas principalmente, sabe-se que as redes neurais artificiais dependem de muitos dados para o treinamento da rede, e o raciocínio baseado em casos necessita de uma cultura e sistemática minuciosa de armazenamento das informações e dados sobre falhas para dar início ao seu processo de desenvolvimento, que, caso existam para os equipamentos do GASBOL, não estiveram disponíveis para este trabalho.

A lógica *fuzzy* possui um sistema formal de tratamento da imprecisão e ambigüidade típicas da linguagem de um EH, o que normalmente facilita a avaliação computacional dos termos utilizados por EH's quando da representação e do processamento desse tipo de conhecimento. Entretanto, considerou-se que, para o início do desenvolvimento do protótipo, essa técnica exigiria um esforço de programação ou até mesmo a mudança de ferramenta de desenvolvimento que não justificaria a utilização de um sistema de lógica *fuzzy* neste trabalho. Ainda assim, é importante ressaltar que esse método pode trazer avanços significativos no mecanismo de inferência de um SE.

A abordagem de SE é a mais simples, de implementação mais direta que permite ainda a modelagem do domínio considerado, levando-se em conta as entidades envolvidas nas atividades de diagnóstico e/ou prognóstico que pode ser expandida conforme a necessidade após cada ciclo de desenvolvimento incremental do protótipo. A capacidade de explicar suas conclusões é outro ponto crucial que diferencia a tecnologia de SE das demais, algo considerado importante para a credibilidade das respostas fornecidas por sistemas inteligentes. Além disso, ela permite o tratamento de incertezas no diagnóstico de falhas que é uma tarefa de natureza intrinsecamente probabilística e que necessita de um modelo que considere essa característica na investigação de evidências. O modelo de Dempster-Shafer tem apresentado excelentes resultados nesse sentido.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos objetivos deste capítulo foi apresentar o universo das turbomáquinas e, em especial, os compressores centrífugos. Sendo este um capítulo eminentemente de revisão, foi apresentado um conhecimento mínimo sobre os aspectos construtivos e funcionais desse tipo de máquinas, já que a sua complexidade e a aplicabilidade das técnicas da MBC não podem ser compreendidas sem uma definição clara desses elementos. A manutenção de turbomáquinas envolve uma série de procedimentos e técnicas de inspeção, não somente da máquina em si, mas de todos os instrumentos e subsistemas auxiliares do processo como um todo. Essa infinidade de itens é necessária para garantir o funcionamento adequado das turbomáquinas, mas, por outro lado, torna o conjunto do maquinário extremamente complexo e aumenta exponencialmente as inter-relações entre falhas dos equipamentos envolvidos. Essa é a principal motivação para a aplicação da MBC de turbomáquinas discutida neste capítulo.

Boa parte do texto foi dedicada à enumeração e discussão dos aspectos relativos a falhas e manutenção, pois a especificidade deste trabalho procura estabelecer as relações entre esses e a operação dos compressores centrífugos em particular. Espera-se ter ficado clara a importância da manutenção no ciclo de vida das turbomáquinas e o seu impacto crítico nos custos da planta. Tanto a FMEA quanto a MBC são ferramentas extremamente valiosas na racionalização e otimização das tarefas de manutenção, e essas devem ser comparadas com a Manutenção Centrada na Confiabilidade apresentada no Apêndice B, no sentido em que suas aplicações são fundamentais aos objetivos dessa metodologia de gestão. Quanto à operação, o método de avaliação da performance termodinâmica empregado será apresentado juntamente com o capítulo de descrição do protótipo, já que ele é baseado num código “universal” de análise, o ASME *Performance Test Code* (PTC) 10: *Compressors and Exhausters*.

É importante salientar que, embora o protótipo de SE desenvolvido neste trabalho tenha sido voltado especificamente para os compressores centrífugos, esses são geralmente movidos por turbinas a gás, especialmente no caso do transporte de gás natural e, portanto, não podem ser considerados isoladamente por qualquer sistema de diagnóstico ou prognóstico com pretensões “inteligentes”. Além disso, conforme foi demonstrado, eles pertencem à mesma família de máquinas das turbinas, o que permite estender as técnicas desenvolvidas para os demais tipos de turbomáquinas. Dentre alguns dos trabalhos que consideram esta combinação de performance entre acionador e compressor, ou entre os principais componentes de uma planta de geração de energia por turbinas a gás de ciclo combinado (CCGT) estão os artigos de Kurz e Brun (2001) e Zwebek e Pilidis (2004) respectivamente.

### 3 SISTEMAS ESPECIALISTAS

O paradigma computacional dos sistemas especialistas está bem amadurecido atualmente. Mesmo assim, muitas áreas de conhecimento ainda estão esperando por aplicações desses sistemas como formas de resolver problemas rotineiros que exigem conhecimento e capital humano especializados. A popularização dos sistemas especialistas depende muito mais de uma visão empreendedora e prática para o desenvolvimento de soluções computacionais inteligentes para velhos problemas – suportada primordialmente pela engenharia e gestão de conhecimento – do que de novas técnicas e pesquisas avançadas na área da Inteligência Artificial (IA).

Um extenso levantamento realizado por Liao (2005) sobre o desenvolvimento de sistemas especialistas entre os anos de 1995 e 2004, aponta as inúmeras e diversas áreas de aplicação que essa tecnologia já alcançou e por que a integração das várias técnicas de IA já existentes permite obter sistemas mais poderosos e adequados para cada tipo de problema. Entretanto, ele acredita que o futuro dos sistemas especialistas requer inovações contínuas e que seus desenvolvedores devem estar abertos e preparados para a incorporação de novas técnicas de criação, compartilhamento, aprendizagem e armazenamento de conhecimento.

Conforme foi discutido no capítulo anterior, a Manutenção Baseada na Condição (MBC) possui, intrinsecamente, um componente computacional relacionado a instrumentos e redes industriais. A sua relação com sistemas especialistas, e outras técnicas de IA mencionadas anteriormente, vem da necessidade de tratar esses dados automaticamente e, principalmente, tomar decisões relacionadas ao diagnóstico e/ou prognóstico de falhas em máquinas e equipamentos durante a sua fase de operação. Neste capítulo, que tem por objetivo a apresentação e a revisão das técnicas de representação de conhecimento utilizadas no desenvolvimento do protótipo juntamente com os fundamentos da metodologia empregada, será demonstrada a potencialidade da tecnologia de sistemas especialistas na implementação de sistemas inteligentes para a MBC.

#### 3.1 SISTEMAS ESPECIALISTAS E A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Dada a impossibilidade de uma definição formal precisa para IA, visto que para tanto seria necessário definir, primeiramente, a própria inteligência, muitos estudiosos preferiram



estabelecer apenas os seus objetivos: “tornar os computadores mais úteis e compreender os princípios que tornam a inteligência possível” (WINSTON, 1984 *apud* BITTENCOURT, 2001). Segundo Bittencourt (2001), duas linhas principais de pesquisa deram início à construção de sistemas inteligentes: a linha conexionista e a linha simbólica. A linha conexionista visa à modelagem da inteligência humana através da simulação de componentes do cérebro, *i.e.*, de seus neurônios e de suas interligações. A linha simbólica segue a tradição lógica e teve em John McCarthy e Allen Newell seus principais defensores.

O sucesso dos Sistemas Especialistas (SE's), a partir da década de 70, estabeleceu a manipulação simbólica de um grande número de fatos especializados sobre um domínio específico como o paradigma corrente para a construção de sistemas inteligentes do tipo simbólico. Os SE's foram concebidos para reproduzir o comportamento de especialistas humanos na resolução de problemas do mundo real, mas o domínio desses problemas é altamente restrito. Os SE's foram desenvolvidos com base nos sistemas de produção, que é um nome genérico para todos os sistemas baseados em regras de produção (*v.* seção 3.3.2), *i.e.*, pares de expressões simbólicas consistindo em uma condição e uma ação correspondente (BITTENCOURT, 2001).

Na medida em que um SE procurou emular a habilidade de tomada de decisão de um Especialista Humano (EH), historicamente foi desenvolvida uma arquitetura computacional básica que compreende os processos e entidades diretamente relacionadas ao raciocínio e memória humanos. A Figura 3.1 ilustra estes elementos, quais sejam:

- a) **Memória de trabalho**, correspondente à memória de curto prazo humana, nada mais é do que um espaço físico da memória RAM que pode armazenar dados, fatos e instâncias de objetos relativos ao problema sob análise, dependendo do método de representação de conhecimento adotado ou disponibilizado pelo SE;
- b) **Base de regras**, correspondente ao conhecimento adquirido pela formação e pela vivência profissional do EH na área, *i.e.*, sua memória de longo prazo, que contém condições que representam “perguntas” à memória de trabalho. É nesse elemento que se encontram explicitadas as relações causais que permitem o encadeamento de regras até a solução do problema;
- c) **Motor de inferência** é o mecanismo de controle do sistema, assim como o raciocínio humano, que decide quais regras são satisfeitas pelos fatos ou objetos do problema, mantém uma agenda com uma lista ordenada de regras satisfeitas

(ativadas), efetua o disparo dessas regras conforme sua prioridade e atualiza os fatos sobre o problema que vão ser examinados no próximo ciclo.

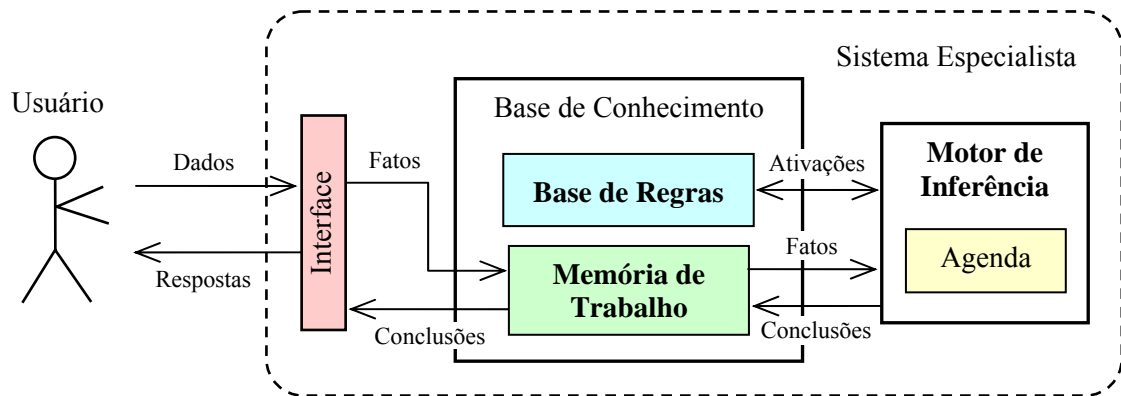


Figura 3.1 - Estrutura de um SE baseado em regras de produção.  
Fonte: adaptado de BITTENCOURT, 2001.

Em qualquer tipo de *software*, a interface com o usuário final é fundamental para o seu sucesso. Em particular, um SE, além de apresentar uma interface ergonomicamente bem projetada, deve ainda levar em conta o grau de familiarização do usuário com o domínio de trabalho do sistema e com os computadores em geral. Algumas técnicas tornam a interface com o usuário mais amigável, por exemplo, o uso de janelas, menus, gráficos de alta resolução, imagens, animações, cores, etc. De todo o modo, as telas a serem apresentadas ao usuário devem ser de fácil compreensão, e as explicações necessárias devem ser claras e diretas (BITTENCOURT, 2001). A capacidade de explicação, aliás, é uma das características mais peculiares de SE's que os diferenciam dos demais sistemas de apoio à tomada de decisão, e também, muito importante do ponto de vista da validação da base de conhecimento e dos resultados gerados do SE, embora na prática sua implementação seja opcional.

Com o sucesso comercial dos SE's nos anos 80, principalmente deflagrado pelo sistema XCON/R1 da DEC (*Digital Equipment Corporation*) para a configuração de seus computadores VAX, e pelo PROSPECTOR para a análise das possibilidades de se encontrar tipos específicos de depósitos minerais em uma dada área, se mostrou ser possível obter alta lucratividade com o seu desenvolvimento (GIARRATANO; RILEY, 1994). No entanto, para que os SE's ganhassem maior atenção da indústria era necessário ainda tornar o seu desenvolvimento mais simples e menos laborioso. Nessa época, percebeu-se que muito do que havia sido implementado em SE's bem sucedidos poderia ser reaproveitado, evitando assim que cada SE precisasse ser inteiramente construído desde o seu projeto conceitual. Com isso

poder-se-ia reduzir consideravelmente o tempo de desenvolvimento, a quantidade de mão-de-obra especializada e o número de erros de codificação.

O sistema MYCIN, um dos primeiros SE's que obtiveram sucesso em seus objetivos, foi muito importante para a tecnologia dos SE's por vários motivos. Dentre outros, além de demonstrar que a IA podia ser usada em problemas práticos do mundo real, ele demonstrou a viabilidade dos arcabouços de SE's, mais conhecidos como *shells*, pois esse sistema foi o primeiro a separar explicitamente a base de conhecimento do motor de inferência (GIARRATANO; RILEY, 1994). O *shell* derivado do MYCIN foi chamado EMYCIN (*Essential* ou *Empty* MYCIN) e foi obtido pela subtração do conhecimento médico de sua base. Com isso, tornou-se possível o reuso de todas as suas funcionalidades, restando ao programador apenas codificar o conhecimento especializado sobre o domínio do seu problema particular. O desenvolvimento de arcabouços de SE's facilitou enormemente a implementação de novos SE's e foi, certamente, um dos principais fatores responsáveis por sua disseminação (BITTENCOURT, 2001).

### 3.2 MODELOS E FASES DE DESENVOLVIMENTO DE UM SE

O processo de construção/desenvolvimento de um SE é chamado de engenharia de conhecimento e envolve, tipicamente, uma forma especial de interação entre o desenvolvedor do SE, chamado Engenheiro de Conhecimento (EC), e um ou mais EH's em um problema específico de uma área ou domínio de conhecimento (Figura 3.2). O EC é o responsável por elicitare, *i.e.*, extrair o conhecimento tácito – que se encontra implícito na mente do EH sob a forma de procedimentos, estratégias e regras empíricas, também conhecidas como heurísticas – utilizado pelos EH's na resolução de problemas, e também, por implementar esse e outros tipos de conhecimento necessários ao desenvolvimento de um SE (WATERMAN, 1986).

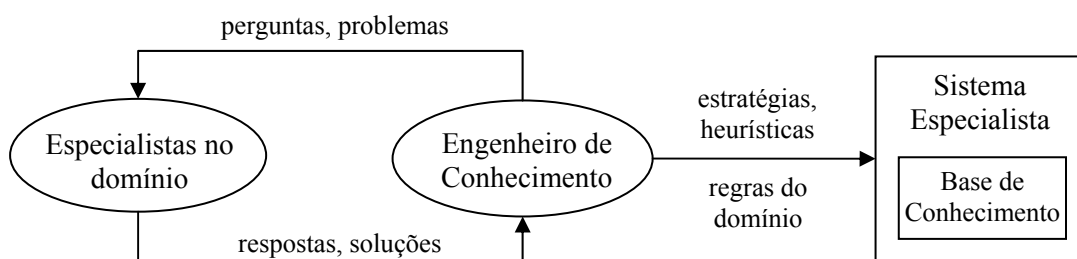


Figura 3.2 - Esquema de interação entre o EC e o especialista no domínio do problema.  
Fonte: WATERMAN, 1986.

O EH é um profissional que usa o seu conhecimento para resolver problemas específicos com uma taxa aceitável de sucesso, muitas vezes podendo resolvê-los de forma rápida e eficiente. Com sua habilidade de obter *insights* sobre o problema, eles podem rapidamente determinar as informações mais relevantes e deduzir as soluções mais prováveis. Entretanto, os EH's não são meramente pessoas que conhecem muitas relações entre fatos e procedimentos. Parte do seu conhecimento adquirido ao longo dos anos foi obtida através de experiências particulares que não podem ser encontradas em um livro ou em um manual de regras e procedimentos. Eles frequentemente fazem julgamentos baseados na intuição, e é mais do que provável que eles jamais tenham declarado explicitamente como eles fazem esses julgamentos e tomam suas decisões (HART, 1992).

Uma vez comprovada a aplicabilidade da tecnologia de SE's para um problema identificado cuja solução seja de natureza predominantemente heurística e que exija, portanto, a análise de um EH cuja disponibilidade seja suficientemente limitada, pode-se dar início ao processo de desenvolvimento do SE. Evidentemente, é necessário, antes de mais nada, que haja o interesse e o apoio da gerência a esse tipo de projeto, já que muitos recursos serão envolvidos na sua construção. Para tanto, é preciso avaliar os custos com ferramentas de desenvolvimento e operação do SE, comprometimento de tempo dos EH's necessário ao processo de aquisição de conhecimento, treinamento dos usuários, etc., para se determinar o retorno de investimento que o projeto de um SE trará à organização.

Concluído o estudo de viabilidade do SE junto à gerência da empresa interessada no projeto, passa-se para o processo de desenvolvimento do SE que é composto normalmente de quatro grandes fases: aquisição, representação, implementação e verificação e validação (V&V) do conhecimento. O tempo que cada uma dessas etapas levará para ser concluída e a seqüência na qual serão executadas dependerá do modelo de desenvolvimento adotado, também conhecido como modelo do ciclo de vida.

O modelo cachoeira (do inglês, *waterfall*) foi o primeiro a ser adotado assim que se percebeu as limitações do método codifica-e-corrige utilizado atualmente somente por novos programadores estudantes de engenharia de *software* e SE. Esse modelo é bastante familiar aos programadores de sistemas convencionais. Nele, cada estágio de desenvolvimento termina com a V&V das tarefas executadas, devendo haver uma ou mais iterações entre fases adjacentes para minimizar os problemas no estágio seguinte do processo. O modelo incremental é o primeiro refinamento do modelo cachoeira. A idéia básica desse modelo é

desenvolver o sistema em incrementos da sua capacidade funcional, pois assim tornam-se mais fáceis as tarefas de teste e V&V, já que é possível realizar o ciclo completo de desenvolvimento do sistema em parcelas. Dessa forma, reduzem-se os custos incorridos por erros e correções das etapas anteriores. Ao invés de implementar um protótipo apenas para determinar os requisitos do futuro sistema, a evolução do protótipo é o próprio sistema (GIARRATANO; RILEY, 1994).

Há outros modelos mais formais como o modelo espiral de Boehm ou o espiral/cônico de Alonso (ALONSO *et al.*, 2000), mais adequados para grandes sistemas, mas que são na verdade variações do modelo incremental com algumas evoluções metodológicas. Neste trabalho, pelos objetivos que o protótipo se propõe a alcançar, foi adotado o modelo incremental para o seu desenvolvimento.

### 3.2.1 Aquisição de Conhecimento

Para Bittencourt (2001), a parte mais sensível e difícil no desenvolvimento de um SE é, certamente, a aquisição de conhecimento, pois não basta apenas adicionar novos elementos de conhecimento à base de conhecimento; é necessário integrar o novo conhecimento àquele já disponível e/ou implementado através da definição das suas relações. Entretanto, os problemas mais comumente citados no desenvolvimento de SE são a indisponibilidade dos EH's, assim como, as dificuldades relativas ao processo de extração de regras. Esse é o chamado “problema da aquisição de conhecimento” e em muitos trabalhos tem sido apontado como o principal gargalo do processo de desenvolvimento de SE's (HART, 1992; WAGNER *et al.*, 2002; VINADÉ, 2003; CALETTI, 2003; STARR, 2006).

A questão é, portanto, como eficientemente adquirir conhecimento especializado sobre o domínio de um problema bem definido de um ou mais EH's, e representá-lo apropriadamente num SE. Adelman (*apud* WAGNER *et al.* 2002) foi um dos primeiros a realizar experimentos para comparar objetivamente a efetividade de diferentes técnicas de aquisição de conhecimento. Ele identificou cinco fatores determinantes da qualidade da base de conhecimento resultante, quais sejam:

- a) Especialistas no domínio;
- b) Engenheiros de conhecimento;
- c) Métodos de representação de conhecimento;

- d) Métodos de extração de conhecimento;
- e) Domínio do problema.

Segundo Wagner *et al.* (2002), a taxonomia mais comumente utilizada na classificação dos domínios de problemas de SE's é aquela que os divide nas categorias de análise, síntese e uma combinação das anteriores. Essa taxonomia pode ser visualizada no Quadro 3.1.

---

#### **Problemas de Análise**

- Classificação – categorização baseada em fatos observáveis.
- Diagnóstico – inferência de mau funcionamento do sistema baseada em fatos observáveis.
- Depuração/Solução de Problemas – prescrição de ações corretivas para mau funcionamento.
- Interpretação – inferência de descrições da situação baseada em dados de sensores.

---

#### **Problemas de Síntese**

- Configuração – configuração de coleções de objetos sob restrições em espaços de procura relativamente pequenos.
- Projeto – configuração de coleções de objetos sob restrições em espaços de procura relativamente grandes.
- Planejamento – projetando ações.
- Agendamento – planejando com fortes restrições de tempo e/ou espaço.

---

#### **Problemas combinados de Análise e Síntese**

- Comando e Controle – ordenando e governando o controle total do sistema.
  - Instrução – diagnóstico, depuração e correção do comportamento do estudante.
  - Monitoramento – comparando observações e saídas esperadas.
  - Predição/Prognóstico – inferência de conseqüências prováveis para situações dadas.
  - Conserto/Reparo – execução de planos para administrar medidas/ações corretivas.
- 

Quadro 3.1 - Taxonomia dos domínios de problemas genéricos de SE's.  
 Fonte: WAGNER et al., 2002, tradução nossa.

Estritamente, a extração de conhecimento deveria ser vista como uma fase do processo de aquisição de conhecimento. Entretanto, a própria literatura científica utiliza os dois termos intercambiavelmente. O papel que o EC exercerá no processo de aquisição de conhecimento variará consideravelmente dependendo do método ou técnica particularmente utilizada na extração de conhecimento. Em alguns casos, pode ser apropriado ao EC se tornar um aprendiz do EH ou participar de alguma forma do processo real de solução do problema. Outras vezes pode ser melhor para o EC conduzir uma entrevista não-estruturada ou simplesmente observar o EH executar uma dada tarefa (WAGNER *et al.*, 2002).

Os métodos de extração de conhecimento mais comumente citados são: entrevistas não-estruturadas, entrevistas estruturadas, análise de protocolo e escalonamento psicológico (WAGNER *et al.*, 2002). Muitas dessas técnicas foram desenvolvidas especialmente para os diferentes tipos de domínio do problema ou foram adaptadas de pesquisas existentes em outros campos como o da psicologia, sendo que cada uma delas possui vantagens e

desvantagens. Elas não só requerem uma grande quantidade de tempo e trabalho do EC e do EH no domínio como necessitam que o EC possua uma série de habilidades de entrevista e de representação de conhecimento para que elas sejam bem sucedidas. Isso sem falar da sua capacidade de empreender esforços para manter o interesse e lidar com os diferentes traços de personalidade ou perfis de comportamento de um EH.

As técnicas de aquisição de conhecimento para a extração direta de conhecimento do EH não serão tratadas aqui, já que a aplicação delas neste trabalho foi bastante restrita. Como a maior parte da aquisição de conhecimento foi obtida de livros e documentação técnica, o desenvolvimento de um protótipo, que segundo Silva (1998) é um método de aquisição de conhecimento que possibilita um aprendizado inicial sobre o domínio de conhecimento considerado, foi o método principal utilizado neste trabalho devido ao fato do EH ter participado mais na avaliação do protótipo, servindo assim como aquisição de conhecimento para outras versões. Ainda assim, é interessante ressaltar que existe uma vasta literatura sobre a aquisição de conhecimento sendo que os trabalhos de Wagner *et al.* (2002) e Wagner *et al.* (2003) fazem uma boa revisão do assunto e referenciam diversas obras e artigos de outros pesquisadores.

### 3.2.2 Representação do Conhecimento

Os SE's são também conhecidos como sistemas baseados em conhecimento, embora muitos autores defendam que estes são mais abrangentes que aqueles. Entretanto, nos sistemas baseados em conhecimento não há a necessidade de haver conhecimento especializado sobre um domínio específico adquirido de um EH. Como essa discussão está fora do escopo deste trabalho, importa mais saber por que esses sistemas são ditos “baseados em conhecimento”, diferentemente de sistemas convencionais que são baseados em procedimentos. Starr (2006) apresenta uma distinção interessante entre dados, informação e conhecimento:

- a) **Dados** são sinais não interpretados. Por exemplo, uma medida qualquer relacionada a um processo é um dado;
- b) **Informação** é um dado com significado. Assim, saber que uma determinada medida do processo corresponde à pressão de sucção do compressor é uma informação, ou seja, o saber do significado do dado faz com que ele carregue informação;

- c) **Conhecimento** é o conjunto total de dados e informações dos quais as pessoas fazem uso prático em ações, para levar a cabo tarefas e criar mais informação. Sendo assim, o conhecimento tem dois aspectos distintos: primeiramente, um senso de propósito, pois o conhecimento faz parte do maquinário intelectual para atingir alguma meta; em segundo lugar, uma capacidade de gerar mais informação. Por exemplo, saber se a pressão de sucção do compressor está baixa ou alta é um tipo de conhecimento sobre o processo de compressão que pode desencadear outras conclusões a seu respeito, ou seja, gerar mais informação e/ou conhecimento.

Como na prática essa distinção nem sempre é clara, cabe ao EC buscar uma delimitação ou separação organizada entre o que é dado, informação ou conhecimento dentro dos possíveis contextos do problema, através do uso adequado das técnicas de representação e da ferramenta de desenvolvimento escolhidas, com o intuito de torná-los menos difusos e mais modulares. Isto facilitará a expansão do sistema, com a adição de novos elementos de conhecimento sobre o domínio, e mesmo a modificação, manutenção e documentação do SE.

Como a idéia desta seção é apresentar de forma geral as fases de desenvolvimento de SE's, a apresentação mais detalhada dos métodos ou técnicas de representação de conhecimento será feita na seção 3.3, já que ela é fundamental para a descrição do protótipo gerado neste trabalho. Não obstante, essa distinção inicial é importante para que fique claro que a natureza do conhecimento é inerentemente dependente do contexto da sua utilização.

### 3.2.3 Implementação do Conhecimento

A fase de implementação corresponde à codificação do conhecimento adquirido para o desenvolvimento do SE. É nessa etapa que se escolhe uma ferramenta de desenvolvimento. Na década de 80, quando a tecnologia de SE's deixou de ser exclusiva dos ambientes de pesquisa, de onde derivaram algumas aplicações industriais que atingiram um significativo sucesso comercial, a maioria dos sistemas desenvolvidos eram únicos e altamente dependentes da experiência dos seus desenvolvedores que, frequentemente, eram oriundos de parcerias com instituições de pesquisa conceituadas como a Universidade de Carnegie Mellon. Esses SE's eram desenvolvidos em linguagens de programação como LISP e PROLOG.



O amadurecimento da tecnologia de SE's deu origem aos chamados arcabouços de SE's (*shells*) que simplificaram a sua construção e manutenção, conforme foi comentado na seção 3.1. Nos anos 90, muitas ferramentas para SE's já se encontravam disponíveis, o que por um lado facilitou a vida dos desenvolvedores, mas por outro, complicou ainda mais a seleção da ferramenta mais adequada para um determinado problema.

Mettrey (1991) compara em seu artigo cinco ferramentas *shell* amplamente utilizadas: ART-IM, CLIPS, KES, Level 5 e VAX OPS5, onde as analisa quanto a sua funcionalidade, performance, vantagens e desvantagens. Elas possuem em comum a característica de serem escritas em outras linguagens diferentes de LISP, o que reflete uma necessidade industrial por ferramentas que possuam uma maior portabilidade e que suportem uma interface com sistemas convencionais. Neste trabalho, Mettrey avalia as particularidades funcionais de cada *shell* e depois compara implementações e realiza análises temporais na forma de um *benchmark* de performance. A conclusão é idêntica àquilo que a literatura apresenta quase que consensualmente: toda ferramenta possui pontos fortes e pontos fracos e, portanto, a escolha dessa sempre dependerá da natureza do domínio do problema, *i.e.*, se esse problema é predominantemente de análise ou de síntese.

Neste trabalho, optou-se pelo uso do CLIPS, principalmente em virtude da experiência de outros trabalhos anteriores no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, tais como: Silva (1998), Alves (2001), Borges, (2002), Vinadé (2003), Caletti (2003), Passos (2005), Starr (2006), entre outros. Além disso, o CLIPS foi o sistema *shell* escolhido para o desenvolvimento do projeto SEGRED (Sistema Especialista para Gerenciamento de Redes de Gás Natural) originário de uma parceria entre o LASHIP/UFSC, a TBG, a SCGÁS e a Petrobras. Esse é um projeto de grande porte que integra técnicas de SE's e de simulação do comportamento dinâmico de gases com base em agentes inteligentes, visando o desenvolvimento de um sistema computacional para auxílio na atividade de monitoramento de redes de transporte de gás natural. Ele deu origem a uma série de trabalhos na linha de SE's voltados à área de transporte de gás natural como Silva Jr. e Silva (2002), Silva e Porciúncula (2003), Starr (2006) e inclusive Silva *et al.* (2004) que apresenta o projeto SECOMP (Sistema Especialista para Manutenção de Compressores), o qual deu origem a este trabalho de mestrado.

O CLIPS (*C Language Integrated Production System*) é uma linguagem e um ambiente de execução que foi desenvolvido pela NASA no *Lyndon B. Johnson Space Center*

em 1984, para o desenvolvimento de SE's. O CLIPS é escrito na linguagem C para suportar os objetivos de alta portabilidade, baixo custo e fácil integração com sistemas externos. Apesar do paradigma de programação inicial da linguagem ser um sistema de produção utilizando o algoritmo *Rete* (v. seção 3.3.2), durante o desenvolvimento da linguagem foram incluídos mais dois paradigmas: programação procedural, como a encontrada em linguagens como C e FORTRAN, e programação orientada a objetos.

O CLIPS é uma linguagem madura e bem adaptada para o desenvolvimento de SE's, embora apresente algumas deficiências em relação a análises numéricas. Como um ambiente de desenvolvimento, o CLIPS apresenta as seguintes vantagens (STARR, 2006):

- a) Código de domínio público cuja linguagem está bem documentada, contando com uma comunidade de usuários ativa, o que torna o seu desenvolvimento confiável, barato e permite a criação de extensões personalizadas da linguagem;
- b) Sistema de produção rápido e confiável. Devido ao longo tempo de desenvolvimento e à grande comunidade de usuários, praticamente não existem erros no algoritmo de inferência;
- c) Linguagem de orientação a objetos bem integrada com o mecanismo de inferência e com muitos recursos.

No entanto, o CLIPS, como linguagem, apresenta as seguintes desvantagens (STARR, 2006):

- a) Biblioteca de funções e estruturas de dados relativamente pobre, com dificuldade para criar algumas estruturas de dados, como listas aninhadas e mapas associativos;
- b) Falta de um mecanismo para separar estruturas de dados que devem ser consideradas como representação de conhecimento e resultado de inferências de estruturas auxiliares. Do modo como a linguagem foi projetada, todas as estruturas de dados são consideradas como representação de conhecimento;
- c) Ausência de algumas estruturas utilizadas em programação funcional, como as encontradas nos vários dialetos de LISP e em Haskell. Entre essas estruturas estão as funções anônimas (funções lambda) e a utilização de funções como argumentos para outras funções, como membros de listas ou mapas associativos, etc.

#### 3.2.4 Verificação e Validação

Essa etapa completa o ciclo de desenvolvimento de um SE, e sua conclusão, exceto no modelo cachoeira, dá início ao próximo ciclo de desenvolvimento incremental ou espiral do SE. Ela é composta, como o próprio nome diz, de duas subfases: a verificação e a validação. Essa é uma característica peculiar de SE's, pois num sistema convencional, desde que seus requisitos tenham sido corretamente especificados, não existe a necessidade de validar o *software*.

Similarmente aos métodos tradicionais, a verificação do sistema tem por objetivo assegurar que o que foi especificado é o que o sistema realmente executa. Nesse caso, deve ser verificada a adequação dos métodos empregados na implementação do conhecimento (paradigmas de representação de conhecimento e tipo de encadeamento de regras adotados) e a qualidade do SE baseada em métricas de *software* tangíveis como: modularidade, portabilidade, performance, expansibilidade, manutenibilidade, adequação da interface com o usuário, entre outras. Além disso, o SE deve ser verificado quanto à existência de erros de sintaxe e/ou de semântica na base de conhecimento, eliminando-se possíveis *bugs* e inconsistências das regras implementadas como: regras redundantes, conflitantes, circulares, perdidas, inatingíveis, etc. (SILVA, 2004).

A validação do sistema é uma tarefa eminentemente mais complexa que a verificação, pois envolve a determinação da eficácia final do sistema com relação às necessidades do usuário. O usuário final necessita de resultados e orientações corretas, completas e confiáveis do SE, pelo menos no mesmo nível de precisão que um EH forneceria. Nessa fase, o EH possui um papel fundamental na avaliação do protótipo já que é ele quem conhece de fato a natureza do problema e, por conseguinte, quem é capaz de julgar a consistência dos resultados gerados e a qualidade das respostas e explicações fornecidas pelo SE. Normalmente, o EH deve avaliar o sistema em etapas, validando os incrementos funcionais e módulos parciais do SE. É interessante prever a capacidade de interromper o encadeamento de regras durante a execução dos testes para avaliar os resultados intermediários, facilitando a análise das inferências parciais realizadas pelo SE.

O EC deve preparar testes formais de validação com casos clássicos ou bem conhecidos e cujos resultados tenham sido obtidos por EH's de forma mais ou menos consensual. Somente o processo de validação garante que a utilidade fim do SE foi ou está sendo atingida e que, portanto, a continuidade do investimento na construção do SE é justificável. A literatura recomenda que os EH's que participaram do processo de aquisição de

conhecimento não sejam os próprios avaliadores do sistema, embora muitas vezes essa situação não seja viável. Nesse caso, e havendo mais de uma fonte humana de conhecimento, cabe ao EC decidir quem participará mais de uma etapa do desenvolvimento ou de outra, baseado na disponibilidade, competência, acessibilidade, etc., de cada EH.

### 3.3 MÉTODOS DE REPRESENTAÇÃO E MANIPULAÇÃO DE CONHECIMENTO

Até o fim dos anos 80 se acreditava que o desenvolvimento de SE's era eminentemente um processo de transferência do conhecimento humano para a base de conhecimento do SE. Como uma base de conhecimento era normalmente construída de regras de produção, já que o seu formalismo simples, intuitivo e modular era amplamente aceito como o método mais adequado para a representação de conhecimento especializado, assumia-se o pressuposto de que o conhecimento especializado precisava apenas ser coletado e implementado num SE via extração de regras. Com o crescimento e expansão da tecnologia de SE's, mostrou-se que as regras de produção eram utilizadas para representar diferentes tipos de conhecimento. Por exemplo, as informações sobre a ordem em que as metas devem ser atingidas estavam combinadas com informações específicas do domínio de conhecimento. Essa mistura de tipos de conhecimento tornava a manutenção da base de conhecimento bastante difícil e trabalhosa (STUDER *et al.*, 1998).

Atualmente, há um consenso geral que, para desenvolver um SE expansível e manutenível, é preciso desenvolver um modelo computacional baseado em estruturas de dados versáteis e poderosas, como classes e instâncias de objetos, listas aninhadas, etc., que permitam a organização do conhecimento de forma modular e reutilizável, com capacidades de resolução de problemas comparáveis a de um EH; e não mais apenas um modelo ou método de representação que simplesmente produza resultados similares aos do EH. Assim, o foco do processo de aquisição de conhecimento passou a ser esse processo de construção de um modelo de representação do domínio do problema associado a mecanismos adaptados à manipulação dessas estruturas de dados e entidades portadoras de informação (ALMEIDA JR., 2003; CASTILLO, 2003; STARR, 2006).

Historicamente, o foco da comunidade de IA tem oscilado entre dois assuntos: as teorias de conteúdo e as teorias de mecanismo. As teorias de conteúdo versam sobre o modo como o conhecimento pode ser representado em um programa e as teorias de mecanismo determinam o modo como novas conclusões podem ser obtidas a partir do conhecimento

representado. Sem dúvida, essa separação nem sempre é clara, sendo que alguns mecanismos de inferência funcionam melhor com algumas técnicas de representação e vice-versa. Contudo, essa divisão é útil, pois permite considerar diferentes métodos de representação e mecanismos como possíveis componentes do sistema, cada um com suas vantagens e desvantagens. Pode-se então selecionar o componente mais adequado, ou a combinação mais adequada de componentes para a solução do problema (STARR, 2006).

Nesta seção serão discutidas as teorias de conteúdo clássicas que foram utilizadas neste trabalho: ontologias, redes semânticas e quadros. Na prática, elas foram implementadas através do módulo de orientação a objetos do CLIPS: o COOL (*CLIPS Object-Oriented Language*), por isso alguns aspectos desse paradigma de programação também serão discutidos quando a relação entre os métodos for oportunamente identificada no texto. As teorias de mecanismos utilizadas são: regras de produção e o modelo de Dempster-Shafer para o tratamento da incerteza. Obviamente, essa separação por teorias é apenas uma forma didática de apresentar as técnicas de representação e manipulação de conhecimento já que na prática dificilmente é possível definir e separar explicitamente um método do outro.

### 3.3.1 Ontologias, Redes Semânticas e Quadros

Ontologia (do grego *ontos* + *logos* = “conhecimento do ser”) é a parte da filosofia que trata da natureza do ser, da realidade e da existência dos entes (WIKIPEDIA, 2007). Ela considera os seres concebidos como tendo uma natureza comum que é inerente a todos e cada um dos seres (FERREIRA, 1999). Ou seja, mais sinteticamente expressando, é a parte da filosofia que trata dos seres e objetos conhecidos e cognoscíveis. Em IA, ontologias descrevem, formalmente, conceitos sobre objetos e suas relações em um domínio de conhecimento que podem ser utilizados pelos programas. Assim, uma ontologia define tanto um vocabulário de representação quanto um corpo de conhecimento descrevendo algum domínio específico (CHANDRASEKARAN *et al.*, 1999).

O método de representação de conhecimento por ontologias popularizou-se no início dos anos 90, devido em boa parte àquilo que elas prometiam: um entendimento comum e consensual sobre as estruturas de conhecimento que compõem um domínio que pode ser compartilhado entre pessoas e computadores. A motivação principal para o uso de ontologias é, portanto, que elas permitem o compartilhamento e a reutilização de conhecimento (STUDER *et al.*, 1998). Em termos de método de representação de conhecimento essa é uma

qualidade bastante desejável do ponto de vista da manutenção, expansão e documentação de um SE.

A Figura 3.3 ilustra uma ontologia simples apresentada como uma taxonomia do tipo especialização combinada a uma rede semântica. Nela os arcos tracejados representam relações do tipo “é-um” e, os arcos cheios, relações do tipo “composto-por”. Os nodos representam classes ou tipos de máquinas. As caixas (nodos) mais superiores representam classes de objetos mais abstratas como “máquinas”, enquanto as caixas inferiores representam tipos mais específicos (também chamados instâncias de objetos) como “compressor centrífugo”, “motor turbo”, “compressor axial”, etc.

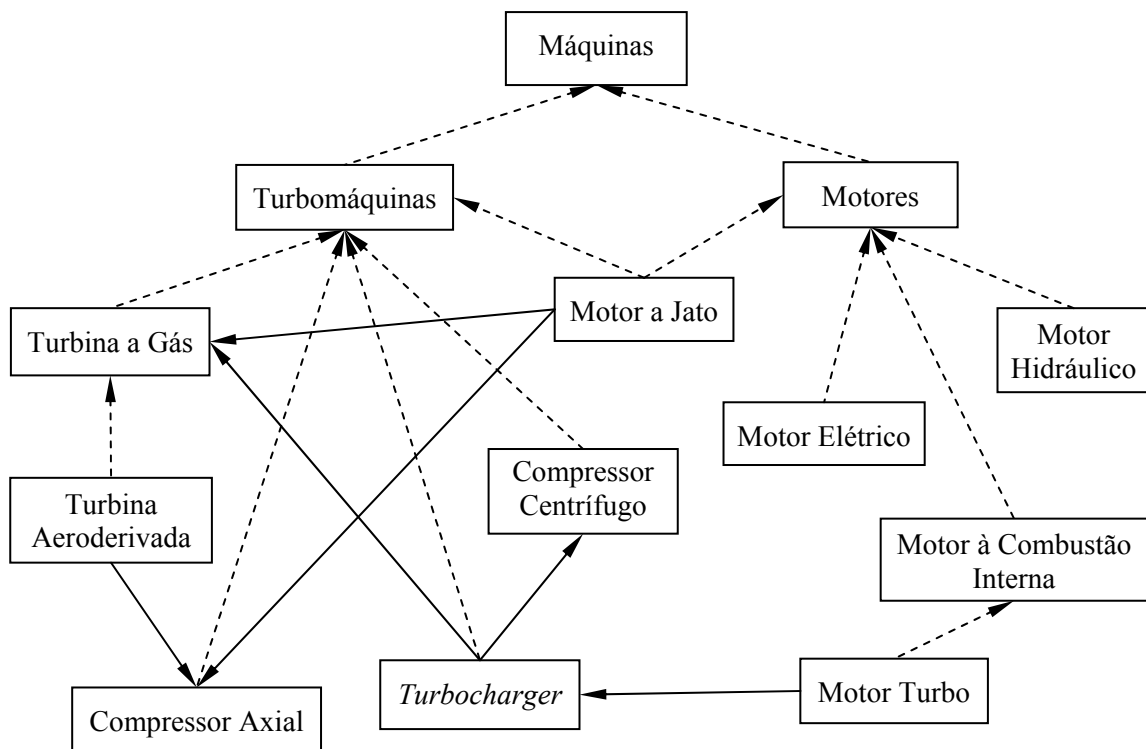


Figura 3.3 - Exemplo de uma ontologia de máquinas de potência mecânica com relações do tipo “é-um” (setas tracejadas) e relações do tipo “composto-por” (setas contínuas) que se caracteriza por uma rede semântica de classes e instâncias de objetos possíveis nesse domínio. Fonte: do Autor.

Para Gruber (1993), ontologia é uma especificação explícita de uma conceitualização. Conceitualização é uma visão simplificada e abstrata do mundo que se deseja representar para algum propósito. Quando o conhecimento de um domínio é representado por um formalismo declarativo, o conjunto dos objetos que podem ser representados é chamado universo de discurso. Esse conjunto de objetos, e as relações descritíveis entre eles, são refletidos no vocabulário representativo com o qual o sistema baseado em conhecimento implementa

computacionalmente esse conhecimento. Dessa forma, no contexto da IA, pode-se descrever a ontologia de um programa pela definição de um conjunto de termos representativos. Nessa ontologia, definições associam nomes de entidades num universo de discurso (*e.g.*, classes, relações, funções, ou outros objetos) com textos legíveis descrevendo o que os nomes significam, e axiomas formais que restringem a interpretação e o bom uso desses termos. Portanto, formalmente, uma ontologia é a declaração de uma teoria lógica (GRUBER, 1993).

Depreende-se dessa definição que a implementação de uma ontologia faz uso de várias técnicas de representação como orientação a objeto, programação procedural, lógicas, dentre outras. Redes semânticas e quadros são os dois principais métodos de representação de conhecimento que implementam uma ontologia, no sentido em que eles desenvolveram o formalismo lógico da representação do significado dos objetos de um domínio, seus atributos e relacionamentos. Linguagens típicas de IA que podem ser usadas para implementar ontologias são as “lógicas de descrição” criadas para representar conhecimento declarativo (STUDER *et al.*, 1998; NARDI; BRACHMANN, 2003).

A ontologia, portanto, fornece a base epistemológica da representação de conhecimento no sentido semântico, enquanto uma lógica de descrição ou um modelo orientado a objetos fornecem a base lingüística dessa mesma representação no sentido sintático, implementando classes de objetos através de propriedades representativas como abstração e herança de atributos, assim como o formalismo dos seus relacionamentos através, por exemplo, numa linguagem orientada a objetos, do encapsulamento de atributos e a definição do vocabulário de métodos de uma classe através da propriedade de polimorfismo (SILVA, 1998).

A primeira vez em que as redes semânticas foram propostas como um método de representação de conhecimento em IA foi em meados dos anos 60, quando Quillian (1968 *apud* LEHMANN, 1992; BITTENCOURT, 2001) propôs um modelo computacional da memória humana chamado “memória semântica” com o objetivo de caracterizar, por meio de estruturas cognitivas em forma de rede, o conhecimento e raciocínio humanos. Uma rede semântica é um método de representação de conhecimento utilizado para definir ou integrar um conjunto heterogêneo de objetos ou sistemas. Ela consiste em um conjunto de nodos conectados por um conjunto de arcos (*v.* Figura 3.3). Os nodos, em geral, representam objetos e os arcos, relações binárias entre esses objetos. Entretanto, os nodos podem também ser utilizados para representar predicados, classes, palavras de uma linguagem, entre outras

possíveis interpretações, dependendo do sistema de redes semânticas em questão (BITTENCOURT, 2001).

Os quadros (*frames*) foram propostos e introduzidos por Marvin Minsky em 1975 para permitir a expressão das estruturas internas dos objetos, mantendo a possibilidade de representar herança de propriedades como nas redes semânticas. Em geral, um quadro consiste em um conjunto de atributos (*slots*) que, através de seus valores, descrevem as características do objeto representado pelo quadro. Os valores atribuídos a esses atributos podem ser outros quadros, criando uma rede de dependências entre os quadros de uma ontologia, por exemplo. Os atributos também apresentam propriedades, que dizem respeito ao tipo de valores e às restrições de número que podem ser associados a cada atributo. Essas propriedades são chamadas “facetas”. Outra idéia comum aos sistemas baseados em quadros é o raciocínio padrão onde os seus atributos podem ter valores típicos definidos *a priori*, os chamados “valores de exceção” (do inglês, *default values*). Para o processo de raciocínio, saber o que procurar para completar a informação necessária (e caso essa não esteja disponível) pode ser fundamental para a eficiência do processo de reconhecimento de uma situação complexa. O método de quadros também está na origem das idéias que levaram às linguagens de programação orientadas a objetos (BITTENCOURT, 2001).

As lógicas de descrição, assim como as ontologias no contexto da engenharia de conhecimento, são baseadas em redes semânticas e quadros. Como foi visto, as redes semânticas dizem respeito à noção de estrutura hierárquica e relações entre diferentes entidades e objetos, enquanto os quadros acrescentam uma estrutura de atributos e restrições de valores, proporcionando, respectivamente, facilidade e riqueza de representação desses objetos. A ontologia diz mais respeito a “o quê” representar, enquanto que as lógicas de descrição provêm uma sintaxe declarativa formal para a implementação desses métodos, mostrando que suas estruturas de representação podem ser equipadas com ferramentas eficientes de raciocínio (NARDI; BRACHMANN, 2003).

### 3.3.2 Regras de Produção

As regras de produção são do tipo: “Se LHS Então RHS”, onde LHS (*left hand side*) contém condições (antecedentes) como fatos ou objetos e RHS (*right hand side*) contém ações (conseqüentes) que resultam em novos fatos ou objetos que darão seqüência ao encadeamento de regras. O esquema geral de funcionamento de um SE baseado em regras de produção foi



descrito na Figura 3.1, apresentada na primeira seção deste capítulo. A seguir, apresenta-se um exemplo de uma regra de produção simples de um sistema de monitoramento de compressores de grande porte em pseudocódigo. Um exemplo mais complexo é apresentado em Kubiak *et al.* (2002) para um caso aplicado ao diagnóstico de falhas em turbinas a gás.

```
SE a rotação do compressor é maior que zero
E a temperatura do mancal axial é maior que 120°C
ENTÃO disparar alarme de sobre temperatura do mancal axial
```

Num SE baseado em regras de produção, existem basicamente dois modos de raciocínio possíveis associados ao motor de inferência: “encadeamento direto ou progressivo” (do inglês, *forward chaining*) e o “encadeamento reverso ou regressivo” (do inglês, *backward chaining*). Em geral os arcabouços de SE’s (*shells*) adotam apenas um modo de raciocínio. No entanto, existem alguns que permitem ambos os modos, mas de maneira independente, e ainda outros que permitem um “encadeamento misto”, onde os encadeamentos direto e reverso se alternam de acordo com o desenvolvimento da solução do problema e com a disponibilidade de dados (BITTENCOURT, 2001).

No encadeamento direto, o lado esquerdo da regra é comparado com os dados ou fatos que descrevem a situação atual contidos na memória de trabalho da mesma forma como foi descrita anteriormente. Assim, as regras que satisfazem os dados e fatos iniciais têm sua parte direita executada, o que, em geral, significa a introdução de novos fatos na memória de trabalho (BITTENCOURT, 2001). Esse modo de raciocínio é, geralmente, associado a domínios de problemas do tipo síntese (v. Quadro 3.1), por isso é dito encadeamento “dirigido por dados”, pois se deseja chegar a uma solução dentre algumas possíveis.

No encadeamento reverso o comportamento do sistema é controlado por uma lista de objetivos potenciais ou hipóteses possíveis, buscando-se fatos que suportem os objetivos a serem alcançados ou as hipóteses a serem provadas. Um objetivo pode ser satisfeito diretamente por um elemento da memória de trabalho, ou podem existir regras que permitam inferir algum dos objetivos correntes, *i.e.*, regras que contenham uma descrição desse objetivo em seus lados direitos. As regras que satisfazem essa condição têm as instâncias correspondentes aos seus lados esquerdos adicionadas à lista de objetivos correntes. Caso uma dessas regras tenha todas as suas condições satisfeitas diretamente pela memória de trabalho, o objetivo em sua parte direita é também adicionado à memória de trabalho. Um objetivo que não possa ser satisfeito diretamente pela memória de trabalho, nem inferido através de uma regra, é abandonado. Quando o objetivo inicial é satisfeito, ou não há mais objetivos, o

processo termina (BITTENCOURT, 2001). Esse modo de raciocínio é, geralmente, associado a domínios de problemas do tipo análise (v. Quadro 3.1), sendo, por isso, também chamado encadeamento “dirigido por objetivos”.

Quando muitas regras devem ser verificadas, o que de fato acontece com grandes sistemas, deve-se prover uma forma eficiente de verificá-las, pois o tempo para comparar os lados esquerdos de milhares de regras pode se tornar consideravelmente grande. Um dos algoritmos mais utilizados é o *Rete* (rede em latim), o qual compila uma rede com os lados esquerdos das regras alocados em seus nodos para a comparação de padrões. Com esse tipo de formação, o mecanismo de inferência necessita comparar apenas os fatos que foram modificados ao invés de comparar todas as regras com todos os fatos a cada ciclo. Esse algoritmo tipicamente resulta em um decréscimo significativo no número de operações de comparação requeridas (METTREY, 1991). Outra forma de reduzir o número de regras a serem verificadas a cada ciclo é separá-las e agrupá-las em módulos lógicos funcionais, fazendo com que cada módulo esteja ativo somente quando o contexto corrente do problema esteja diretamente relacionado ao seu conteúdo.

Uma outra característica importante do modo de raciocínio se refere à monotonicidade ou não do método de inferência. Sistemas monotônicos não permitem a revisão de fatos, *i.e.*, uma vez um fato declarado verdadeiro, ele não pode mais tornar-se falso. Sistemas não monotônicos, por outro lado, permitem a alteração dinâmica dos fatos. O preço dessa capacidade é a necessidade de um mecanismo de revisão de crenças, pois uma vez que um fato, antes verdadeiro, torna-se falso, todas as conclusões baseadas nesse fato devem tornar-se falsas (BITTENCOURT, 2001).

### 3.3.3 Modelo de Dempster-Shafer

A imperfeição da informação é geralmente conhecida na literatura de sistemas baseados em conhecimento como “incerteza”. No entanto, segundo Bittencourt (2001), esse termo é muito restritivo; o que se convencionou chamar tratamento de incerteza pode, na verdade, estar endereçando outras imperfeições da informação, como imprecisão, conflito, ignorância parcial, etc. A capacidade de tratamento da incerteza é uma das principais características de SE's, pois os domínios adequados à implementação de SE's se caracterizam exatamente por não serem modelados por nenhuma teoria geral, o que normalmente implica descrições incompletas, inexatas e incertas. Diversos métodos foram propostos para tratar esse

problema, por exemplo, método Bayesiano (probabilístico), teoria de Dempster-Shafer, fatores de certeza (cujo exemplo clássico é o modelo adotado no MYCIN), teoria dos conjuntos nebulosos (*fuzzy*), dentre outros (BITTENCOURT, 2001).

Cada método possui uma aplicabilidade adequada para diferentes tipos de problemas. Por exemplo, quando se deseja tratar informações utilizando probabilidades como forma de quantificar incertezas, imprecisões ou ignorâncias pode-se utilizar os métodos Bayesiano, de Dempster-Shafer ou os fatores de certeza. O modelo Bayesiano é mais adequado quando se conhece ou se deseja associar uma função de distribuição de probabilidade *a priori* para as informações inexatas. Já o modelo de Dempster-Shafer e os fatores de certeza devem ser utilizados quando o mais apropriado é associar probabilidades subjetivas a essas informações. Os fatores de certeza podem ser considerados um caso especial do modelo de Dempster-Shafer, embora este possua um embasamento teórico e matemático mais formal e robusto que aqueles, os quais são normalmente implementados de forma *ad hoc* (GIARRATANO; RILEY, 1994).

Quando as informações sob análise possuem uma conotação vaga ou ambígua, a teoria mais adequada é a dos conjuntos nebulosos, também conhecidos como conjuntos difusos ou, do inglês, *fuzzy*. A teoria dos conjuntos nebulosos é um modelo tradicional desenvolvido por Zadeh (1965 *apud* BITTENCOURT, 2001) que tem por objetivo permitir graduações na pertinência de um elemento a uma ou mais classes dadas, associando-se esse grau de pertinência entre um valor real de 0 e 1. Seria como se ao invés de ter-se apenas as opções: preto e branco, para se definir uma imagem – correspondente à forma clássica da teoria dos conjuntos: pertence ou não pertence –, fosse possível descrevê-la também em tons de cinza; o que é naturalmente mais adequado e rico do ponto de vista cognitivo. Um dos aspectos mais relevantes dessa teoria é a sua capacidade de formalizar o uso de termos utilizados em linguagem natural como “um pouco baixo”, “muito alto”, “levemente quente”, “mais ou menos frio” o que faz com que a aplicabilidade dessa teoria seja praticamente ilimitada em termos de domínios de conhecimento, seja em áreas humanas, econômicas ou de engenharia.

Neste trabalho, devido à falta de fontes mais detalhadas sobre os problemas associados a falhas em turbomáquinas, foi escolhido o modelo de Dempster-Shafer para o tratamento da incerteza, já que essa desempenha um papel fundamental na análise das causas mais prováveis na tarefa de diagnóstico. Embora, a princípio, tenha-se escolhido esse método pela natureza das probabilidades envolvidas, ou seja, pela subjetividade numérica delas, mais tarde

verificou-se que esse modelo é consideravelmente mais flexível do que um SE baseado em probabilidades clássicas (método Bayesiano), visto que nem sempre é possível obter valores de probabilidades compatíveis com um nível de confiança predeterminado. Além disso, vários sistemas computacionais das mais diferentes áreas e domínios de conhecimento (SENTZ; FERSON, 2002) têm obtido resultados bastante adequados através do uso desse modelo, o que sustenta esta escolha satisfatoriamente.

O modelo de Dempster-Shafer é baseado no trabalho original de Dempster (1967 *apud* GIARRATANO; RILEY, 1994) que procurou modelar a incerteza através de uma faixa de probabilidades ao invés de um único número probabilístico. Shafer ampliou e refinou o trabalho de Dempster em um livro, publicado em 1976, chamado *A Mathematical Theory of Evidence*. Por isso, o modelo de Dempster-Shafer também é conhecido como a teoria de evidências. Essa teoria pode ser interpretada como uma generalização da teoria de probabilidades clássica onde, no entanto, as probabilidades são atribuídas a conjuntos ao invés de elementos mutuamente exclusivos. Na teoria de probabilidades tradicional, uma evidência é associada a apenas um evento possível. No modelo de Dempster-Shafer, essa evidência pode ser associada a múltiplos eventos ou conjuntos de eventos. Assim, uma evidência pode ter um significado mais abstrato, pois esse modelo é capaz de lidar com os vários níveis de precisão das informações disponíveis (SENTZ; FERSON, 2002).

Existem três funções importantes na teoria de Dempster-Shafer: a função de alocação de massa ( $m$ ), a função de credibilidade ( $Bel$ ) e a função de plausibilidade ( $Pls$ ). A função de alocação de massa, representada por  $m$ , define um mapeamento do conjunto potência, representado por  $P$ , em um intervalo real entre 0 e 1, onde a “massa”, também conhecida como “corpo ou medida de evidência”, do conjunto vazio é nula e a soma das massas de todos os subconjuntos do conjunto potência é 1. O valor de  $m$  para um dado conjunto  $A$ , representado por  $m(A)$ , expressa a proporção de todas as evidências disponíveis e relevantes que suportam a afirmação que um elemento particular de  $X$  (o universo de discurso, também conhecido como “conjunto ambiente”) pertence ao conjunto  $A$ , mas a nenhum subconjunto particular de  $A$ . Formalmente, essa descrição de  $m$  pode ser representada pelas três equações a seguir (SENTZ; FERSON, 2002):

$$m: P(X) \rightarrow [0, 1] \quad (3.1)$$

$$m(\emptyset) = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum_{A \in P(X)} m(A) = 1 \quad (3.3)$$

onde:

- a)  $P(X)$  representa o conjunto potência de  $X$ ;
- b)  $\emptyset$  é o conjunto vazio;
- c)  $A$  é um subconjunto do conjunto potência ( $A \in P(X)$ ), chamado “elemento focal” caso sua massa seja maior que zero ( $m(A) > 0$ ).

Uma das diferenças fundamentais entre a teoria de Dempster-Shafer e a teoria de probabilidades clássica é o tratamento da “ignorância”. A teoria de Dempster-Shafer, ao contrário da teoria de probabilidades ou do modelo Bayesiano, não força que a parcela de crença que não apóia uma determinada hipótese seja designada para a refutação dessa mesma hipótese. Assim, qualquer crença que não seja designada para um subconjunto específico é considerada como “não crença” ou ignorância, e associada ao conjunto ambiente ( $X$ ); diferentemente de “descrença” que é uma crença que refuta uma hipótese.

Para exemplificar esses termos, no caso de um diagnóstico de falhas poder-se-ia considerar o conjunto ambiente  $X$  como o conjunto de todos os modos de falha identificados para um determinado equipamento tal que  $X = \{F1, F2, F3\}$ . Assim esse equipamento possuiria, hipoteticamente, três modos de falha possíveis apenas. O conjunto potência seria então  $P(X) = \{\emptyset, \{F1\}, \{F2\}, \{F3\}, \{F1, F2\}, \{F1, F3\}, \{F2, F3\}, \{F1, F2, F3\}\}$ . Embora o tamanho do conjunto potência seja igual a oito subconjuntos ( $2^3$ ), isso não significa que cada um desses subconjuntos seja um elemento focal de  $P(X)$ . Para que algum subconjunto se torne um elemento focal, é necessário que, nesse contexto e uma vez identificada uma pane ou defeito manifestado nesse equipamento, um sensor ou operador do equipamento detecte uma evidência que indique que um ou mais modos de falha poderiam ocorrer com algum grau de incerteza.

Por exemplo, se um sensor ou operador detectasse uma evidência de que um determinado defeito no equipamento ocorreu e que, baseado nos efeitos apresentados, os modos de falha  $F1$  ou  $F3$  seriam as causas mais prováveis (*e.g.*, probabilidade de 80%), deve-se associar uma massa a esse subconjunto como:  $m_1(\{F1, F3\}) = 0,8$  e, conseqüentemente,  $m_1(\{F1, F2, F3\}) = 0,2$  onde o índice 1 corresponde à primeira evidência identificada. Isto significa que a parcela de ignorância associada às incertezas da evidência (*i.e.*, 20%), deve ser associada ao conjunto ambiente, o qual não permite concluir qual dos modos de falha ocorreu.

Quando mais de uma evidência está disponível (o que é normalmente o caso onde se justifica a aplicação da teoria de evidências), deve-se combinar os corpos de evidências

independentes para se obter uma estimativa mais precisa da crença em uma determinada hipótese. A regra de Dempster para a combinação de evidências é um tipo especial de método de agregação para dados obtidos de múltiplas fontes. Essa regra é definida da seguinte forma:

$$\mu(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C) \tag{3.4}$$

$$m_{12}(A) = \mu(A) / (1 - \mu(\emptyset)) \tag{3.5}$$

onde os índices 1 e 2 referem-se respectivamente a primeira e a segunda evidências consideradas e, conseqüentemente, o índice 12 refere-se à combinação dessas evidências, resultando em um novo corpo de evidência após o passo de normalização.

Assim, no contexto do exemplo anterior, se outra evidência mais específica fosse identificada, levando à definição de, por exemplo,  $m_2(\{F3\}) = 0,85$  e  $m_2(\{F1, F2, F3\}) = 0,15$ , ter-se-ia novos corpos de evidência que reforçariam a hipótese de que o modo de falha F3 ocorreu. Os resultados da combinação de evidências pela regra de Dempster são ilustrados no Quadro 3.2. Dessa forma, a distribuição de massas ficaria:  $m_{12}(\{F3\}) = 0,85$ ,  $m_{12}(\{F1, F3\}) = 0,12$  e  $m_{12}(X) = 0,03$ . O passo de normalização não é necessário nesse caso, pois a intersecção dos corpos de evidência identificados não é vazia entre esses.

	$m_2(\{F3\}) = 0,85$	$m_2(X) = 0,15$
$m_1(\{F1, F3\}) = 0,8$	{F3} 0,68	{F1, F3} 0,12
$m_1(X) = 0,2$	{F3} 0,17	X 0,03

Quadro 3.2 - Combinação dos corpos de evidência do exemplo dado pela regra de Dempster.

O objetivo da normalização é reconsiderar os corpos de evidências diante de possíveis divergências que podem ser apresentadas por diferentes fontes de informação. Dessa forma,  $\mu(\emptyset)$  representa a quantidade de “conflito evidencial”. Se  $\mu(\emptyset) = 0$ , a compatibilidade das evidências fornecidas é de 100%. Caso  $\mu(\emptyset) = 1$ , existe uma contradição completa entre as fontes. Valores entre  $0 < \mu(\emptyset) < 1$  demonstram compatibilidade parcial (GIARRATANO; RILEY, 1994). Essa forma de tratamento do conflito de informações, associando-se suas massas ao conjunto vazio, tem sido um dos aspectos mais criticados da regra de Dempster para a combinação de evidências (GIARRATANO; RILEY, 1994; SENTZ; FERSON, 2002). Resultados contra intuitivos aparecem quando há um conflito significativo entre informações. Conseqüentemente, outros pesquisadores têm desenvolvido modificações na regra de Dempster que tentam representar de forma mais adequada o grau de conflito no resultado

final. Bittencourt (2001); Sentz e Ferson (2002) apresentam algumas regras propostas por outros pesquisadores como Yager, Dubois e Prade, Hau e Kashyap, Inagaki, Zhang dentre outros.

A partir da função de alocação de massa  $m$ , as funções de credibilidade ( $Bel$ ) e de plausibilidade ( $Pls$ ) definem os limites inferior e superior respectivamente do chamado “intervalo evidencial”, que corresponde a uma faixa de crença/probabilidade sobre um determinado elemento focal. O limite inferior de credibilidade para um conjunto  $A$  é definido como a soma de todas as massas dos subconjuntos apropriados ( $B$ ) do conjunto de interesse ( $A$ ) ( $B \subseteq A$ ). O limite superior de plausibilidade corresponde à soma de todas as massas dos conjuntos ( $B$ ) que interseccionam o conjunto de interesse ( $A$ ) ( $B \cap A \neq \emptyset$ ). Formalmente, para todos os conjuntos  $A$  que são elementos focais do conjunto potência ( $A \in P(X)$ ) (SENTZ; FERSON, 2002):

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (3.6)$$

$$Pls(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (3.7)$$

Os dois limites são não-aditivos, ou seja, a soma de todas as medidas de credibilidade ou de plausibilidade não deve ser necessariamente igual a 1. A função de credibilidade ( $Bel$ ) mede a que ponto as informações fornecidas por uma fonte sustentam  $A$ . A função de plausibilidade ( $Pls$ ) mede a que ponto as informações dadas por uma fonte não contradizem  $A$ . Em outras palavras, a credibilidade é a crença mínima suportada pelas evidências analisadas, enquanto a plausibilidade é a crença máxima que se pode alcançar com base nas incertezas dessas mesmas evidências. Ambas as funções estão ligadas pela seguinte relação (SENTZ; FERSON, 2002):

$$Bel(A) = 1 - Pls(\bar{A}) \quad (3.8)$$

onde  $\bar{A}$  é o complemento clássico de  $A$ .

No caso do exemplo anterior, e após a combinação das duas evidências, os valores das funções credibilidade e plausibilidade dos elementos focais seriam:  $Bel(\{F1, F3\}) = 0,12$  e  $Bel(\{F3\}) = 0,85$ ,  $Pls(\{F1, F3\}) = 0,15$  e  $Pls(\{F3\}) = 1$ . Na prática, normalmente se deseja saber a probabilidade individual de cada modo de falha. Portanto, para F1 ter-se-ia:  $Bel(\{F1\}) = 0$  e  $Pls(\{F1\}) = 0,15$ . Ou seja, diante de dois modos de falha possíveis (F1 e F3), não há evidências diretas de que F1 ocorreu ( $Bel(\{F1\}) = 0$ ), mas há uma chance de 15% de que esse

possa ter ocorrido. Por outro lado, há evidências diretas de que F3 ocorreu com uma probabilidade de 85%, além de não haver nenhuma evidência que refute tal hipótese ( $Pls(\{F3\}) = 1$ ).

Como foi visto anteriormente, o modelo de Dempster-Shafer possui um embasamento teórico e matemático bastante robusto e fundamentado. Desde que os corpos de evidências sejam independentes, as propriedades matemáticas de comutatividade, idempotência, continuidade e associatividade podem ser verificadas nas operações de combinação de evidências (SENTZ; FERSON, 2002). Como resultado da combinação de múltiplas fontes de informação ou de evidências, pode-se obter intervalos evidenciais para cada hipótese considerada. O Quadro 3.3 apresenta os possíveis intervalos evidenciais que podem resultar de quaisquer combinações de evidências.

Intervalo Evidencial	Significado
[1, 1]	Completamente verdadeiro
[0, 0]	Completamente falso
[0, 1]	Completamente ignorante
[Bel, 1]	Tende a suportar
[0, Pls]	Tende a refutar
[Bel, Pls]	Tende tanto a suportar como refutar

Quadro 3.3 - Alguns intervalos evidenciais possíveis no modelo de Dempster-Shafer.  
Fonte: GIARRATANO; RILEY, 1994.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os métodos e a metodologia empregados no desenvolvimento do protótipo de SE a que se propõe este trabalho. Foi colocado o contexto da aplicação do paradigma computacional de SE's dentro da área de IA e como, historicamente, essa técnica procurou tratar problemas que não podiam ser resolvidos computacionalmente da forma mais convencional, necessitando-se de uma abordagem que visa emular a capacidade de resolução de problemas com a mesma eficácia de um especialista humano. Com isso, a engenharia de conhecimento se desenvolveu, juntamente com os arcabouços de SE's, e apresentou uma forma mais racional, focada no desenvolvimento de SE's de grande porte com a utilização de várias técnicas de IA para a representação de conhecimento. Procurou-se, neste capítulo, mostrar como o conhecimento é algo relacionado ao nível de organização e de



---

abstração do tratamento de dados que podem ser utilizados para gerar novos dados e informações com níveis diferentes de significado.

As principais técnicas adotadas no desenvolvimento do protótipo neste trabalho foram abordadas e brevemente discutidas, tanto aquelas ligadas à representação de conhecimento propriamente dito como as teorias de mecanismos e de representação da incerteza. Os métodos apresentados figuram entre os principais disponíveis para o desenvolvimento de SE's, e esses foram demonstrados adequados ao tratamento e manipulação do tipo de conhecimento necessário para o diagnóstico e prognóstico de falhas, tendo como base os inúmeros trabalhos bem sucedidos e artigos relacionados ao tema da MBC de turbomáquinas citados nas referências desta dissertação. O capítulo seguinte visa demonstrar e descrever como essas técnicas foram implementadas e os resultados preliminares obtidos a partir do protótipo desenvolvido, assim como, discutir o seu potencial como ferramenta de manutenção preditiva para turbomáquinas.

## 4 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

O objetivo deste capítulo é apresentar a descrição dos métodos implementados no protótipo deste trabalho, descrevendo-se as principais classes de objetos representadas, as funções para os cálculos termodinâmicos e a estrutura das regras de produção utilizadas para que o sistema realize diagnósticos de falhas em função de parâmetros anormais identificados e situações delineadas. Conforme descrito no primeiro capítulo, a proposta é demonstrar a viabilidade de tais métodos de representação e a capacidade de um SE de manipular fatos e informações relacionadas ao estado interno dos componentes, já que uma parada do equipamento para efetuar tal verificação é muito custosa e, portanto, indesejável a menos que haja alguma evidência que justifique uma ação/tarefa de manutenção.

### 4.1 ANÁLISES REALIZADAS PELO SISTEMA

O protótipo desenvolvido deve realizar diagnósticos de falhas em compressores centrífugos a partir de informações relacionadas ao seu estado interno, além de informações gerais sobre a sua situação de operação e manutenção e dos sistemas auxiliares. Sendo assim, as análises realizadas pelo sistema protótipo foram divididas em duas partes principais: a análise de performance termodinâmica e o diagnóstico de falhas propriamente dito. A primeira trata da comparação do estado termodinâmico do processo atual com o seu estado esperado a partir da aquisição dos dados do processo de compressão de gás natural, gerando um erro numérico associado a essa possível diferença. A segunda análise utiliza as informações geradas pela análise numérica do processo, além de informações adicionais sobre as instalações e indicações dos sensores do compressor, para produzir inferências relativas ao estado interno dos seus componentes e/ou do processo.

Como base ou ponto de partida para a implementação deste protótipo, foram utilizados alguns dados de compressores do GASBOL, em específico do trecho norte do gasoduto já que o trecho sul possui somente compressores do tipo alternativo, cujas características construtivas tornam sua análise de falhas eminentemente diferente daquela utilizada em compressores dinâmicos. A maioria dos compressores centrífugos do GASBOL é do mesmo fabricante com modelos de 2 ou 3 estágios, o que permite estender este sistema para mais de uma estação de compressão com possivelmente apenas pequenas adaptações.

Como foi comentado no Capítulo 3, o modelo de desenvolvimento adotado é o modelo incremental já que, pelas características de aquisição de conhecimento deste protótipo, não foi possível estabelecer os requisitos do sistema *a priori*, por isso o próprio protótipo foi delineando as necessidades das análises que se identificou a partir da definição do problema a ser tratado pelo SE em desenvolvimento. Após atingido um nível satisfatório de modelagem e representação do conhecimento sobre o problema, submeteu-se este protótipo a uma análise de um especialista cuja avaliação será discutida na seção 4.3.

## 4.2 CONHECIMENTO IMPLEMENTADO

### 4.2.1 Análise de Performance Termodinâmica

A análise da performance termodinâmica de um compressor dinâmico depende de três fatores básicos para que possa ser avaliada satisfatoriamente, são eles: (1) os dados do processo de compressão (vazão, rotação, pressões e temperaturas de sucção e descarga, dentre outros), (2) a composição química do gás de processo e (3) as curvas de performance do compressor levantadas na fábrica e/ou na fase de comissionamento da linha. Sem algum desses elementos não é possível avaliar a performance do compressor quantitativamente. Os métodos de análise de performance descritos são baseados em Gresh (2001) cujos procedimentos de cálculo e comparação de valores baseiam-se na norma ASME PTC 10 (1997) - *Performance Test Code on Compressors and Exhausters*. As equações apresentadas a seguir são baseadas nas leis da termodinâmica e, portanto, podem ser obtidas a partir de manipulações matemáticas (derivação e integração) e simplificações de variáveis adequadas que não serão demonstradas neste texto. Essas grandezas são consideradas chave na determinação da performance de compressores dinâmicos (GRESH, 2001).

#### 4.2.1.1 Head Politrópico

Também conhecido como *Head* de Euler (H) e análogo ao equivalente hidráulico “altura total de elevação”, corresponde ao trabalho termodinâmico específico (por unidade de massa) realizado segundo um processo politrópico, ou seja, reversível para um gás ideal com transferência de calor e entropia variável. Nesse caso, o aumento da entalpia entre a sucção e a descarga do compressor também é causado pelo ganho de calor do gás proveniente das perdas por atrito mecânico e aerodinâmico durante a sua compressão, provocando o aumento

da sua temperatura final. A unidade usual é o  $\text{kJ/kg}$ , baseada no SI. Outra unidade usual é o  $\text{kgf.m/kg}$ . No sistema inglês,  $\text{lb.f.ft/lb}$ .

$$H_p = Z_s \cdot R \cdot T_s \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (4.1)$$

onde:

a)  $Z_s$ : fator de compressibilidade na sucção [adimensional]

b)  $R$ : constante específica do gás [ $\text{kJ/kg.K}$ ]

$$R = \frac{\bar{R}}{M_m} \quad (4.2)$$

c)  $\bar{R}$ : constante universal dos gases [ $8,314 \text{ kJ/kmol.K}$ ]

d)  $M_m$ : massa molar da mistura gasosa [ $\text{kg/kmol}$ ]

e)  $T_s$ : temperatura na sucção [ $\text{K}$ ]

f)  $n$ : expoente politrópico [adimensional]

$$n = \frac{\ln(P_d/P_s)}{\ln(v_s/v_d)} \quad (4.3)$$

g)  $P_s$ : pressão absoluta na sucção [ $\text{Pa}$ ]

h)  $P_d$ : pressão absoluta na descarga [ $\text{Pa}$ ]

i)  $v_s$ : volume específico na sucção [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

j)  $v_d$ : volume específico na descarga [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

#### 4.2.1.2 Rendimento Politrópico

Eficiência aerodinâmica real dos impelidores do compressor que compara a energia que deveria ser cedida em um processo reversível (*head* politrópico) com a energia que foi cedida de fato ao fluido durante a sua compressão (trabalho termodinâmico real). O rendimento politrópico é o critério mais verdadeiro para avaliar a perfeição com que o impelidor efetua a cessão de energia ao fluido (FALCO, [200?]).

$$\eta_p = \frac{H_p}{W} = \frac{H_p}{h_d - h_s} \quad (4.4)$$

numa compressão isentrópica de um gás ideal sem resfriamento (ÇENGEL; BOLES, 1994):

$$h_d - h_s \sim c_{p,m} \cdot (T_d - T_s) \quad (4.5)$$

onde:

- a)  $H_p$ : *head* politrónico [kJ/kg]
- b)  $W$ : trabalho termodinâmico real [kJ/kg]
- c)  $h_s$ : entalpia na sucção [kJ/kg]
- d)  $h_d$ : entalpia na descarga [kJ/kg]
- e)  $c_{p,m}$ : calor específico à pressão constante da mistura gasosa [kJ/kg.K]
- f)  $T_s$ : temperatura na sucção [K]
- g)  $T_d$ : temperatura na descarga [K]

#### 4.2.1.3 Potência de Gás

Potência empregada na compressão real do gás, ou seja, aquela que considera o trabalho termodinâmico útil mais as perdas aerodinâmicas irreversíveis devido à rotação dos impelidores em um meio fluido viscoso e sua interação com os difusores. A unidade mais usual para a quantificação de potência é o *kW*, baseada no SI. Do *hp*, outra unidade usual, deriva a denominação de potência de gás, do inglês *Gas Horse-Power* (GHP). A relação entre as unidades mais usuais é:  $1 \text{ hp} = 0,746 \text{ kW}$ .

$$GHP = \frac{H_p}{\eta_p} \cdot Q_m \quad (4.6)$$

onde:

- a)  $H_p$ : *head* politrónico [kJ/kg]
- b)  $\eta_p$ : rendimento politrónico [adimensional]
- c)  $Q_m$ : vazão mássica [kg/s]

#### 4.2.1.4 Potência de Eixo

Potência entregue ao eixo do compressor pelo acionador. No entanto, a potência de eixo – *Brake Horse-Power* (BHP) ou *Shaft Horse-Power* (SHP) – não é igual à potência de acionamento – *Drive Horse-Power* (DHP). Ela é equivalente à potência de gás mais as perdas por atrito mecânico do eixo com os mancais radiais e de escora e com os selos labirintos. Segundo Falco ([200?]), essas perdas podem ser estimadas assumindo-se um rendimento ou eficiência mecânica de 98 a 99 % para máquinas de grande porte (*heavy duty*).

$$BHP = \frac{GHP}{\eta_m} \quad (4.7)$$

onde:

- a)  $GHP$ : potência de gás [kW]
- b)  $\eta_m$ : rendimento mecânico [adimensional]

#### 4.2.1.5 Potência de Acionamento

Potência mecânica gerada pelo acionador que pode ser uma turbina a gás (caso do GASBOL), turbina a vapor, *expander* ou motor elétrico. A aferição da potência de acionamento – *Drive Horse-Power* (DHP) – é geralmente fornecida diretamente por instrumentos embarcados no próprio acionador, mas pode ser realizada por instrumentos auxiliares como torquímetro dinâmico (medidor de torque) e tacômetro (medidor de velocidade de rotação) instalados no lado do acoplamento do acionador com o compressor.

$$DHP = T \cdot N \cdot 2\pi \quad (4.8)$$

onde:

- a)  $T$ : torque de eixo [N.m]
- b)  $N$ : velocidade de rotação [rotações/s]
- c)  $\pi$ : constante (3,14159...) [adimensional]

#### 4.2.1.6 Curvas de Performance

Conforme mencionado anteriormente, as curvas de performance são aquelas que são levantadas durante os testes na fábrica (*shop test*) ou, preferencialmente, durante a fase de comissionamento da linha de compressão, uma vez que nessas condições o equipamento já estará instalado no sistema em que atuará definitivamente. Com isso, é possível determinar os parâmetros termodinâmicos e mecânicos, descritos nas seções anteriores, que estabelecem as referências de desempenho do conjunto compressor-acionador quando ele se encontra nas condições de “tão bom quanto novo” em termos de uso e desgaste das suas partes internas. Por isso é tão importante possuir dados corretos e suficientemente representativos do comportamento energético do compressor para que se possa comparar a performance atual do equipamento em relação ao seu desempenho esperado com um nível satisfatório de precisão. É necessário ter disponível pelo menos as curvas de *head* e eficiência versus vazão

volumétrica em 4 ou 5 velocidades de rotação além das linhas de *surge* e *stonewall* (v. seção 2.2.2.2) do compressor em questão.

Na implementação do protótipo, onde foram representadas as curvas de performance de dois modelos de compressores centrífugos do GASBOL, utilizou-se como base as curvas de *head* no ponto de operação nominal (*i.e.*, na rotação e vazão volumétrica nominais) fornecidas pela empresa-alvo. A partir do levantamento de alguns pontos dessas curvas traçou-se curvas de tendência de terceira ordem por regressão linear para a representação matemática de seus valores dentro da faixa de operação de cada máquina, ou seja, entre os valores mínimo e máximo de vazão volumétrica admissíveis para cada modelo. O Gráfico 4.1 mostra uma dessas curvas para o modelo de 3 estágios de compressão. Nela é possível observar alguns pontos próximos a sua região central que representam os vários pontos de operação levantados durante a fase de comissionamento e que foram corrigidos segundo as leis dos ventiladores para que possam ser avaliados através da curva implementada.

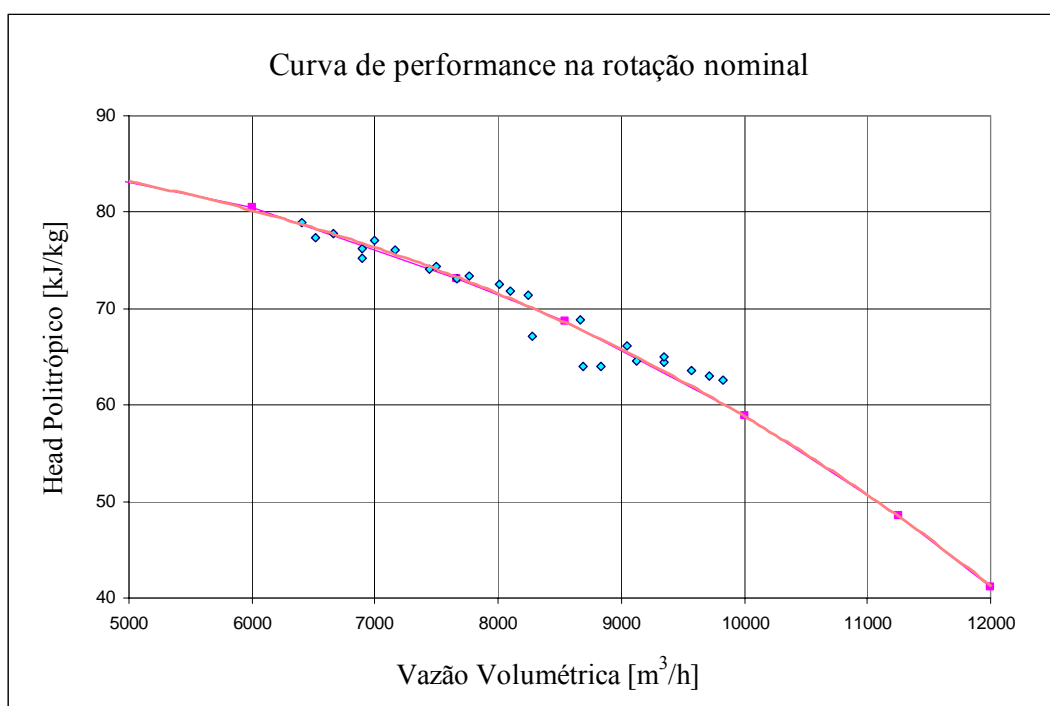


Gráfico 4.1 - Exemplo de uma das curvas de performance representadas no protótipo de SE.

As principais leis dos ventiladores utilizadas para a correção de valores são apresentadas a seguir (GRESH, 2001). Vale lembrar que sua validade matemática implica que os pontos corrigidos sejam pontos homólogos, ou seja, aqueles que possuem rendimentos termodinâmicos iguais ( $\eta_1 = \eta_2$ ):

$$\frac{Q_{v1}}{Q_{v2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.9)$$

onde:

- a)  $Q_{v1}$  e  $Q_{v2}$  correspondem à vazão volumétrica em dois pontos homólogos
- b)  $N_1$  e  $N_2$  correspondem à rotação do compressor em dois pontos homólogos

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (4.10)$$

onde  $H_1$  e  $H_2$  correspondem ao *head* em dois pontos homólogos.

Existe uma outra forma de simplificar a comparação entre os pontos de operação que é a utilização de coeficientes adimensionais como o coeficiente de *head* ( $\mu$ ), o coeficiente de vazão ( $\varphi$ ), velocidade específica ( $N_s$ ), etc., obtidos pelo Teorema II de Buckingham. No entanto, para a correção dos pontos de operação optou-se pelo uso das leis dos ventiladores apenas, pois se verificou que os erros advindos do uso desses coeficientes são maiores e mais difíceis de serem tratados já que a ordem de grandeza dos seus valores (menor que  $10^{-7}$ ) torna a análise numérica computacionalmente limitada.

As curvas de rendimento politrópico foram obtidas apenas a partir dos pontos de operação disponíveis por regressão polinomial de terceira ordem, uma vez que as curvas dessa variável não foram levantadas previamente. Alguns ajustes empíricos foram utilizados para estimar o valor real desse parâmetro, pois além de algumas inconsistências nos dados disponibilizados<sup>11</sup>, de fato, essa é a variável mais sensível e complexa a ser determinada. Segundo De Maria e Gresh (2006), o melhor método para a determinação das propriedades termodinâmicas de misturas gasosas, como o gás natural, é usar as equações de estado de Benedict-Webb-Rubin (BWR). Como na fase de desenvolvimento de um protótipo o objetivo não é obter resultados numéricos precisos, mas sim demonstrar a viabilidade da metodologia, considera-se que a solução obtida é satisfatória. No entanto, essa questão é importante e deve ser priorizada quanto à melhoria da qualidade da análise termodinâmica realizada pelo sistema.

#### 4.2.1.7 Comentários sobre a Análise de Performance

<sup>11</sup> Os valores fornecidos da razão de calores específicos média pelos testes de comissionamento dos compressores do GASBOL estão numa faixa entre 1,5 e 1,6 o que contradiz a faixa experimental desta variável onde se espera valores entre 1,2 e 1,3 para o gás natural.



Como se tentou evidenciar, a análise de performance depende totalmente de dados sobre o processo. A qualidade dessa análise é influenciada diretamente pela incerteza associada às medidas disponibilizadas pelos instrumentos, pela análise cromatográfica do gás com as frações molares de seus componentes, assim como pelos métodos empregados no cálculo das grandezas termodinâmicas e no levantamento das suas curvas. Além disso, é importante cruzar os dados de potência gerada e potência consumida, pois, segundo Gresh (2001), o balanço de potência entre o conjunto compressor-acionador normalmente indicará o grau de precisão do teste executado.

Na implementação do protótipo, foi desenvolvida uma interface de diálogo com o usuário para a obtenção dos dados atuais do processo manualmente. São eles: os fatores de compressibilidade, temperaturas e pressões na sucção e na descarga para o cálculo termodinâmico, e a vazão volumétrica e rotação do compressor para a determinação do ponto na curva de performance. Além desses, são solicitados os valores da razão de calores específicos média e da potência de acionamento fornecida pela turbina a gás. Cada uma dessas medidas representa uma instância de um objeto da classe PARÂMETRO que foi implementada para representar os seus atributos como “valor”, “unidade”, “símbolo”, “descrição”, “limites”, etc.

A partir dessa classe, foi implementado um método para a aquisição de valores que pode ser facilmente modificado para implementar, por exemplo, um algoritmo de aquisição automática de dados sem que sejam necessárias grandes mudanças na estrutura do código implementado. Dessa forma, com a disponibilização de dados por um sistema supervisor ou CLP, pode-se implementar rotinas de acesso a esses dados – através de protocolos específicos de redes industriais – de maneira que o próprio sistema negocie esse acesso com taxas de amostragem adequadas sem a necessidade de que o usuário tenha de entrar com os dados do processo manualmente. Esse tipo de implementação certamente levará este protótipo a um nível maior de automatismo e, conseqüentemente, mais próximo do que se espera de uma ferramenta de MBC.

Para o cálculo dos parâmetros termodinâmicos é necessário obter a massa molar e o coeficiente isentrópico da mistura gasosa. A composição química padrão do gás natural proveniente da Bolívia – que foi apresentada na Tabela 1.1 – pode ser modificada através do mesmo método implementado para a aquisição de valores de forma a modificar a proporção de frações molares do gás natural de processo. Na verdade, foi implementada uma subclasse

da classe PARÂMETRO chamada SUBSTÂNCIA que inclui além do valor da sua fração molar na composição do gás natural, alguns atributos extras como a massa molar da substância e os coeficientes de uma curva de terceira ordem que permitem estimar o valor individual do calor específico à pressão constante dessa substância para o cômputo da mesma variável associada à mistura gasosa total (dado um determinado aumento de temperatura entre a sucção e a descarga) (ÇENGEL; BOLES, 1994).

Quanto às equações para o cálculo dos parâmetros termodinâmicos do processo foram utilizadas funções para implementar os procedimentos de cálculo e seus resultados alocados em instâncias de objetos da classe PARÂMETRO. Após a aquisição dos dados do processo, cada parâmetro relativo à performance do compressor é calculado, corrigido pelas leis de ventiladores e comparado com a curva dessa variável que representa o seu valor esperado. Com isso, gera-se um erro percentual que permitirá concluir se esses parâmetros estão abaixo, acima ou de acordo com o valor esperado no ponto de operação dado. A etapa de análise de performance está representada no fluxograma da Figura 4.1 a seguir.

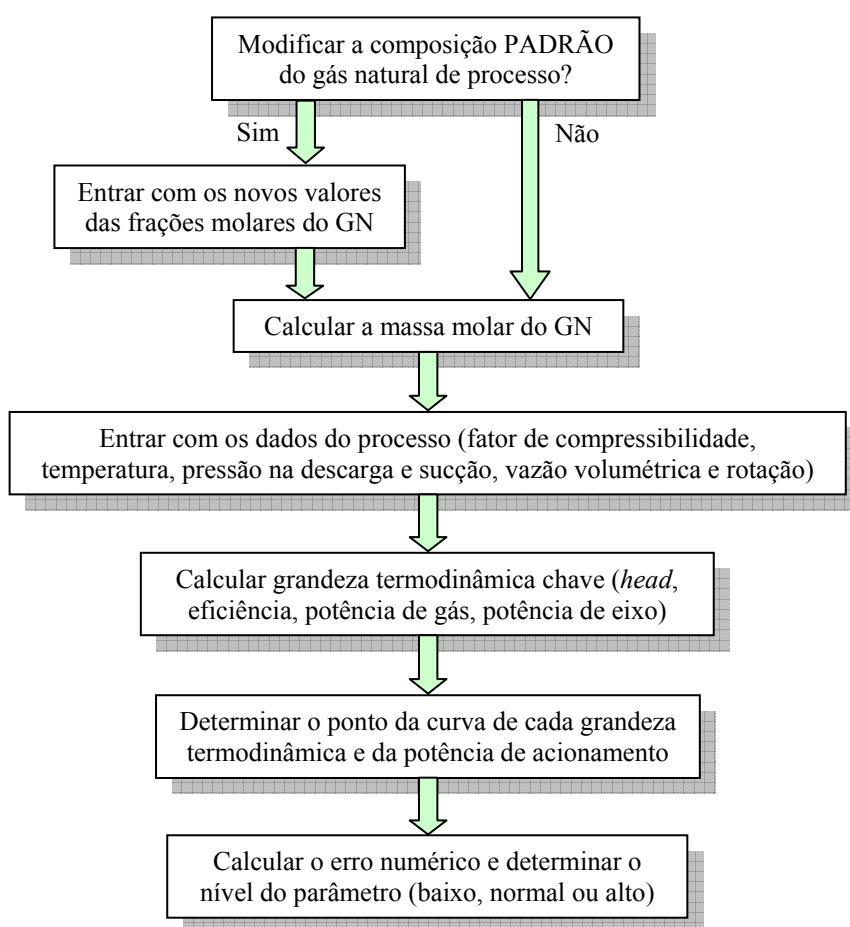


Figura 4.1 - Fluxograma da análise de performance implementada no protótipo de SE.

Tanto os erros calculados quanto os níveis detectados desses parâmetros (“alto”, “baixo” ou “normal”) são alocados em atributos das suas instâncias associadas para uso no diagnóstico de falhas e para a sua impressão no arquivo de resultados ao final da sessão executada. Devido à limitação dos dados disponibilizados e dos métodos de representação das curvas, e antes que um especialista valide a análise de performance realizada pelo SE, foi utilizada uma margem de erro de 3% acima e abaixo do valor esperado para considerar um parâmetro de performance dentro do nível considerado “normal”. Na prática, essa margem pode ser considerada muito elevada para avaliar seu nível como “normal”, por isso somente um especialista poderá afirmar qual margem de erro é admissível para cada parâmetro, segundo sua experiência de campo.

#### 4.2.2 Diagnóstico de Falhas

Concluída a análise de performance termodinâmica do compressor, tem-se a situação de desempenho energético do equipamento com base nas cinco grandezas descritas na seção 4.2.1. Caso algum desses parâmetros apresente um nível considerado anormal (“baixo” ou “alto”), o diagnóstico de falhas é ativado para que se levante as possíveis causas da baixa performance detectada. Para representar o universo de situações e entidades envolvidas no diagnóstico de falhas definiu-se uma ontologia simples, representada por um conjunto de classes e relações entre objetos, um conjunto de regras de produção para o encadeamento e a análise de causas e sintomas, assim como uma estrutura de funções e classes para representação da incerteza segundo o modelo de Dempster-Shafer. A implementação desses três elementos será discutida separadamente para facilitar o entendimento da estrutura computacional do protótipo.

##### 4.2.2.1 Classes e Estrutura de Objetos

Conforme visto na seção 3.2.3, o CLIPS possui a capacidade de representação de diferentes técnicas de programação como a orientação a objeto (OO) e a programação procedural/estruturada associadas ao sistema de regras de produção com um mecanismo de inferência implícito (algoritmo *Rete*). Como se procurou demonstrar no Capítulo 3, a técnica de OO associado a uma linguagem de programação adequada é capaz de oferecer grande parte das características mais vantajosas historicamente desenvolvidas pelos métodos clássicos de representação de conhecimento (ontologias, redes semânticas e quadros).

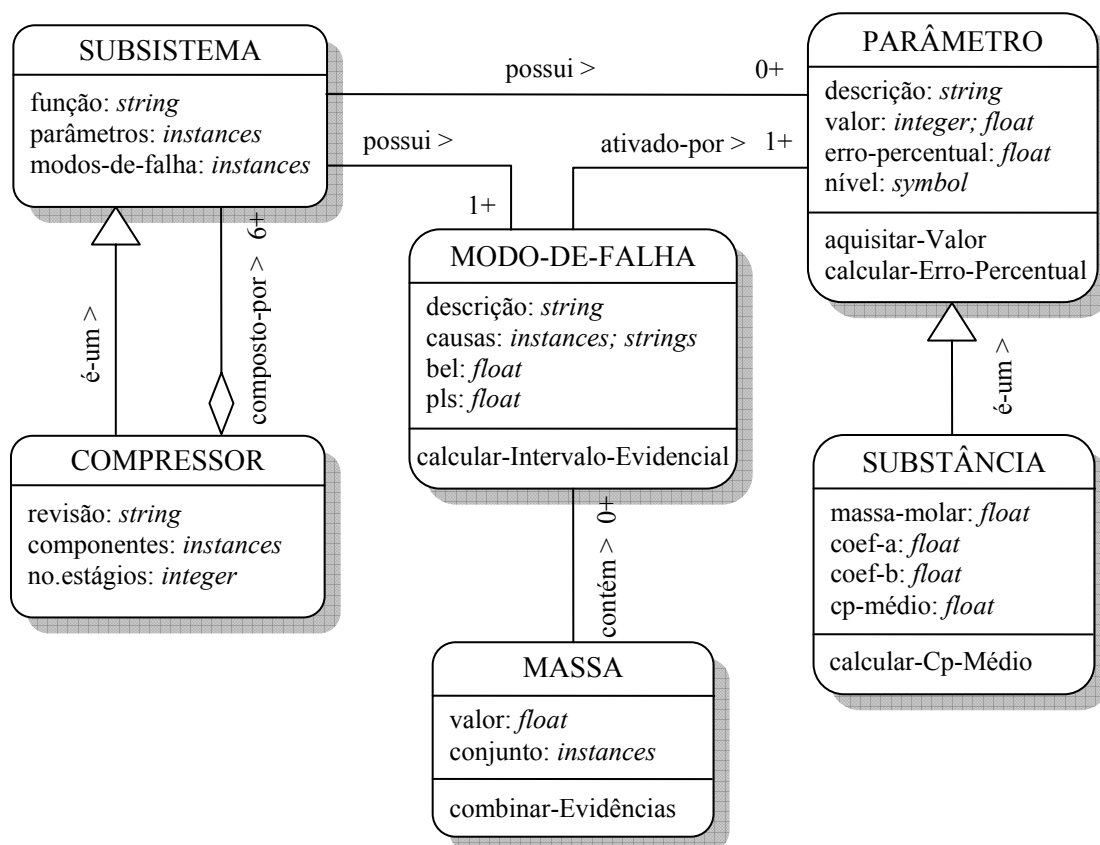


Figura 4.2 - Diagrama de classes dos objetos representados no protótipo.

No diagrama de classes da Figura 4.2, são representados os principais objetos que constituem a estrutura de dados e informações sobre o processo de diagnóstico de falhas de compressores. Além disso, alguns atributos desses objetos assim como alguns métodos das suas classes foram mostrados para facilitar a ilustração das relações de hereditariedade, composição, cardinalidade, etc. envolvidas na ontologia da tarefa de diagnóstico de falhas. A idéia deste diagrama é mostrar como a estrutura de classes adotada pode ser ao mesmo tempo, suficientemente genérica para ser estendida a qualquer outro sistema ou equipamento de uma estação de compressão, por exemplo, e particularmente vista como a especificação de alguns dos principais atributos e métodos dos objetos que foram implementados no protótipo (tipos de dados, atributos de relacionamento, etc.). Os atributos das classes, cujo tipo (em inglês) está no plural, significam que seus valores podem ser campos múltiplos (listas) de dados.

Por exemplo, na classe SUBSISTEMA existem os atributos “parâmetros” e “modos-de-falha” que guardam uma lista de instâncias dos objetos das suas respectivas classes que pertencem à instância de um determinado subsistema (e.g., mancal axial, sistema de gás seco, etc.). Já a classe MODO-DE-FALHA possui como atributo uma lista de “causas” que, de acordo com a FMEA, podem ser modos de falha de outros subsistemas. Assim, definiu-se

que, se a causa do modo de falha provém de um subsistema do compressor já representado, ela será do tipo instância, caso contrário será um texto explicativo de uma causa externa (tipo *string*). Isto permite flexibilidade à implementação, favorecendo a inclusão de novos modos de falha à medida que esses vão sendo identificados e/ou representados.

#### 4.2.2.2 Estrutura das Regras do Diagnóstico

As regras de produção implementadas no diagnóstico de falhas foram genericamente organizadas e estruturadas de forma a considerar que cada uma delas está unicamente associada a uma determinada evidência. Dessa forma, primeiramente cada sintoma geral de baixa performance (*e.g.*, *head* politrópico baixo, rendimento politrópico baixo, etc.) gera um fato relacionado a sua anormalidade que em conjunto com outras pré-condições disparam regras de evidências mais específicas que por fim vão buscar fatos que comprovem ou refutem uma hipótese (causa raiz) associada à ocorrência de um ou mais modos de falha representados. Já no lado direito das regras, podem ser verificadas outras condições que determinarão o subconjunto – pertencente ao conjunto potência que contém todos os modos de falha possíveis na análise dada – da instância associada ao corpo (massa) dessa evidência. Além disso, são geradas as explicações sobre a influência geral dessa evidência que, ao final da análise, justificarão a probabilidade de cada modo de falha considerado. Essas explicações figuram no arquivo de resultados disponibilizado ao final da execução. Na Figura 4.3 é ilustrado o esquema de uma regra de evidência com os valores possíveis para a sua massa.

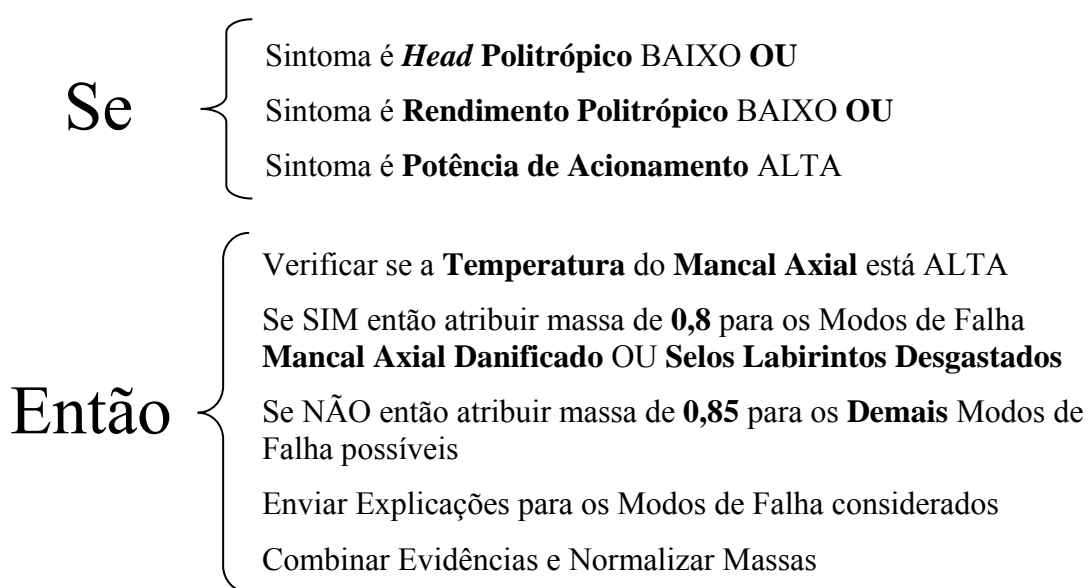


Figura 4.3 - Esquema de regra para verificar a temperatura alta no mancal axial.

No protótipo, foram implementadas cerca de 15 regras relacionadas a algumas evidências de performance degradada mencionadas na literatura técnica, sendo que algumas delas verificam condições automaticamente (correlações entre parâmetros) e outras apresentam perguntas ao usuário relacionadas ao estado de sensores ou condições de uso e manutenção dos subsistemas e componentes ligados ao compressor. Para que sejam evitadas perguntas específicas desnecessariamente, é realizado um pré-diagnóstico onde são verificadas algumas possíveis inconsistências ou falhas muito evidentes como uma limitação das curvas de performance implementadas ou um erro do usuário (*e.g.*, na etapa aquisição de dados do processo).

Outra questão é que, embora o algoritmo *Rete* favoreça apenas o encadeamento direto de regras, o problema de diagnóstico é classicamente tratado como um tipo de raciocínio reverso. Entretanto, da forma como foi implementada a estrutura das regras, e principalmente pelo uso do modelo de Dempster-Shafer, não se encontrou grandes problemas com a utilização do encadeamento direto disponibilizado pelo CLIPS, de forma que a estrutura adotada apresenta um aspecto bastante intuitivo. De fato, o modelo de tratamento da incerteza adotado, independe da seqüência e do número de evidências consideradas, pois de alguma forma ele reflete a qualidade da investigação pelo tamanho do intervalo evidencial de cada modo de falha (*v.* Quadro 3.2).

#### 4.2.2.3 Implementação do Modelo de Dempster-Shafer

O modelo de Dempster-Shafer foi implementado utilizando-se uma classe chamada MASSA para representar corpos de evidência que, além de serem ligados a uma evidência específica, possuem como atributos um valor probabilístico (entre 0 e 1) e um conjunto de modos de falha que se relacionam com a natureza dessa evidência. Além disso, foram implementadas as funções clássicas de operações sobre conjuntos, tais como: negação, conjunção e disjunção, para a combinação de evidências. À medida que cada evidência vai sendo analisada dentro de uma regra específica, cria-se pelo menos mais dois corpos de evidências: aquele que atribui uma determinada probabilidade para o subconjunto de modos de falha relacionados e outro com o valor complementar dessa probabilidade associado ao conjunto ambiente (*v.* seção 3.3.3).

Na seqüência, ao se analisar outras evidências, surgem novos corpos de evidência que precisam ser combinados de forma a realizar a manutenção da crença com base nas

probabilidades inferidas e que muitas vezes podem se contradizer. Ao final de cada regra, onde se combinam as novas evidências com as anteriores, e após o passo de normalização, são agrupadas as massas cujos conjuntos são idênticos, somando-se suas probabilidades. No fim do diagnóstico, cada modo de falha verifica se existe algum corpo de evidência (massa) que o contenha para então calcular o seu intervalo evidencial que indicará a faixa de crença que suporta ou refuta a hipótese de sua ocorrência. Foram representados 12 modos de falha possíveis relacionados à performance degradada de um compressor centrífugo.

#### 4.2.2.4 Apresentação dos Resultados

Como a interface utilizada para o desenvolvimento do protótipo foi a do próprio CLIPS, todo o diálogo do sistema com o usuário é realizado através de um *prompt* de comando. As figuras a seguir mostram algumas telas de interação e o formato geral dos resultados gerados pelo protótipo. A Figura 4.4 mostra algumas das mensagens emitidas durante uma análise de performance. A Figura 4.5 mostra o tipo de perguntas relacionadas ao diagnóstico de falhas que o sistema pode fazer ao usuário. A Figura 4.6 apresenta um dos arquivos de resultados gerados ao final de uma execução do sistema protótipo. É importante ressaltar que todos os arquivos de resultados são gerados no formato HTML, o que facilita a sua visualização em qualquer navegador da internet.

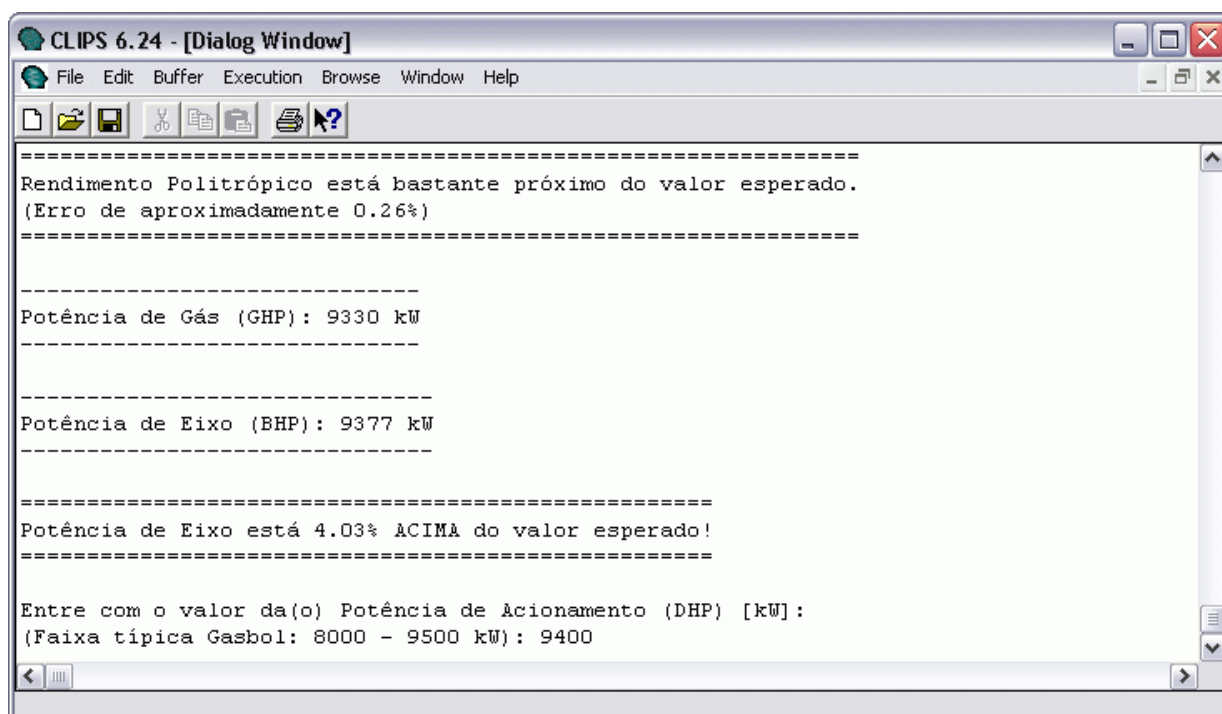


Figura 4.4 - Tela do CLIPS mostrando as mensagens da análise de performance.

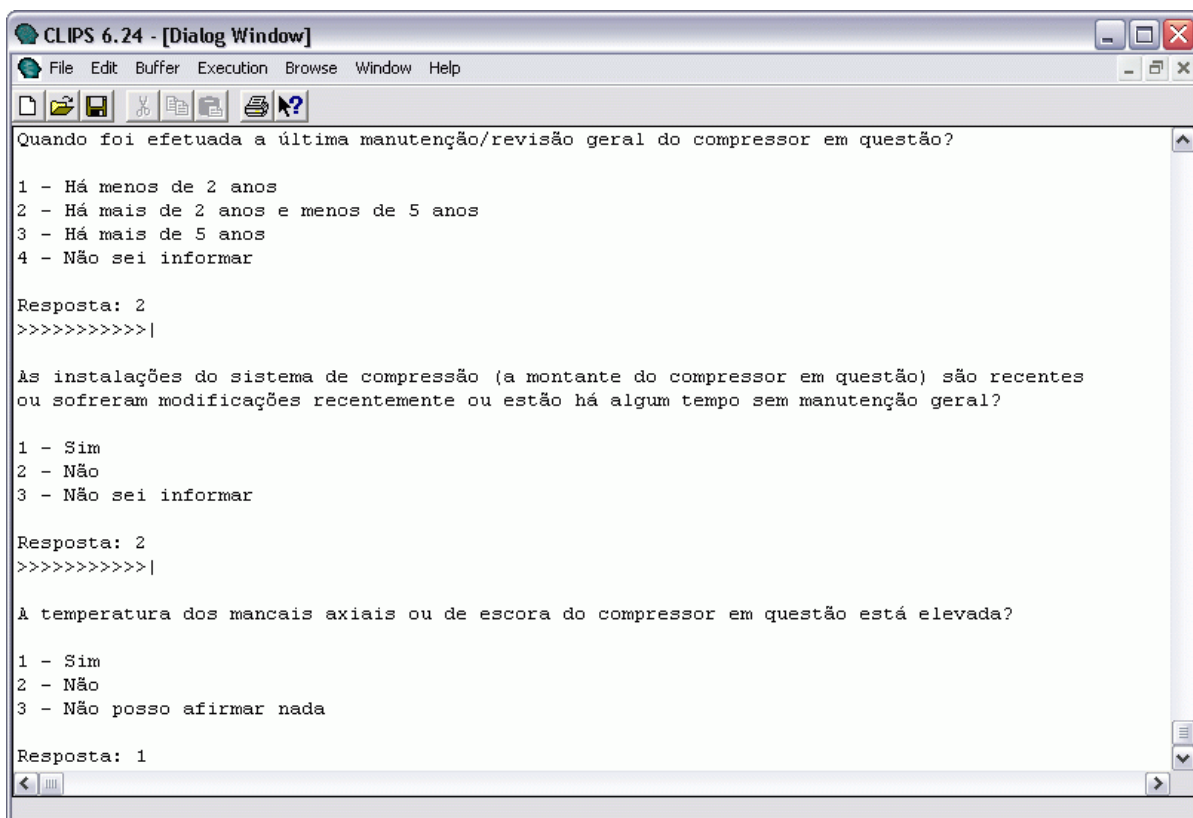


Figura 4.5 - Tela do CLIPS mostrando algumas perguntas ligadas ao diagnóstico de falhas.

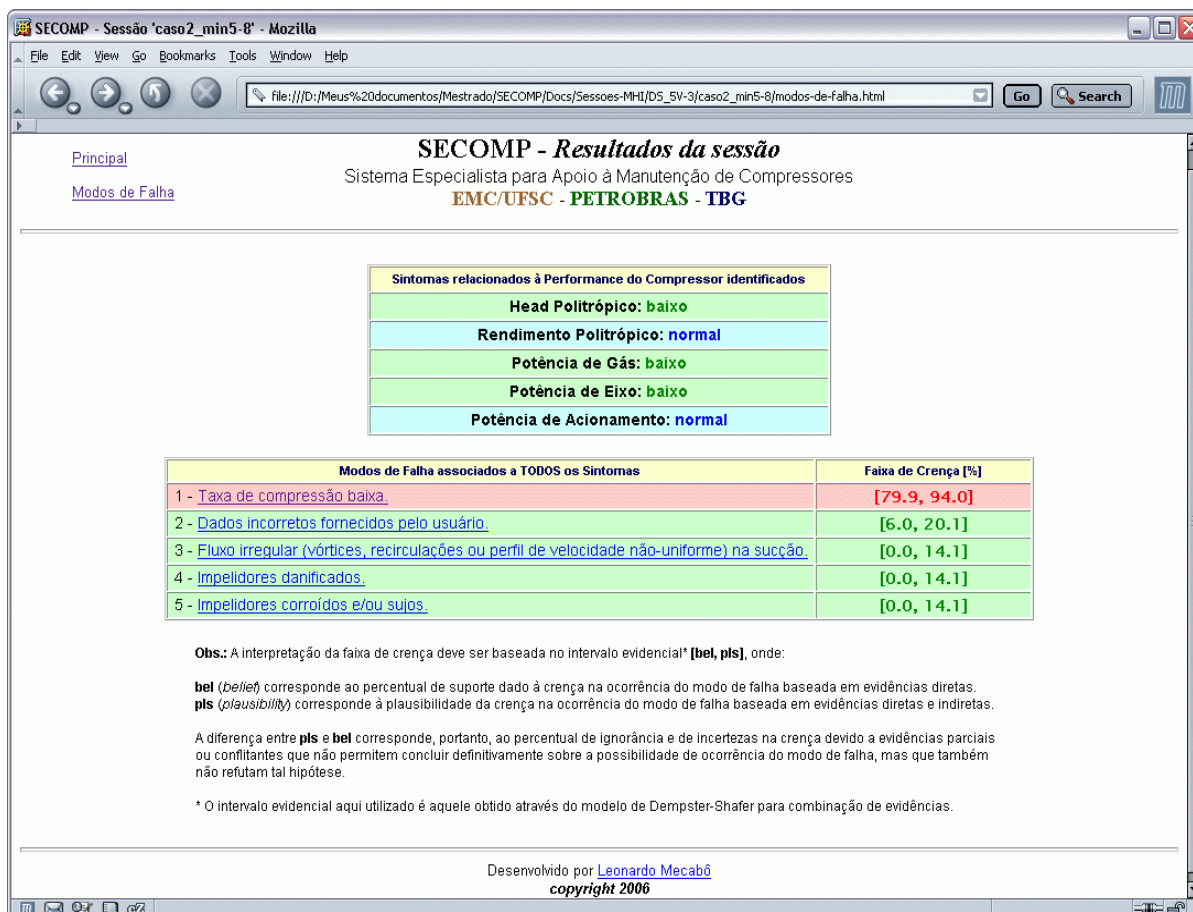


Figura 4.6 - Arquivo HTML mostrando alguns resultados do diagnóstico de falhas.



### 4.3 VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

Como foi descrito na seção 3.2.4, o objetivo da validação de um protótipo de SE, no sentido mais amplo, é determinar se o sistema realiza aquilo para o qual ele foi desenvolvido. No modelo incremental, a validação é a etapa que fecha um ciclo de desenvolvimento do protótipo. No caso deste trabalho, somente um ciclo foi concluído. O especialista que realizou a validação deste protótipo foi também o principal apoio externo a este trabalho de mestrado, o engenheiro Newton Moura que é consultor técnico da Petrobras e possui ampla experiência em compressores de gás natural e turbomáquinas em geral. Ele realizou alguns testes preliminares no protótipo e registrou seus comentários para que pudessem ser analisados neste capítulo. Os principais pontos são apresentados e discutidos a seguir.

#### 4.3.1 Pontos Apresentados pelo Especialista

Nesta seção serão apresentados os comentários do especialista sobre os principais pontos de melhoria que podem ser implementados num próximo ciclo de desenvolvimento do protótipo. Procurou-se manter as palavras utilizadas pelo especialista para se enfatizar o caráter técnico e crítico desta avaliação, e a capacidade de interação do engenheiro de conhecimento para comunicar as formas de se implementar melhorias no sistema a partir do protótipo desenvolvido. Após cada ponto apresentado pelo especialista (em itálico) é feito um comentário para que fique claro que cada avaliação pontual foi considerada e pode potencialmente servir como base para melhorias futuras do sistema especialista.

##### 1 - Sobre as instruções do sistema relativas à análise de performance

*a) Não tenho certeza se o operador irá esperar para ver se não há variação da temperatura de descarga. Creio que o Secomp deveria ler os dados do CLP do compressor e avaliar se o ponto de trabalho está estabilizado.*

**Comentário:** Já foi comentada na seção 4.2.1.7 a possibilidade de se implementar um método de aquisição automática de dados. Esse é um ponto crucial na evolução do sistema para torná-lo uma ferramenta aplicada à MBC. Entretanto, esta é uma típica modificação profunda, não na estrutura do código (como foi demonstrado), mas sim na forma de aquisição de dados que implicaria acesso externo a dados, e que, portanto, deveria ser considerada numa expansão do protótipo num contexto maior de desenvolvimento.

b) Não sei qual a unidade que a TBG usa para pressão. Normalmente na Petrobras usamos ou bar ou  $\text{kgf/cm}^2$ .

**Comentário:** A decisão sobre qual unidade utilizar no protótipo foi baseada nos dados do GASBOL. Entretanto, essa é uma questão simples de ser resolvida, já que uma pequena rotina pode fornecer ao usuário a opção de escolher a unidade de sua preferência..

c) Os fatores de compressibilidade bem como os calores específicos (ou o coeficiente isoentrópico) geralmente não são de fácil aquisição pela Operação. Existem fórmulas para cálculo desses dados termodinâmicos, sugiro incorporá-los no software.

**Comentário:** Essa é outra sugestão que foi brevemente abordada anteriormente. De fato esses valores não são obtidos de forma direta, mas possuem métodos bem conhecidos, estabelecidos inclusive em normas (para a obtenção dos fatores de compressibilidade, por exemplo). Porém, sabe-se que existem alguns aplicativos disponíveis comercialmente que calculam esses parâmetros com bom nível de precisão, e por isso a escolha por implementar esses cálculos numa fase inicial do sistema é algo a ser estudado em termos de esforço e prioridade de desenvolvimento.

## 2 - Sobre a tabela com a composição molar padrão do GASBOL

a) Normalmente chamamos de Peso Molecular e não Massa Molar. A abreviação é MW (Molecular Weight).

**Comentário:** De fato a literatura, principalmente a americana, se refere a esse parâmetro dessa forma, ou seja, peso molecular. No entanto, do ponto de vista dimensional, a grandeza correta é a massa molar, cuja unidade no SI é o  $\text{kg/mol}$ . Do ponto de vista numérico, essas grandezas são idênticas. Para o usuário final, o mais importante é que ele entenda os dados que estão sendo pedidos ou fornecidos, por isso pode ser adequado fazer a modificação dessa nomenclatura.

## 3 - Sobre a interface de aquisição de dados

a) Acredito que a faixa informada no programa para o fator de compressibilidade, no caso do GASBOL, só exista porque está se avaliando um compressor do Gasbol. É importante ter uma opção para que essas perguntas sejam genéricas e aplicáveis para qualquer compressor.

**Comentário:** Essa é uma questão de limitação de dados disponíveis. À medida que o sistema estenda sua aplicação para outras máquinas, outras faixas de valores podem ser fornecidas. A idéia por trás da faixa de valores é, além de orientar um usuário qualquer durante a aquisição de dados do processo, definir limites típicos e físicos para que o sistema possa julgar de que forma o nível de uma medida influencia nos resultados gerados pelo diagnóstico de falhas.

*b) Entrei com o valor negativo para o Z na descarga. Termodinamicamente isso não ocorre, portanto sugiro colocar uma faixa de Z real para que o programa possa checar se não se entrou com dado que fisicamente não existe. Idem observação acima para os parâmetros temperatura (sucção e descarga), pressão (sucção e descarga) e rotação. Inclusive entrei com pressão de descarga menor do que a pressão de sucção, e o sistema aceitou.*

**Comentário:** Nesta fase inicial do sistema optou-se por não dedicar muitos esforços na verificação de dados do processo, pois o mais importante é saber “o quê” e “como” realizar as análises propostas. Mesmo assim, no caso de valores fisicamente irreais, o sistema gera um alerta sobre essa inconsistência no momento da entrada do dado. Por fim, o usuário é quem decide se quer incluir o dado fora dos limites físicos. Entretanto, a verificação de algumas inconsistências pode e deve ser facilmente implementada para evitar alguns tipos de erros do usuário.

#### **4 - Sobre os resultados da análise de performance**

*a) Não sei o que significa Capacidade às condições de sucção.*

**Comentário:** O termo capacidade é bastante utilizado em inglês para fazer referência à vazão volumétrica de compressores em geral. Entretanto, por falta de informações sobre a sua definição técnica no caso de compressores dinâmicos, optou-se por definir a capacidade como a relação entre a vazão volumétrica e a rotação do compressor, já que não é possível afirmar se a capacidade da máquina está baixa ou alta se essa não for comparada à rotação. Por exemplo, no caso de uma das máquinas do GASBOL, uma vazão volumétrica de 6500  $\text{Im}^3/\text{h}$  pode ser baixa para uma rotação de 9000 rpm, mas seria considerada alta para uma rotação de 5500 rpm. Além disso, no caso de gases, é imprescindível adotar uma referência para a quantificação do volume, dado que essa variável depende grandemente da pressão e da temperatura. Foram adotadas as condições da sucção porque esse é o caso mais comum na literatura e documentação técnica, por isso o  $\text{Im}^3$  (do inglês, *inlet*). Existem outros padrões como o  $\text{Nm}^3$  (para as CNTP), o  $\text{Sm}^3$ , (do inglês, *standard*), o  $\text{Am}^3$  (do inglês, *actual*) e

inclusive o Pm<sup>3</sup> (Petrobras). Contudo, é necessário discutir a utilização desse termo dado que o próprio especialista apresentou dúvida quanto ao sentido do seu uso.

*b) O software calculou a eficiência, e chegou a 172.8%, o que é um absurdo. O sistema deveria dar um aviso de que houve algum erro de leitura, pois a máquina nunca poderia dar essa eficiência. Deveria colocar uma faixa de eficiência aceitável para compressores centrífugos (talvez algo entre 50 e 92% - confirmar em literatura, estou considerando também compressor axial, que tem eficiência mais alta do que o centrífugo).*

**Comentário:** Novamente aparecem aqui os resultados inconsistentes advindos de valores incorretos que foram propositalmente inseridos pelo usuário. Como foi comentado, não se investiu muito em análise da coerência dos dados, pois essa não é uma questão importante nesta fase do protótipo. O ideal seria que, na avaliação da análise de performance, fossem realizados testes nas máquinas do GASBOL por um especialista da empresa-alvo, mas infelizmente não houve cooperação dessa na avaliação do protótipo. Entretanto, o especialista tem razão quanto aos valores aceitáveis de eficiência, e esses devem ser verificados em versões posteriores.

## **5 - Sobre o diagnóstico de falhas**

*a) A pergunta: As instalações do compressor são recentes ou sofreram mudanças recentes ou estão há algum tempo sem sofrer manutenção. As respostas Sim e Não são para quê? Sim, as instalações do compressor são recentes ou Sim, sofreram mudanças recentes ou Sim, estão há algum tempo sem sofrer manutenção. Não ficou claro.*

**Comentário:** Essa é uma pergunta assumidamente complexa, mas o efeito prático dela no sistema (neste nível de desenvolvimento) significa apenas que é possível que um modo de falha em algum componente da tubulação à montante (do compressor) esteja induzindo um modo de falha no compressor devido a uma mudança no padrão de escoamento do gás que atinge o bocal de sucção. No Capítulo 2, quando se trata da MBC, é ressaltada a dificuldade de obtenção de dados de eventos automaticamente. Essa é uma pergunta que tipicamente envolve eventos ligados às instalações da linha de compressão que devem ser registrados num sistema de gestão das informações de manutenção (CMMS) para que se “deduza” as possíveis influências geradas pelos sistemas adjacentes nas causas de baixa performance do compressor. À medida que mais informações específicas sobre as instalações de cada linha

são disponibilizadas, pode-se elaborar perguntas mais claras, cujas respostas sejam mais objetivas, ou até mesmo eliminá-las com uma futura integração do SE a um CMMS.

*b) A pergunta: Há algum vazamento de gás perceptível na caixa de mancais. Dependendo do tipo de selagem, essa pergunta não tem muita razão de existir. Por exemplo, se for um selo a gás (Dry Gas Seal), existe um “vent” com monitoração de pressão que deixa escapar o gás para local seguro. Se o selo falhar o sensor de pressão detecta um aumento de pressão e manda parar a máquina. Se for um selo “molhado”, ou seja, o selo é lubrificado pelo óleo de selagem, existe uma saída do óleo que está contaminado com o gás para um sistema de separação óleo-gás com monitoração de pressão. Se o selo falhar, o sensor de pressão detectará o aumento de pressão e irá mandar um sinal para parar a máquina. Desconheço para as máquinas que trabalham com gás natural se existe a possibilidade de que, falhando o selo, irá vazar gás para os mancais.*

**Comentário:** Esse é o típico conhecimento que se deseja representar em um SE. Quando o especialista descreve as formas de detecção de falhas dos dois tipos de selos ele aponta também as variáveis (basicamente pressões) que monitoram o seu funcionamento. Esse tipo de explicação permite que a base de conhecimento seja refinada e indica o que monitorar no contexto de uma ferramenta de MBC. Provavelmente, da forma como este modo de falha foi representado, a pergunta feita pelo sistema deverá ser modificada para se adequar à realidade desses tipos de sistema de selagem.

*c) Respondi as diversas perguntas sobre possíveis problemas mecânicos da máquina, mas o sistema não me forneceu nenhuma resposta, ou sugestão. Para quê serve isso então?*

**Comentário:** Neste nível de detalhamento dos modos de falhas representados, as perguntas sobre os problemas mecânicos do compressor são bastante diretas sem que haja a necessidade de se explicar após cada pergunta o que se está querendo investigar através dela. O arquivo de resultados trás as explicações sobre a influência da resposta fornecida pelo usuário na probabilidade inferida de um ou mais modos de falha relacionados. Com o crescimento da base de conhecimento esse tipo de retorno ao usuário durante a execução do sistema pode ser importante para aumentar a sua confiança na investigação conduzida pelo sistema.

## **6 - Sobre a apresentação dos resultados**

*a) O que é faixa de crença?*

**Comentário:** Essa é uma das características do modelo de tratamento da incerteza adotado. A faixa de crença (ou intervalo evidencial) é o resultado do tipo de evidências que foram investigadas no diagnóstico de falhas. Ela informa mais do que um número probabilístico que apenas fornece um grau de importância relativo aos demais modos de falha, na medida em que informa também o grau de certeza com que essa probabilidade foi inferida através de uma “medida de dispersão” dos limites inferior e superior desse número. Para fins práticos, pode ser mais adequado se mostrar apenas um número médio, por exemplo, para facilitar a interpretação e a tomada de decisão do pessoal da manutenção, os prováveis usuários do SE.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes realizados no protótipo durante o seu desenvolvimento demonstraram que os seus resultados são satisfatórios tanto do ponto de vista numérico como da qualidade das respostas fornecidas pelo diagnóstico. Por exemplo, os cerca de 30 pontos de operação que foram disponibilizados pela empresa-alvo foram testados no sistema e, embora esses sejam bastante heterogêneos, todos geraram respostas adequadas do sistema. Isso mostra que o protótipo implementado é capaz de processar dados reais e fornecer resultados satisfatórios compatíveis com o nível de conhecimento implementado. Mesmo que a interface do SE tenha muito a evoluir em termos de praticidade, adequação e facilidade de uso, o mais importante é que foi possível representar o conhecimento relacionado à análise de performance e ao diagnóstico de falhas e integrar essas análises de forma a produzir resultados com uma quantificação da incerteza; algo tipicamente associado à capacidade de um SE.

Quanto à avaliação do especialista, é possível observar que os tipos de testes realizados foram mais de verificação do que de validação, já que num primeiro ciclo de desenvolvimento normalmente são detectadas algumas falhas de comunicação e de semântica do conhecimento implementado que desviam o foco da avaliação. A validação desse ciclo seria mais produtiva se fosse conduzida por um especialista ou operador experiente das ECOMP's do GASBOL, para que a análise de performance fosse avaliada segundo dados reais dos seus compressores. Com isso, o diagnóstico de falhas se depararia com uma situação real que permitiria avaliar a qualidade das probabilidades de falha apontadas pelo sistema. De qualquer forma, pôde-se destacar a importância da contribuição de um especialista na avaliação do protótipo, pois é justamente esta interação entre o EH e o EC que refina as necessidades específicas de cada aplicação e enriquece a base de conhecimento de um SE.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A abordagem de IA para a implementação de tecnologias de MBC de turbomáquinas é provavelmente a mais promissora e flexível dentre as possíveis existentes atualmente. As redes neurais e o raciocínio baseado em casos são duas técnicas de IA que dependem de muitos dados disponíveis para serem implementadas. Os SE's e a lógica nebulosa são duas das técnicas que apresentam maior facilidade de implementação e a menor dependência de dados quantitativamente. Entretanto, assim como em outros trabalhos e já amplamente citado por engenheiros de conhecimento, o principal gargalo no processo de desenvolvimento de um SE é a etapa de aquisição de conhecimento. O nível de desenvolvimento do protótipo descrito neste trabalho também foi majoritariamente determinado pelo acesso limitado a dados, informações e, por fim, conhecimento dos especialistas em manutenção de compressores centrífugos de gás natural.

O protótipo de SE que foi desenvolvido neste trabalho propôs, numa primeira etapa, tratar primordialmente os modos de falha advindos de processos de degradação física (desgaste, fadiga, corrosão, acúmulo de sujeira, etc.) que evoluem mais ou menos lentamente ao longo do período de operação de qualquer turbomáquina. Por isso, os sintomas que desencadeiam o diagnóstico de falhas são os efeitos sutis desses modos de falha que não comprometem o funcionamento da máquina, mas que reduzem o nível de eficiência com que ela executa sua função. Mesmo que a profundidade das análises realizadas seja ainda bastante limitada, refletindo a qualidade das informações disponibilizadas para o desenvolvimento do protótipo, considera-se que o sistema desenvolvido atingiu o seu objetivo de representar e implementar o conhecimento relacionado à performance aero/termodinâmica e ao diagnóstico de falhas de compressores centrífugos em específico.

Sendo assim, cabe a este capítulo destacar as principais conclusões que se obteve com o desenvolvimento deste trabalho, o qual apresenta a implementação de um protótipo de SE para a MBC de turbomáquinas, além de demonstrar a adequação e a viabilidade dessa abordagem no tratamento dos tipos de conhecimento envolvidos nas tarefas de manutenção em geral. Os principais pontos a serem destacados são:

- a) A MBC de turbomáquinas não é algo novo e vem sendo cada vez mais demandada com o intuito de continuamente reduzir os custos de O&M que são significativos

nesse tipo de equipamento. A aplicação de SE's é adequada para a implementação da MBC desses equipamentos que, mesmo sendo intensamente instrumentados, não possuem métodos de inspeção diretos que permitam tomar decisões sobre a necessidade de realizar manutenções. Um SE é capaz de realizar análises de naturezas distintas que permitem identificar ineficiências e diagnosticar falhas automaticamente, ao mesmo tempo em que podem fornecer bons subsídios para as decisões de manutenção;

- b) As formas de representação de conhecimento utilizadas favorecem o reuso, a expansão e a comunicação das informações sobre modos de falha que através da FMEA aumentam o nível de conhecimento das pessoas envolvidas nas atividades de O&M e promovem a gestão do conhecimento corporativo que de outra forma se perderia com o afastamento dos profissionais mais experientes da organização. O desenvolvimento de um SE permite que parte desse conhecimento seja explicitada e, mesmo dependendo um bom tempo dos especialistas inicialmente, futuramente facilitará a vida desses profissionais nas suas atividades rotineiras;
- c) O desenvolvimento de um protótipo de SE é uma forma importante de aquisição de conhecimento, pois mesmo que inicialmente haja certo ceticismo sobre a capacidade de fornecer soluções adequadas, esse método permite a percepção do aumento da qualidade dos resultados gerados após cada ciclo de desenvolvimento;
- d) Uma cuidadosa definição inicial das entradas e saídas parciais do sistema é extremamente importante para guiar a implementação incremental de possíveis soluções analíticas e/ou heurísticas para um problema abordado somente por especialistas humanos. Essa foi uma das principais dificuldades encontradas neste trabalho que além de demonstradamente complexo, não obteve a colaboração direta de especialistas da empresa-alvo na especificação de requisitos e nem tampouco no apontamento das soluções empregadas na indústria.

A partir do estudo das principais questões relacionadas à manutenção em geral e das turbomáquinas em específico, e do estado da arte das técnicas mais avançadas de monitoramento da condição desses equipamentos, implementou-se um SE protótipo para o apoio à MBC, a qual implica o uso do elemento computacional no processo de decisão de manutenção. Mesmo admitindo-se que a ordem de grandeza do protótipo desenvolvido não tenha permitido que várias indagações fossem respondidas, pelos motivos já expostos, é possível afirmar que a adequação dessa tecnologia é justificável tão somente pela conhecida



natureza heurística da busca por evidências no problema de diagnóstico e pela capacidade de uma ferramenta *shell* de representar e manipular diferentes tipos de conhecimento, utilizando-se diferentes técnicas de programação. Isto posto, algumas questões decorrentes, ainda que relacionadas a outros tipos de problemas, podem ser propostas como apontamentos para trabalhos futuros.

A primeira recomendação para o avanço deste protótipo é a necessidade de torná-lo um sistema *on-line*, ou seja, um sistema capaz de acessar dados e informações provenientes de outros sistemas computacionais de uma ECOMP, de modo a reduzir a necessidade de intervenção do usuário para responder perguntas relacionadas ao estado de seus próprios equipamentos. Essa é uma questão fundamental que precisa ser avaliada tanto em termos da disponibilidade desses dados e da capacidade dos aplicativos residentes em fornecê-los, como das condições em que o sistema deverá operar (*e.g.*, tempo real, tempo quase real, ativado por eventos, consulta periódica, ativado por demanda, etc.). Embora esse não seja um problema relacionado à tecnologia de SE em si, ele é essencial para a implementação da MBC.

Com relação ao diagnóstico de falhas, e embora tenham sido considerados apenas os modos de falha relacionados à degradação de performance, sabe-se que o número de falhas representadas é ainda bastante reduzido para que o protótipo tenha aplicação imediata. A questão nesse ponto é que não existe um número significativo de evidências a serem investigadas que possibilite que tanto a estrutura de regras de produção como o modelo de tratamento da incerteza adotados sejam satisfatoriamente testados. À medida que o sistema evolua com a representação de outros modos de falha (relacionados a situações de desarme ou ao próprio acionador, por exemplo) pode ser necessária a criação de um mecanismo auxiliar para a otimização da busca por evidências relacionadas às novas causas raízes. Esse é um problema interessante que, provavelmente, provocará uma mudança na estrutura de regras adotada.

Outra sugestão que foi pouco explorada neste trabalho, principalmente pela falta de dados sobre os tempos e as métricas da confiabilidade de turbomáquinas, é a implementação do prognóstico de falhas. Como foi visto, o prognóstico depende da escolha de um modelo que represente adequadamente os dados de eventos confiabilísticos (falhas, perda de eficiência, manutenção, reparo, etc.) para estimar quando uma falha poderá ocorrer segundo certas condições. Nesse caso, tanto os dados de operação ao longo de uma campanha como os dados de eventos no mesmo período, devem ser coletados e devidamente armazenados para

que possam ser derivados os modelos de previsão de falhas. Contudo, o prognóstico envolve manipulações de dados que prescindem da implementação de outras técnicas e procedimentos de cálculo que podem ser identificados previamente à definição desses modelos.

Por fim, fica a recomendação para o desenvolvimento de uma interface gráfica do usuário (GUI) que pode ser bastante melhorada com o uso de gráficos, menus, caixas de seleção, enfim, todo e qualquer tipo de item que proporcione uma interação mais amigável e intuitiva do usuário com o sistema especialista desenvolvido. Nesse ponto, as possibilidades são inúmeras e, portanto, a qualidade da solução oferecida dependerá em grande parte da experiência do(s) desenvolvedor(es) e da escolha da ferramenta de desenvolvimento dessa interface.

## REFERÊNCIAS

ABREU, Percy L. de; MARTINEZ, José A. **Gás natural**: o combustível do novo milênio. Porto Alegre: Plural Comunicação, 1999. 89 p.

AFONSO, Luiz O. A. Análise de falhas de máquinas rotativas: alguns pontos importantes. In: COTEQ - CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 6., 2002. Salvador. **Anais...** São Paulo: ABENDE, 2002. 13 p. Disponível em: <<http://www.aende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE002.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Indústria brasileira de gás natural**: regulação atual e desafios futuros (Séries ANP, No. II). Rio de Janeiro: ANP, 2001. 209 p. ISBN 8588286025.

ALMEIDA JR., Clovis de. **Sistema especialista para diagnóstico de problemas no sistema de geração elétrica de uma refinaria de petróleo**. 2003. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ALONSO, Fernando et al. An incremental solution for developing knowledge-based software: its application to an expert system for isokinetics interpretation. **Expert Systems with Applications**, v. 18, n. 3, p. 165-184, Apr. 2000.

ALVES, Guilherme D. **Sistema especialista protótipo para diagnóstico de falhas em um sistema hidráulico naval**. 2001. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

APPLEBAUM, Ellen; HA'EMEK, Migdal. Fuzzy classification for fault isolation in gas turbine engines. In: JOINT IFSA WORLD CONGRESS AND NAFIPS INTERNATIONAL CONFERENCE, 9./22., 2001. Vancouver, Canada. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2001. v. 1, p. 292-297.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade - terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 37 p.

BENNETT, Bonnie H.; HADDEN, George D. Condition-based maintenance: algorithms and applications for embedded high performance computing. In: EHPC'99 - INTERNATIONAL WORKSHOP ON EMBEDDED HPC SYSTEMS AND APPLICATIONS, 4., 1999. San Juan,

- Puerto Rico. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1999. 22 p. Disponível em: <<http://www.adventiumlabs.org/Publications/condition.pdf>> Acesso em: 7 fev. 2007.
- BETTOCCHI, Roberto et al. Artificial intelligence for the diagnostics of gas turbines - part I: neural network approach. In: ASME TURBO EXPO 2005: POWER FOR LAND, SEA AND AIR, 2005. Reno-Tahoe, Nevada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005a. 10 p.
- \_\_\_\_\_. Artificial intelligence for the diagnostics of gas turbines - part II: neuro-fuzzy approach. In: ASME TURBO EXPO 2005: POWER FOR LAND, SEA AND AIR, 2005. Reno-Tahoe, Nevada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005b. 11 p.
- BILLINTON, Roy; ALLAN, Ronald N. **Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques**. London: Plenum Press, 1983. 355 p. ISBN 0306412969.
- BITTENCOURT, Guilherme. **Inteligência artificial: ferramentas e teorias**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2001. 362 p.
- BLANCHARD, Benjamin S.; VERMA, Dinesh; PETERSON, Elmer L. **Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management**. New York: Wiley-Interscience, 1995. 537 p. ISBN 0471591327.
- BORGES, Joel B. **Desenvolvimento de protótipo de sistema especialista para projeto pneumático**. 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- BROTHERTON, Tom et al. Prognosis of faults in gas turbine engines. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2000. Big Sky, Montana. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2000. v. 6, p. 163-171.
- BUTCHER, Steven W. **Assessment of condition-based maintenance in the department of defense**. Relatório, Logistics Management Institute, Department of Defense, USA. McLean, Virginia, 2000. Disponível em: <[www.acq.osd.mil/log/mrmp/senior\\_steering/condition/LMI%20CBM%20Report.pdf](http://www.acq.osd.mil/log/mrmp/senior_steering/condition/LMI%20CBM%20Report.pdf)> Acesso em: 7 fev. 2007.
- BYINGTON, Carl S. et al. Prognostic enhancements to gas turbine diagnostic systems. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2003. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2003. v. 7, p. 3247-3255.
- CALETTI, Luciano. **Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para projeto de unidades de potência hidráulica**. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CARTER, Richard G. **Compressor station optimization**: computational accuracy and speed. 1996. 23 p. Disponível em: <<http://www.psig.org/papers/1990/9605.pdf>> Acesso em: 7 fev. 2007.

CASTILLO, Eduardo V. **Aplicação de ontologia e sistema especialista para diagnóstico de falhas em transformadores de potência**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Thermodynamics**: an engineering approach. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1994. 987 p. ISBN 0079116523.

CHANDRASEKARAN, Balakrishnan; JOSEPHSON, John R.; BENJAMINS, V. Richard. What are ontologies, and why do we need them? **IEEE Intelligent Systems**, v. 14, n. 1, p. 20-26, Jan.-Feb. 1999.

CLIPS Reference Manual. **Basic programming guide** (volume I, version 6.23). [S.l.: s.n.], 2005. 384 p. Disponível em: <<http://www.ghg.net/clips/download/documentation/bpg.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2007.

CONCEPTS ETI. **Centrifugal compressor design and performance**. Sinopse do curso. Disponível em: <[http://www.conceptseti.com/education/cor\\_compressor.htm](http://www.conceptseti.com/education/cor_compressor.htm)> Acesso em: 7 fev. 2007.

COSTA, Fernando. **Fundamentos sobre gases combustíveis**. Disponível em: <<http://www.krona.srv.br/display05.htm>> Acesso em: 7 fev. 2007.

CRANE, John. **John Crane Seal Sentinel**. Diretório de produtos. Disponível em: <<http://www.sealsentinel.com/Day2-Story4.html>> Acesso em: 7 fev. 2007.

DECOUSSEMAEKER, Pascal. The use of a second-generation expert system based on “case-based reasoning” for the operational support of gas turbine-based power plants. In: ASME TURBO EXPO 2005: POWER FOR LAND, SEA AND AIR, 2005. Reno-Tahoe, Nevada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. 9 p.

DE MARIA, Robert L.; GRESH, M. Theodore. The role of on-line aerodynamic performance analysis. In: TURBOMACHINERY SYMPOSIUM, 35., 2006. Houston, Texas.

**Proceedings...** Houston: Texas A&M University, 2006. p. 55-61.

DEPOLD, Hans R.; GASS, F. Douglas. The application of expert systems and neural networks to gas turbine prognostics and diagnostics. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 121, n. 4, p. 607-612, Oct. 1999.

DIAS, Acires. **Confiabilidade**. Apostila da disciplina (parte I) - EMC 6610 Projeto para a confiabilidade e manutenibilidade, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. Paginação irregular.

FALCO, Reinado de. **Compressores centrífugos e axiais**. Apostila do curso - Performance de grandes máquinas, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, [200?]. 89 p.

FERREIRA, Aurélio B. de H. **Dicionário Aurélio eletrônico - Século XXI** (versão 3.0). Lexicon Informática, 1999.

GANGULI, Ranjan. Application of fuzzy logic for fault isolation of jet engines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 125, n. 3, p. 617-623, July 2003.

GAYME, Dennice et al. Fault detection and diagnosis in turbine engines using fuzzy logic. In: NAFIPS 2003 - INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE NORTH AMERICAN FUZZY INFORMATION PROCESSING SOCIETY, 22., 2003. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2003. p. 341-346.

GE, General Electric Oil & Gas. **Compressors**: a complete range of global solutions. Diretório de produtos. Disponível em: <[http://www.geoilandgas.com/businesses/ge\\_oilandgas/en/prod\\_serv/prod/compressors/en/index.htm](http://www.geoilandgas.com/businesses/ge_oilandgas/en/prod_serv/prod/compressors/en/index.htm)> Acesso em: 15 fev. 2007.

GIARRATANO, Joseph; RILEY, Gary. **Expert systems**: principles and programming. 2nd ed. Boston: PWS, 1994. 644 p. ISBN 0534937446.

GRESH, M. Theodore. **Compressor performance**: aerodynamics for the user. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001. 203 p. ISBN 0750673427.

GRUBER, Thomas R. A translation approach to portable ontology specifications. **Knowledge Acquisition**, v. 5, n. 2, p. 199-220, June 1993.

GÜLEN, Seyfettin C.; GRIFFIN, Patrick R.; PAOLUCCI, Sal. Real-time on-line performance diagnostics of heavy-duty industrial gas turbines. **Journal of Engineering for Gas Turbines**

**and Power**, v. 124, n. 4, p. 910-921, Oct. 2002.

HADDEN, George D. et al. Shipboard machinery diagnostics and prognostics/condition based maintenance: a progress report. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2000. Big Sky, Montana. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2000. v. 6, p. 277-292.

HART, Anna. **Knowledge acquisition for expert systems**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1992. 196 p. ISBN 0070269114.

IENO, Gilberto O. **Estudo preliminar de viabilidade técnica e econômica da conversão da usina termoeletrica Piratininga em ciclo combinado**. 1993. 199 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

JARDINE, Andrew K. S.; LIN, Daming; BANJEVIC, Dragan. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, Oct. 2006.

JAW, Link C. Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step. In: ASME TURBO EXPO 2005: POWER FOR LAND, SEA AND AIR, 2005. Reno-Tahoe, Nevada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. 13 p. Disponível em: <[http://www.scientificmonitoring.com/resources/papers/ASME\\_GT2005.pdf](http://www.scientificmonitoring.com/resources/papers/ASME_GT2005.pdf)> Acesso em: 7 fev. 2007.

JULIANI, Armando C. C. Turbomáquinas: principais modelos e tipos usados em plantas de separação de gases - teoria e prática. In: ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 18., 2003. **Anais...** [S.l.: s.n.], [2003]. 36 p.

KACPRZYNSKI, Gregory J. et al. A prognostic modeling approach for predicting recurring maintenance for shipboard propulsion systems. In: ASME TURBO EXPO, 2001. New Orleans, Louisiana. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2001. 7 p. Disponível em: <[http://www.impact-tek.com/Data/Publications/IGTI\\_2001\\_recurring%20maintenace.pdf](http://www.impact-tek.com/Data/Publications/IGTI_2001_recurring%20maintenace.pdf)> Acesso em: 15 fev. 2007.

KENNEDY, John L. **Oil and gas pipeline fundamentals**. 2nd. ed. Tulsa, Oklahoma: Pennwell, 1993. 366 p. ISBN 0878143904.

KIAMEH, Philip. **Power generation handbook**: selection, applications, operation, maintenance. 1st ed. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2003. 560 p. ISBN 0071396047.

KRAIN, Hartmut. Review of centrifugal compressor's application and development. **Journal of Turbomachinery**, v. 127, n. 1, p. 25-34, Jan. 2005.

KUBIAK S., Janusz; GARCÍA-GUTIÉRREZ, Alfonso; URQUIZA B., Gustavo. The diagnosis of turbine component degradation: case histories. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, n. 17, p. 1955-1963, Dec. 2002.

KUROSAKI, Masahiro et al. Fault detection and identification in an IM270 gas turbine using measurements for engine control. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 126, n. 4, p. 726-732, Oct. 2004.

KURZ, Rainer; BRUN, Klaus. Degradation in gas turbine systems. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 123, n. 1, p. 70-77, Jan. 2001.

LEHMANN, Fritz. Semantic networks. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 23, n. 2-5, p. 1-50, Jan.-Mar. 1992.

LIAO, Shu-Hsien. Expert systems methodologies and applications: a decade review from 1995 to 2004. **Expert Systems with Applications**, v. 28, n. 1, p. 93-103, Jan. 2005.

MAN TURBO. **THM range of gas turbines**: mechanical drive applications. Catálogo promocional. 5 p. Disponível em: <[http://www.manturbo.com/en/700/700\\_index.php](http://www.manturbo.com/en/700/700_index.php)> Acesso em: 7 fev. 2007.

MARCELINO, Jorge C. **Manual de operação da ECOMP de Corumbá**. Documento interno, Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil, 2005. 124 p.

MARTINS, Lilian A. **Medição de vazão de gás natural por placa de orifício**: avaliação metrológica e impactos econômicos. 2005. 200 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

METTREY, William. A comparative evaluation of expert systems tools. **Computer**, v. 24, n. 2, p. 19-31, Feb. 1991.

MIMOSA. **Machinery Information Management Open System Alliance**. Disponível em: <<http://www.mimosa.org>> Acesso em: 15 fev. 2007.

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance**. 2nd ed. rev. New York: Industrial Press, 2001. 448 p. ISBN 0831131462.

NARDI, Daniele; BRACHMAN, Ronald J. An introduction to description logics. In: \_\_\_\_\_.



**The description logic handbook**: theory, implementation, and applications. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. p. 5-44. Disponível em: <<http://www.sfu.ca/%7Emhatala/iat881/papers-/nardi-dlhb-01.pdf>> Acesso em: 7 fev. 2007.

PASSOS, Alexandra dos. **Sistema especialista aplicado à assistência técnica**: estudo de caso em uma organização fabricante de produtos de telecomunicações. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

PRAÇA, Eduardo R. **Distribuição de gás natural no Brasil**: um enfoque crítico e de minimização de custos. 2003. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

RIBEIRO, Robison. T.; PINTO, Nancy. F. A. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada em instalações de gás natural do gasoduto Bolívia Brasil. **Petro & Química**, n. 261, jun. 2004. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/artigos/artigos\\_view2.asp?cod=527](http://www.gasnet.com.br/artigos/artigos_view2.asp?cod=527)> Acesso em: 15 fev. 2007.

ROEMER, Michael J. et al. Development of diagnostic and prognostic technologies for aerospace health management applications. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2001. Big Sky, Montana. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2001. v. 6, p. 3139-3147.

ROEMER, Michael J.; KACPRZYNSKI, Gregory J. Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2000. Big Sky, Montana. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2000. v. 6. p. 345-353.

ROMESSIS, Cristoforos; MATHIOUDAKIS, Kostas. Implementation of stochastic methods for industrial gas turbine fault diagnosis. In: ASME TURBO EXPO 2005: POWER FOR LAND, SEA AND AIR, 2005. Reno-Tahoe, Nevada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. 8 p. Disponível em: <<http://ltt.ntua.gr/papers/gt-2005-68739-pre.pdf>> Acesso em: 7 fev. 2007.

SAKURADA, Eduardo Y. **As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise da árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SARTORIUS. **Bearing Technology**: Tilting Pad Bearings. Diretório de produtos. Disponível em: <<http://www.sartorius.com/bearing-technology/tilting-pad-bearings.html>> Acesso em: 7 fev. 2007.

SENTZ, Karl; FERSON, Scott. **Combination of evidence in Dempster-Shafer theory**. Relatório, Sandia National Laboratories, Department of Energy, USA. Albuquerque, New Mexico and Livermore, California, 2002. Disponível em: <<http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2002/020835.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2007.

SETHIYA, Satish K. **Condition based maintenance**. 2005. 25 p. Disponível em: <<http://irsme.nic.in/files/cbm-sethiya.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2007.

SILVA, Jonny C. da. **Expert system prototype for hydraulic system design focusing on concurrent engineering aspects**. 1998. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

\_\_\_\_\_. **Sistemas especialistas aplicados à engenharia**. Apostila da disciplina - EMC 6607 Sistemas especialistas aplicados à engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 65 p. Disponível em: <[http://www.laship.ufsc.br/jonny/sist\\_esp/sist\\_esp.pdf](http://www.laship.ufsc.br/jonny/sist_esp/sist_esp.pdf)> Acesso em: 15 fev. 2007.

SILVA, Jonny C. da; CALETTI, Luciano; LUNA, Paulo de T. M. Sistema especialista para apoio à manutenção de compressores. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2004. Rio de Janeiro. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. 8 p.

SILVA, Jonny C. da; PORCIÚNCULA, Gilson S. Sistema especialista para gerenciamento de redes de transporte de gás natural. In: RIO PIPELINE CONFERENCE AND EXPOSITION, 2003. Rio de Janeiro. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. 8 p.

SILVA JR., Alvino C. da; SILVA, Jonny C. da. Integração entre sistemas especialistas e simulação para o monitoramento de redes de transporte de gás natural. In: CONEM 2002 - CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., 2002. João Pessoa. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. 10 p.

SIMANI, Silvio. Identification and fault diagnosis of a simulated model of an industrial gas turbine. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 1, n. 3, p. 202-216, Aug. 2005.

SIMANI, Silvio; FANTUZZI, Cesare; SPINA, Pier R. Application of a neural network in gas turbine control sensor fault detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 1998. Trieste, Italy. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 1998. v. 1, p. 182-186.

SMITH, Anthony M. **Reliability-centered maintenance**. Boston: McGraw-Hill, 1993. 216 p. ISBN 007059046X.

- SMITH, Marc T. **Potential failure mode and effects analysis**. Apresentação, Cayman Systems. 1998. 113 p. Disponível em: <<http://www.fmeainfocentre.com/handbooks/FMEA-N.pdf>> Acesso em: 7 fev. 2007.
- STAHLEY, John S. **Design, operation, and maintenance considerations for improved dry gas seals reliability in centrifugal compressors**. 2003. 15 p. Disponível em <<http://www.dresser-rand.com/e-tech/turbo.asp>> Acesso em: 7 fev. 2007.
- STARR, Rodrigo R. **Contribuições para a detecção de vazamentos em tubulações de gás natural: uma abordagem baseada em conhecimento**. 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- STUDER, Rudi; BENJAMINS, V. Richard; DIETER, Fensel. Knowledge engineering: principles and methods. **Data & Knowledge Engineering**, v. 25, n. 1-2, p. 161-197, Mar. 1998.
- SUN, Chiki L. et al. An integrated expert system/operations research approach for the optimization of natural gas pipeline operations. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 13, n. 4, p. 465-475, Aug. 2000.
- SURENDER, Vellore P.; GANGULI, Ranjan. Adaptive myriad filter for improved gas turbine condition monitoring using transient data. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 127, n. 2, p. 329-339, Apr. 2005.
- TASSELI, Sabrina et al. Subsea centrifugal compressor development - breakthrough technology for oil and gas offshore production. In: TURBOMACHINERY SYMPOSIUM, 31., 2002. Houston, Texas. **Proceedings...** Houston: Texas A&M University, 2002. 8 p.
- TBG, Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. **Excelência: o caminho da TBG**. Material institucional, set. 2004.
- TUMER, Irem Y.; STONE, Robert B.; BELL, David G. Requirements for a failure mode taxonomy for use in conceptual design. In: ICED 03 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 14., 2003. Stockholm, Sweden. **Proceedings...** Stockholm: Design Society, 2003. 11 p.
- VEER, Timot; BOLLAND, Olav. Reliability and availability: a challenge of increasing importance for energy industry. In: ECOS 2003 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COSTS, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL

IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 16., 2003. Copenhagen, Denmark. **Proceedings...** Copenhagen: University of Denmark, 2003. 10 p.

VELÁZQUEZ, Sílvia M. S. G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil.** 2000. 191 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

VINADÉ, Cesar A. do C. **Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista.** 2003. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

WATERMAN, Donald A. **A guide to expert systems.** Reading: Addison-Wesley, 1986. 419 p. ISBN 0201083132.

WAGNER, William P.; CHUNG, Q. B.; NAJDAWI, Mohammad K. The impact of problem domains and knowledge acquisition techniques: a content analysis of P/OM expert system case studies. **Expert Systems with Applications**, v. 24, n. 1, p. 79-86, Jan. 2003.

WAGNER, William P.; OTTO, James; CHUNG, Q. B. Knowledge acquisition for expert systems in accounting and financial problem domains. **Knowledge-Based Systems**, v. 15, n. 8, p. 439-447, Nov. 2002.

WIKIPEDIA. **A enciclopédia livre.** Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org>> Acesso em: 7 fev. 2007.

WRIGHT, Shaun; SOMANI, Mahesh; DITZEL, Chris. **Compressor station optimization.** 1998. 37 p. Disponível em: <<http://www.psig.org/papers/1990/9805.pdf>> Acesso em: 7 fev. 2007.

XU, Kai et al. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 75, n. 1, p. 17-29, Jan. 2002.

ZWEBEK, Ali I.; PILIDIS, Pericles. Degradation effects on combined cycle power plant performance - part III: gas and steam turbine component degradation effects. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 126, n. 2, p. 306-315, Apr. 2004.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – ESTRUTURA BÁSICA DE UMA ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO

O objetivo deste apêndice é apresentar os sistemas que compõem uma estação de compressão de gás natural com o intuito de descrever, em linhas gerais, a função de cada sistema e em especial o sistema de compressão, objeto de estudo e análise do presente trabalho. Esse tipo de descrição pode servir como base para um processo de análise de sistemas, como o descrito no Apêndice B, para a aplicação da MCC – essa política de gestão da manutenção que fornece os alicerces e o contexto da aplicação deste protótipo.

Os principais sistemas de uma estação de compressão típica do GASBOL serão descritos a seguir com base em Marcelino (2005). Na Figura A.1, uma foto aérea da estrutura física típica de uma estação de compressão do GASBOL. São eles:

- a) Sistema de Entrada e Saída de Gás Natural;
- b) Sistema de Tratamento de Gás de Utilidades;
- c) Sistema de Compressão de Gás Natural;
- d) Sistema de Ar Comprimido;
- e) Sistema de Geração e Distribuição de Energia Elétrica;
- f) Sistema de Alívio e Despressurização de Emergência;
- g) Sistema de Supervisão e Controle.



Figura A.1 - Vista aérea de uma estação de compressão do GASBOL.  
Fonte: TBG, 2004.

### A.1 SISTEMA DE ENTRADA E SAÍDA DE GÁS NATURAL

Esse sistema é composto pelas válvulas de entrada e saída da ECOMP, incluindo seus desvios de equalização, *scrubber* para a filtragem e remoção de condensados do gás de entrada, tubulações até os coletores de sucção e de descarga dos compressores, linha de recirculação entre os coletores, e as derivações para as válvulas de despressurização da estação. A função desse sistema é permitir o alinhamento da ECOMP para a partida, manutenção e parada operacionais, assim como regular a qualidade do gás que nela entra. Um esquema ilustrativo da estrutura funcional de uma ECOMP, apresentado na Figura 1.3, permite a visualização da maioria dos seus componentes.

### A.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE GÁS DE UTILIDADES

Esse sistema tem a função de adequar a temperatura e a pressão do gás combustível para os motores dos geradores elétricos, além do gás combustível e de partida a ser utilizado pelas turbinas do sistema de compressão. Para evitar a condensação dos componentes mais pesados nas linhas de suprimento de gás combustível, o que pode ocorrer com a queda de temperatura durante a expansão na redução de pressão, a temperatura do gás é elevada antecipadamente através de aquecedores, que são basicamente trocadores de calor com serpentinas imersas em banho de água, a qual é aquecida através de queima controlada de gás combustível, onde o gás que circula pelas serpentinas é aquecido pela transferência de calor da água quente.

### A.3 SISTEMA DE COMPRESSÃO DE GÁS NATURAL

A função do sistema de compressão é aumentar a pressão do gás natural transportado pelo gasoduto, recuperando-a para níveis operacionais aceitáveis que viabilizem a funcionalidade do sistema como um todo. A partir do coletor de sucção o fluxo de gás natural passa por uma válvula de bloqueio antes de entrar no tramo retificado do filtro da sucção do compressor. Ao entrar no compressor o gás é comprimido e sai pela descarga em direção às câmaras de entrada dos resfriadores, nas quais o fluxo é distribuído pelos tubos aletados das células de resfriamento. Após a saída dos resfriadores estão conectadas duas derivações: uma para o ciclo do sistema *anti-surge*, com uma válvula de controle, e outra para a torre de *vent* onde o gás é disperso para atmosfera no caso de despressurização do compressor ou descarga

de válvulas de segurança. Esse ciclo é normalmente reproduzido em mais de um tramo paralelo para atingir a capacidade de vazão volumétrica requerida pelo gasoduto. A Figura A.2 ilustra um esquema funcional simplificado, mostrando também os instrumentos principais necessários para a supervisão e operação desse sistema.

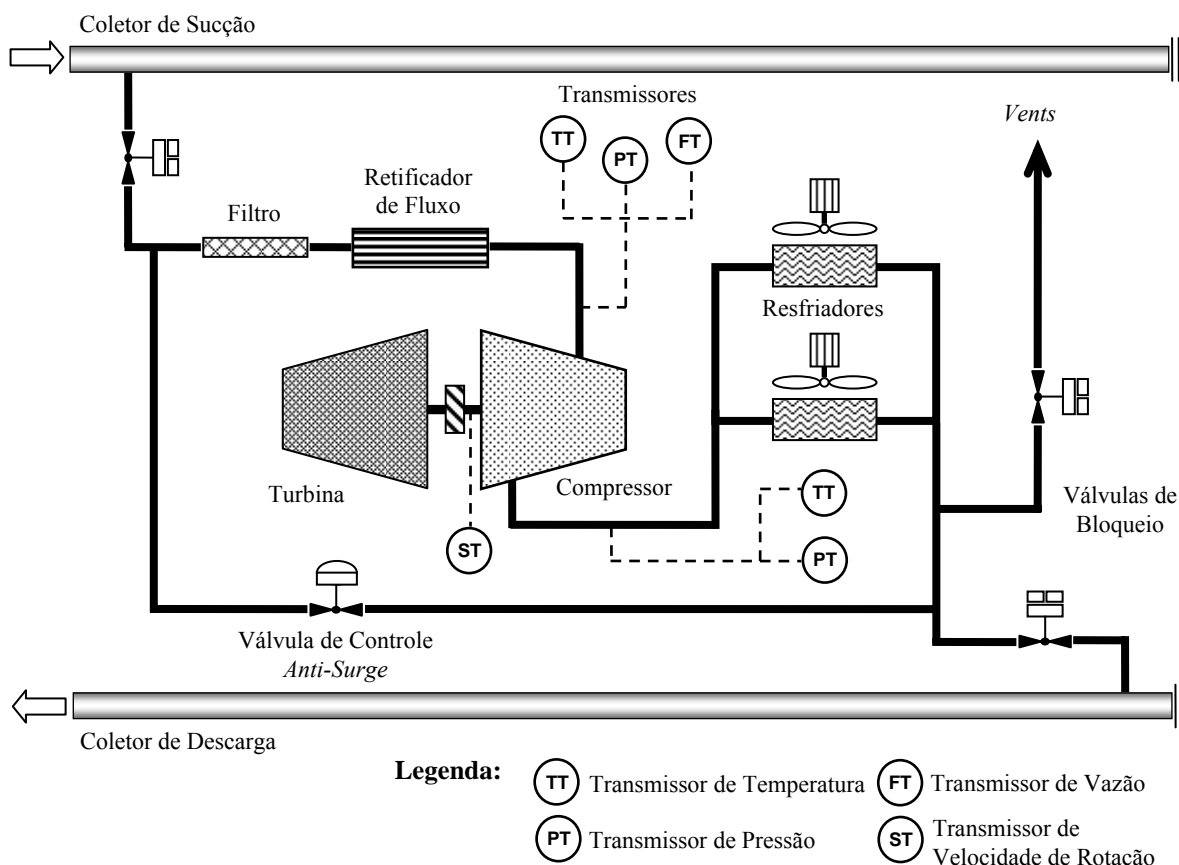


Figura A.2 - Esquema funcional simplificado do sistema de compressão.  
 Fonte: adaptado de TBG, 2004.

#### A.4 SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Esse sistema possui a função de fornecer o ar de instrumento e de serviço para as mais diversas funcionalidades da ECOMP. Dentre algumas, pode-se citar a operação automática de válvulas de bloqueio, a purga de filtros, a operação dos instrumentos e do sistema de selagem dos compressores, entre outros. O processo de compressão nesse sistema se dá, sucintamente, da seguinte forma: o ar atmosférico é captado pela sucção dos compressores de ar e, após comprimido, é encaminhado para a entrada do vaso pulmão que o armazena. A partir da saída do vaso pulmão, o fluxo de ar comprimido é desviado para as derivações do ar de serviço e dos tramos de filtragem. Após a remoção de condensados nos elementos filtrantes, o ar



comprimido é direcionado para os secadores para a remoção de vapor d'água e daí o fluxo passa novamente por filtros até ser direcionado para os instrumentos e sistemas que dele necessitam. Um esquema funcional simplificado é ilustrado na Figura A.3.

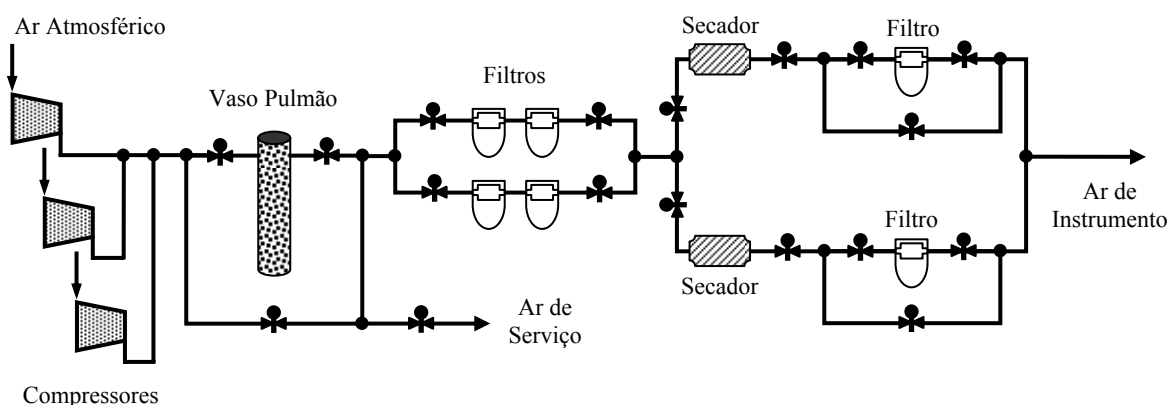


Figura A.3 - Esquema funcional simplificado do sistema de ar comprimido.  
Fonte: adaptado de MARCELINO, 2005.

#### A.5 SISTEMA DE GERAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Como o próprio nome propõe, a função desse sistema é fornecer energia elétrica para os demais sistemas da ECOMP. A energia elétrica é proveniente de um sistema de geração e distribuição próprio, constituída por motogeradores e UPS's (*Uninterruptible Power System*) que, em caso de *blackout*, suprem energia para os sistemas vitais, proporcionando condições para uma parada segura dos equipamentos, mantendo-os em condições de retorno à operação quando restabelecido o suprimento de energia principal. Os geradores são equipados com bancos de resistência para garantir uma carga mínima evitando sobretensões. Possuem também resistências de aterramento, cuja finalidade é limitar as correntes de curto circuito. O sistema de geração está equipado com um sistema de proteção próprio que monitora as variáveis de frequência, velocidade, sobretensão, subtensão, perda de excitação e proteções do motogerador. O sistema de excitação é controlado por processador digital que monitora a excitação do gerador de acordo com as variações do sistema.

#### A.6 SISTEMA DE ALÍVIO E DESPRESSURIZAÇÃO DE EMERGÊNCIA

Esse sistema tem a função de “ventar”, purgar ou despressurizar o gás contido nas linhas, visando manter um fluxo contínuo necessário à operação normal de certos

equipamentos ou eliminar uma condição insegura dentro da instalação. É constituído de *vent stacks* que são chaminés para a dispersão do gás da despressurização dos compressores, da descarga dos motores de partida das turbinas, da descarga de válvulas de segurança e alívio da ECOMP, entre outros. Esse sistema foi projetado, para ser utilizado em situações de emergência, que justifiquem a necessidade de remoção imediata de todo o gás, contido nas tubulações, tanto do sistema de entrada e saída, quanto dos coletores de sucção e descarga do sistema de compressão.

#### A.7 SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE

A supervisão e o controle são realizados pela ELOS (Estação Local de Operação e Supervisão), que é constituída de microcomputadores rodando o programa aplicativo de operação e supervisão da ECOMP sobre a plataforma do *software* de supervisão. A ELOS comunica-se através de rede *Ethernet* com os CLP's principal e secundário dos turbocompressores, com os CLP's principal e secundário responsáveis pelo compartilhamento de carga entre os compressores (*load share*), com os CLP's primário e secundário de utilidades e CLP *master* dos geradores. A principal função da ELOS é a comunicação de dados entre a estação de compressão e a central de supervisão e controle (CSC). A ELOS possui uma configuração com uma base de dados que está sincronizada com a base de dados da CSC. O servidor da CSC aponta para a ELOS de onde os dados estão em constante atualização com o campo. A ELOS permite também a operação local da ECOMP, através de comandos para ligar, desligar, mudar a seleção dos modos de operação dos equipamentos, alterar os *set points* dos controladores, atuar sobre as válvulas e visualizar o *status* dos equipamentos, valores das variáveis, relatórios, gráficos de tendências, históricos, relatórios de eventos e alarmes, etc.

## APÊNDICE B – GESTÃO DA MANUTENÇÃO EM ECOMP'S

Este apêndice tem por objetivo elucidar as definições e as práticas adotadas pela Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) no sentido de aprofundar a motivação e o contexto da aplicação da Manutenção Baseada na Condição e da FMEA na gestão da manutenção em estações de compressão. A MCC é o pano de fundo deste trabalho e, por isso, suas origens, técnicas e metodologia de análise de sistemas são apresentadas como forma de inserir os resultados deste naquela política de manutenção para uma estação de compressão e, por extensão, para as demais estações e plantas relacionadas ao transporte de gás natural.

A gestão da manutenção, em qualquer que seja o contexto industrial, segue permeada por dois parâmetros fundamentais: a filosofia da empresa, onde estão definidos os princípios que regem os relacionamentos organizacionais, e a política da empresa, que define o caminho, hierarquia, prioridade e sistemática de ação (DIAS, 2004). Blanchard *et al.* (1995) referem a gestão da manutenção à aplicação de planejamento, organização e pessoal apropriados, na implementação do programa e dos métodos de controle para as atividades de manutenção. Atividades específicas incluem a descrição de tarefas a serem cumpridas, a identificação de responsabilidades organizacionais, o desenvolvimento de uma estrutura de desdobramento do trabalho, o agendamento e o desenvolvimento de projeções de custos, revisões do programa e requerimentos de relatórios, entre outras.

Na prática, a gestão da manutenção é implementada numa empresa através da análise dos sistemas produtivos da fábrica ou sistemas operacionais da planta, definindo-se as instalações, máquinas e equipamentos críticos do ponto de vista da produtividade ou continuidade do serviço, levando à definição de procedimentos, técnicas de análise de falhas ou defeitos no produto, pessoal especializado, ferramentas e apoio logístico que farão parte das ações de manutenção nos sistemas técnicos de acordo com a sua prioridade e necessidade de reparo, substituição periódica de componentes, monitoramento da condição operacional e garantia de funcionamento dentro de suas especificações de projeto. Para planejar, implementar, controlar e corrigir o programa de gestão da manutenção de uma forma eficaz e eficiente, as organizações podem utilizar:

- a) Sistemas informatizados, com bancos de dados integrados e aplicativos para agendamento e gerenciamento das atividades de manutenção (*Computerized*

*Maintenance Management System – CMMS / Enterprise Asset Management – EAM*), operando sob redes internas de computadores (LAN);

- b) Treinamento contínuo do pessoal de operação/produção e manutenção;
- c) Terceirização da manutenção de máquinas e subsistemas específicos;
- d) Definição de um departamento de engenharia de manutenção com autonomia e representatividade corporativa; dentre outros.

Dentre as metodologias de gestão da manutenção definidas como tais e mais amplamente difundidas existem duas que merecem destaque: A Manutenção Centrada na Confiabilidade (*Reliability-Centered Maintenance – RCM*), cuja aplicação atual estende-se principalmente aos setores de aviação comercial, geração e distribuição de energia, petroquímica e telecomunicações, e a Manutenção para a Produtividade Total (*Total Productive Maintenance – TPM*), com foco principal no chão-de-fábrica e na manufatura, onde o operador mantém contato permanente com a linha e os equipamentos dos sistemas produtivos. Pelas necessidades deste trabalho, será enfatizada apenas a Manutenção Centrada na Confiabilidade, pois essa é a metodologia de gestão mais adequada para ECOMP's.

## B.1 MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE – MCC

A MCC adota a estratégia da manutenção centrada na função principal, diminuindo ao máximo as ações de manutenção preventiva definidas no tempo, a menos que isto seja para maior segurança, maior disponibilidade e maior eficiência em controlar e prevenir uma falha, buscando sempre menor custo. Esse sistema de gestão utiliza procedimentos como definição das funções primárias e secundárias de cada componente, análise das causas e efeitos dos modos de falha e, por último, aplicação de diagramas lógicos de decisão para se determinar buscas periódicas por falhas ocultas e para a seleção de manutenções preventivas, preditivas e corretivas (MOUBRAY, 2001).

### B.1.1 Definição Básica da Confiabilidade

Mas por que essa metodologia é baseada ou centrada na confiabilidade? Primeiramente é necessário definir a confiabilidade; esse termo que vem sendo utilizado extensivamente nos meios militar e industrial, e que possui uma disciplina exclusiva de engenharia dedicada ao seu estudo, análise e aplicação. A definição de confiabilidade, que a

maioria dos autores (SMITH, 1993; BLANCHARD *et al.*, 1995; DIAS, 2004) tem apresentado, possui quatro elementos fundamentais a serem destacados: “a confiabilidade é a **probabilidade** de que um produto ou sistema irá desempenhar sua função de um **modo satisfatório** durante um dado **intervalo de tempo** quando utilizado sob **condições de uso** especificadas”. Esses quatro elementos serão discutidos a seguir, pois são fundamentais ao entendimento do conceito de confiabilidade de sistemas.

As métricas que definem a confiabilidade de um produto ou sistema revelam a sua natureza probabilística. Para tratar devidamente os dados dentro dessa natureza probabilística há que se organizar informações segundo uma racionalidade tecno-científica de forma a se poder processar estatisticamente os dados e produzir resultados quantitativos e/ou qualitativos a partir de observações empíricas planejadas. Os dados podem ser obtidos através de validações experimentais ou registros das informações ao longo do período de uso. No entanto, é necessário serem coletados e analisados de acordo com uma metodologia estatisticamente apropriada e através de instrumentos matemáticos adequados para a representação dessas informações. O planejamento do tamanho da amostra permitirá estabelecer o nível de significância e o poder do teste, agregando confiabilidade aos resultados experimentais obtidos. Por fim, a validade da análise está diretamente relacionada com a validade do modelo usado para representar o mecanismo de falha (DIAS, 2004). A métrica ou a probabilidade associada à variável confiabilística pode ser exemplificada por:

- a) Número ou taxa de falhas ocorridas num período especificado de uso;
- b) Tempo de uso ou distância percorrida;
- c) Número de ciclos até uma falha ou entre falhas;
- d) Tempo médio até parada ou entre falhas;
- e) Perda de rendimento esperada devido à falha;
- f) Perda de produção esperada devido à falha.

Todo produto ou sistema é projetado primeiramente porque se deseja suprir uma necessidade. Para essa necessidade se desenvolve soluções e a ela é atribuída uma função a ser cumprida durante o ciclo de vida do produto ou sistema. Essa função é convertida em atributos (componentes, mecanismos, fluxos de materiais e energia, etc.) que, em conjunto e/ou sincronia, realizam o efeito desejado dentro das especificações definidas no projeto. As especificações de projeto definem a sua performance (desempenho ou comportamento adequado) que deve ser baseada nas necessidades do cliente ou usuário. Hoje em dia, devido

ao intenso mercado competitivo, a performance de uma máquina ou equipamento é muitas vezes definida pelas necessidades do mercado, forçando o desenvolvimento de produtos voltados a um padrão de referência, como *benchmarking* ou normas regulatórias. Esse padrão pode estar associado à média ou a um critério de medida efetiva que se usa para comparar o comportamento do produto final em relação ao desempenho especificado ou a outros produtos similares. A confiabilidade de um produto ou sistema é, portanto, o resultado da sua capacidade de cumprir de modo satisfatório a performance de uso ou operação especificada no seu projeto e garantida pelo fabricante.

O tempo de missão do produto no ciclo de vida é a métrica que caracteriza a natureza temporal da confiabilidade e é utilizado para definir o intervalo de tempo sobre o qual será calculada a probabilidade de falha ou sucesso. Ele deve ser analisado a partir da premissa básica de que a falha ocorrerá, mais cedo ou mais tarde. Nesse caso, também é importante que seja definido um período padrão ou de referência. Esses períodos podem ser classificados como discretos ou contínuos (DIAS, 2004). Exemplos desses “tempos” podem ser:

- a) Tempo médio até a primeira falha – MTTF (Mean Time To First Failure);
- b) Tempo médio até a falha – MTTF (Mean Time To Failure);
- c) Tempo médio entre falhas – MTBF (Mean Time Between Failure);
- d) Tempo médio entre manutenção – MTBM (Mean Time Between Maintenance);
- e) Número de ciclos de operação;
- f) Distância percorrida;
- g) Tempo de garantia.

Ao analisar a confiabilidade para uma grande quantidade de itens, verifica-se que existe uma enorme variação no comportamento das falhas durante o seu período de uso. Admite-se de forma geral que qualquer item (componente, subsistema ou sistema) pode falhar desde o início da operação ou somente após um período de trabalho. As dispersões em relação à vida são mais bem compreendidas quando estudadas em função da taxa de falhas ( $\lambda$ ) em relação ao período idealizado de uso. A chamada curva da bacia ou da banheira representa de forma genérica os três períodos de uso de um produto (Figura B.1): vida inicial ou juventude (região 1), vida normal ou útil (região 2) e vida final ou senilidade (região 3). Cada curva representa um tipo característico de falhas que podem ocorrer na maioria dos produtos, sendo que a curva global representa a soma das demais.

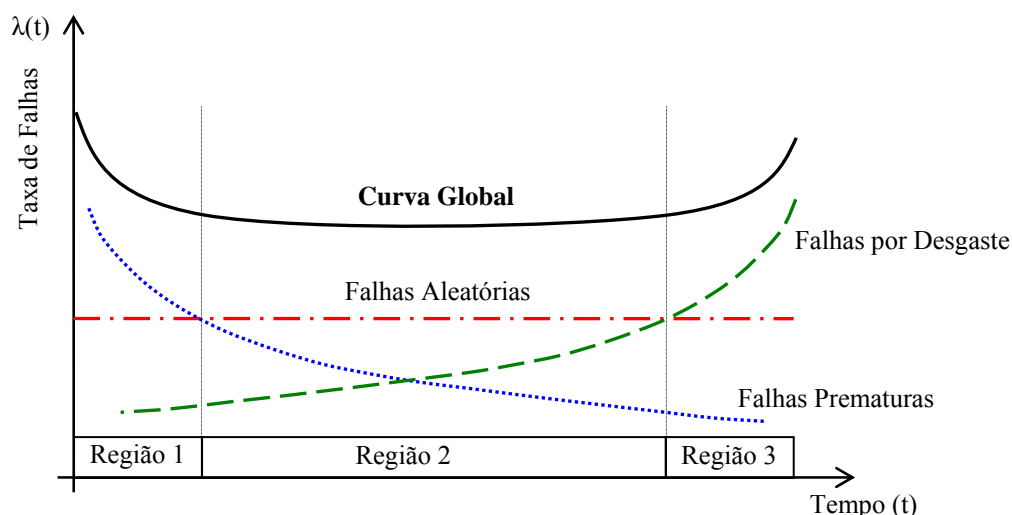


Figura B.1 - Curva da banheira.  
Fonte: adaptado de MOUBRAY, 2001.

Cada produto possui suas próprias regiões conforme o período de uso idealizado e, dependendo da sua natureza (mecânica, elétrica, eletrônica ou combinada), do controle de qualidade na produção e da efetividade das ações de manutenção, podem ocorrer atenuações nas extremidades da curva reduzindo ou aumentando a taxa de falhas nas regiões de juventude e senilidade, assim como a intensidade de uso durante o ciclo de vida pode deslocar a curva verticalmente conforme as solicitações de carga sofridas pelo produto ou sistema (DIAS, 2004).

As condições de operação referem-se à adequação do ambiente de uso do produto àquelas estabelecidas no projeto. Essas condições necessitam serem bem definidas, dado que o sucesso de um evento pode não se manter se as premissas anteriormente estabelecidas forem alteradas. É importante definir padrões e limites de pressão, temperatura, umidade, esforços, deformações, vibrações, choques, número de ciclos, distância percorrida, etc., para garantir a confiabilidade inicialmente proposta. Ou seja, para compreender o ambiente de operação é necessário determinar as restrições às quais está sujeito o produto, capacitar operadores e mantenedores, e gerenciar referenciais de produtividade e econômicos relativos aos propósitos iniciais do sistema técnico.

### B.1.2 Origens da Manutenção Centrada na Confiabilidade

O substancial aumento dos estudos sobre confiabilidade nas últimas décadas deve-se, particularmente, ao aumento dos custos de manutenção e também, às dificuldades inerentes à

complexidade dos equipamentos, os quais envolvem mudanças rápidas de tecnologia. No fim dos anos 60 iniciara a era dos aviões jumbo (com o Boeing 747) capazes de transportar três vezes mais passageiros do que os seus antecessores. Já naquela época, a *Federal Aviation Administration* (FAA) exigia uma certificação de aprovação do programa de manutenção preventiva a ser utilizado pelos proprietários e operadores de aeronaves. Com as novas tecnologias dos grandes aviões, que aumentaram em tamanho e complexidade, a FAA forçou a indústria de aviação comercial a fazer uma reavaliação completa da estratégia de manutenção preventiva aplicada até então, devido aos elevados custos de manutenção que elas teriam para manter as aeronaves em operação. Lideradas pela *United Airlines*, as empresas de aviação civil reuniram-se para discutir e revisar por que a manutenção deveria ser feita e como ela deveria ser conduzida (SMITH, 1993). A partir daí, segundo Moubroy (2001), o nascimento e a evolução da MCC se deram da seguinte forma:

- a) Em 1967, representantes das linhas aéreas, fabricantes e o governo americano apresentaram o MSG-1 (*Maintenance Steering Group*) do qual, destacam-se os seguintes pontos:
  - O objetivo era estabelecer um procedimento adequado de manutenção, de modo a reduzir o tempo de paralisação para manutenção, reduzir os custos de manutenção e melhorar a segurança do voo para o Boeing 747;
  - O MSG-1 estabelecia novos critérios para os programas de manutenção, mudando conceitos que vinham sendo utilizados por mais de 60 anos nas empresas de aviação civil. Propunha, portanto, uma reengenharia da manutenção nas empresas de aviação;
  - Antes do MSG-1 a manutenção era executada sobre cada unidade do equipamento sem considerar sua importância para a função do sistema;
  - No MSG-1 foi reconhecido que as aeronaves apresentavam sistemas complexos com alto índice de redundância. A orientação mudou do exame da função do equipamento para o exame da função do sistema;
- b) Em 1970, um segundo grupo foi formado, o MSG-2, que gerou o *Airline Manufacturer Maintenance Program Planning Document*. Esse comitê generalizava os procedimentos específicos de manutenção do MSG-1 de modo a torná-lo aplicável para todas as aeronaves. Nesse documento foi incorporada a “Árvore de Decisão”, um diagrama que fornece uma seqüência hierárquica de perguntas acerca de uma série de possíveis eventos e de suas saídas. A saída de um



evento conduz para uma ação a ser tomada ou para uma próxima pergunta (Figura B.2);

- c) A partir dos documentos MSG-1 e MSG-2, Nowlan e Heap (1978 *apud* MOUBRAY, 2001) desenvolveram um outro estudo mais detalhado, encomendado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, para a determinação de normas e procedimentos de manutenção, com base numa ampla análise estatística. Os autores denominaram o documento de *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), que foi traduzido para Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC). Este documento, conhecido como MSG-3, tornou-se o marco para a manutenção na indústria aeronáutica.

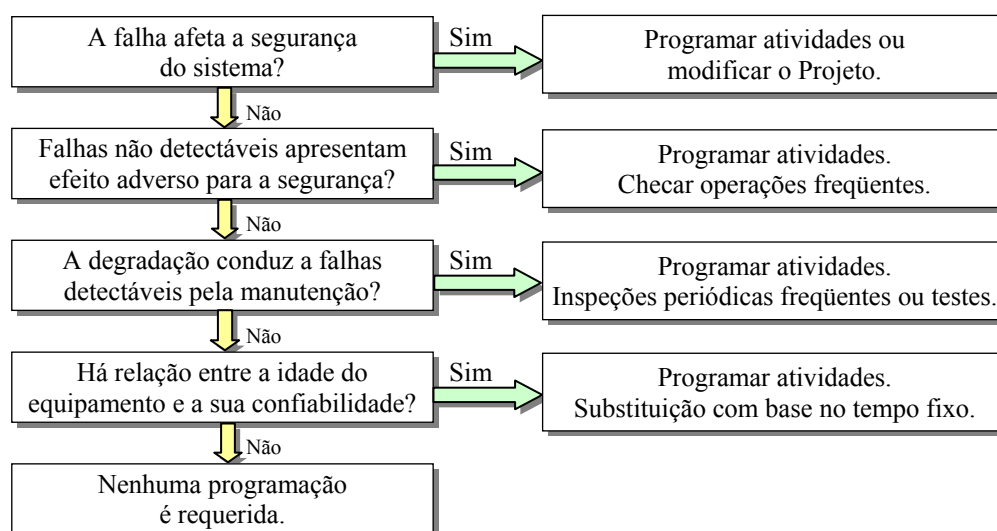


Figura B.2 - Árvore de decisão do MSG-2.  
Fonte: MOUBRAY, 2001.

### B.1.3 A Manutenção Preventiva na MCC

A metodologia da MCC é baseada na definição de tarefas de manutenção preventiva (MP) aplicáveis e efetivas sob os pontos de vista da segurança, da operação e do custo. Entretanto, ela enxerga a MP sob uma outra ótica, diferente da MP tradicional, pois reconhece as antigas deficiências que têm sido reiteradas por programas de manutenção “primitivos”, reativos e alienados. Portanto, a MCC apresenta uma nova maneira de tratar os sistemas e subsistemas de uma planta ou fábrica tendo como ponto de partida para o julgamento de qual tarefa de manutenção aplicar, a sua função global e a consequência das suas falhas funcionais.

Smith (1993, tradução nossa) aponta alguns dos problemas mais comuns relacionados à manutenção tradicional:

- a) **Ação proativa insuficiente.** A vasta maioria do pessoal de manutenção na indústria atua de modo reativo, ou seja, utiliza a manutenção corretiva como filosofia de ação. Embora seja fácil constatar que o maior contribuinte para o aumento do custo unitário é uma combinação do alto custo para recuperar às pressas o estado operacional de um equipamento em pane associado às penalidades advindas da perda de produção, muitas empresas continuam a atuar majoritariamente de forma reativa às paradas resultantes de falhas nos equipamentos da planta;
- b) **Repetição de falhas freqüentes.** Esse problema resulta diretamente do anterior. Como só há tempo para reparar ou recolocar o equipamento, perde-se a oportunidade de entender as causas raízes que resultaram na falha e assim eliminar ou pelo menos reduzir suas ocorrências;
- c) **Trabalho de manutenção errôneo.** O erro é inerente ao ser humano, e nas atividades de manutenção, seja corretiva ou preventiva, ele é mais freqüente do que se imagina. Estudos apontam que 50% das intervenções de manutenção resultam em falhas dos equipamentos da planta;
- d) **Boas práticas de manutenção não-institucionalizadas.** Coletivamente, a indústria tem um bom conhecimento e experiência de como um equipamento deve ser manuseado (por exemplo, como removê-lo da planta, desmontá-lo, repará-lo, remontá-lo e reinstalá-lo). Porém individualmente, somente uma pequena porcentagem desse conhecimento é transmitida e raramente formalizada através de procedimentos e treinamento;
- e) **MP desnecessária e conservadora.** Em alguns casos, as tarefas de MP são totalmente desnecessárias porque elas têm pouca ou nenhuma relação com manter a planta operacional. O problema é que a maioria das plantas não revê suas tarefas de MP com a seguinte pergunta em mente: “Ela é correta?”. A segunda forma desse problema é quando a tarefa é correta, porém muito conservadora, ou seja, é executada com uma demasiada freqüência;
- f) **Razões infundadas para ações de MP.** Infelizmente, a ausência de informação sobre as origens de tarefas de MP ou alguma documentação que permita rastrear claramente sua fundamentação é a regra, e não a exceção;

- g) **Programa de manutenção sem rastreabilidade/visibilidade.** Esse item refere-se à falta de um Sistema de Gerenciamento de Informações de Manutenção ou um CMMS definitivo. No mundo moderno atual dos sistemas computacionais baratos com uma infinidade de softwares disponíveis, não há desculpas para não fazer registros completos das atividades de manutenção executadas e agendadas, bem como dos seus custos associados;
- h) **Aceitação cega das recomendações de OEM.** Quase sempre o fabricante do equipamento original fornece um manual de operação e manutenção com a entrega do produto. Frequentemente, as recomendações de MP de OEM's são lembretes de última hora pouco compreensivos que tem o objetivo primordial de proteger o fabricante de questões ligadas à garantia do produto (essa é a origem da maioria das tarefas de MP conservadoras). Além disso, os OEM's vendem seus produtos para vários clientes, que utilizam esses equipamentos em diferentes aplicações (por exemplo, em regime cíclico ao invés de contínuo, em ambiente úmido ao invés de seco, etc.), sem que haja nenhuma adaptação das recomendações para as suas necessidades específicas;
- i) **Variabilidade de MP entre unidades similares.** Para uma dada empresa pode haver várias plantas ou unidades produtivas em diferentes localidades, compostas por equipamentos idênticos ou bastante similares. Porém, na maioria dos casos seus programas de MP não compartilham procedimentos padrão, treinamento, estoque de sobressalentes, etc., que poderiam ser revertidos em simplicidade de desenvolvimento e redução de custos;
- j) **Falta de aplicações de manutenção preditiva.** Esse tipo de manutenção é também conhecido como monitoramento e diagnóstico da condição, manutenção baseada na condição, e monitoramento da performance onde algum parâmetro relacionado à “saúde” do equipamento é medido de uma forma não-intrusiva e analisado ao longo do tempo, indicando uma situação de falha iminente e permitindo uma ação de manutenção mais precisa e menos prematura.

Os dez problemas apresentados aqui (e outros que poderiam ser adicionados a essa lista) podem ser solucionados em qualquer dimensão de planta ou chão-de-fábrica. Sabe-se, entretanto, que as soluções a serem empregadas requerem uma combinação de habilidades técnicas e de engenharia, assim como de motivação e conscientização da gerência. Em empresas de menor porte, é bastante difícil haver quaisquer desses elementos disponíveis para

enfrentar tais problemas, sendo que muitas vezes, por diversos motivos, eles não são sequer reconhecidos.

Mas por que fazer manutenção preventiva? A esmagadora maioria do pessoal de manutenção dirá: “para prevenir falhas dos equipamentos”. Essa resposta está correta, porém incompleta. Existem duas considerações adicionais e importantes a serem observadas. A primeira é que nem sempre é possível prevenir uma falha, mas muitas vezes pode-se detectar o começo de sua ocorrência. Ou seja, para Smith (1993), a manutenção preditiva também é uma forma de manutenção preventiva. Segundo, embora não seja possível prevenir ou mesmo detectar a ocorrência iminente de uma falha – especialmente em equipamentos instalados e prontos para operar, porém desligados – pode-se fazer uma inspeção para descobrir uma falha oculta em equipamentos redundantes (*standby*).

Portanto, pode-se dizer que existem três razões para se fazer manutenção preventiva: prevenir falhas, detectar o começo de falhas e descobrir falhas ocultas. A partir dessa constatação, a MCC define categorias das tarefas derivadas diretamente das razões anteriores: tarefas baseadas no tempo, tarefas baseadas na condição, testes para descobrir falhas ocultas e manutenção corretiva. A definição de cada categoria é apresentada na seqüência.

#### B.1.3.1 Tarefas Baseadas no Tempo (BT)

Relacionada a primeira razão, é baseada na premissa de que todo equipamento pode ser periodicamente recuperado à condição de “tão bom quanto novo” várias vezes antes de ser necessariamente substituído por um item novo ou melhorado. Dessa forma, a intervalos de tempo rigorosamente especificados, uma tarefa do tipo BT é executada na forma de uma revisão – às vezes bastante completa, extensiva e cara (como a reconstrução de um motor elétrico), e às vezes bastante simples e barata (como alinhamentos e troca de óleo e filtros). Os elementos-chave para que uma tarefa seja classificada como BT são:

- a) A ação da tarefa e sua periodicidade são preestabelecidas e ela será executada sem que nenhum fato adicional interfira no período predeterminado;
- b) A ação é sabidamente benéfica à prevenção ou retardamento de falhas;
- c) A ação da tarefa requer alguma forma de intrusão no equipamento.

#### B.1.3.2 Tarefas Baseadas na Condição (BC)

Quando não se sabe como diretamente prevenir ou retardar a falha de um equipamento – ou é impossível fazê-lo – a melhor forma de evitá-la é detectar o começo de sua ocorrência e tentar prever o ponto no tempo onde a falha provavelmente ocorrerá. Isto é feito através da medição de um parâmetro correlacionado com as condições incipientes de falha. Dessa forma, uma tarefa BC nos adverte para que tomemos uma ação a fim de evitar o evento completo da falha (Figura B.3). Os elementos-chave para que uma tarefa seja classificada como BC são:

- a) Pode-se identificar um parâmetro mensurável correlacionado com o começo da falha;
- b) Pode-se especificar um valor limite desse parâmetro a partir do qual uma ação possa ser tomada antes da ocorrência da falha;
- c) A tarefa de manutenção é não intrusiva em relação ao equipamento.

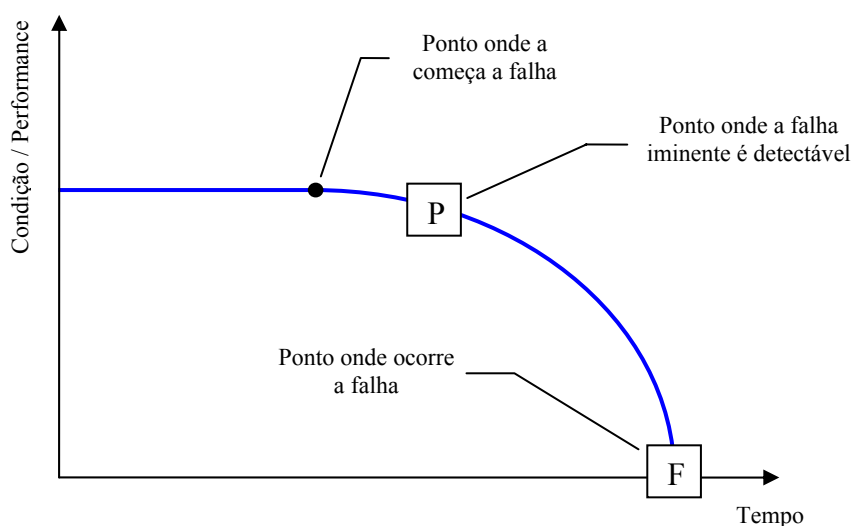


Figura B.3 - Curva de identificação do ponto de falha.

Fonte: adaptado de MOUBRAY, 2001.

### B.1.3.3 Testes para Descobrir Falhas Ocultas (TDF)

Sistemas com redundância passiva (*backup* ou *standby*), sistemas de emergência e equipamentos de uso esporádico constituem-se nas principais fontes potenciais de falha oculta. A falha oculta é advinda do uso intermitente do equipamento ou sistema, cujo funcionamento ativo depende de circunstâncias incomuns ou infreqüentes, como uma falha no sistema principal, uma parada para manutenção, ou ainda um pico de demanda operacional. Como numa emergência não se espera que o sistema substituto apresente uma pane, adota-se uma tarefa de manutenção do tipo TDF para verificar suas condições plenas de

funcionamento. Embora se utilize de um pré-agendamento para executar tal verificação, não são realizadas tarefas de manutenção propriamente ditas, como numa tarefa do tipo BT, nem tampouco monitora-se sua condição incipiente de falha. Essa verificação é geralmente simples, onde uma partida *off-line* do equipamento ou mesmo uma inspeção visual pode ser suficiente para realizar uma verificação de pane, dependendo da complexidade e do comprometimento advindo de uma falha do item no sistema.

#### B.1.3.4 Manutenção Corretiva (MC)

Nesse caso, decide-se deliberadamente que o equipamento deve operar até a ocorrência da falha, sem que nenhum tipo de manutenção preventiva seja executada. Existem três motivos principais para se tomar tal decisão:

- a) Sabe-se que nenhuma tarefa de MP evitará as falhas mais comuns, não importa o quanto haja de dinheiro para investir na sua prevenção;
- b) A tarefa de MP disponível é muito cara. É mais barato consertá-lo quando o item falhar e não há nenhum impacto na segurança;
- c) Quando a falha no equipamento ocorre, sua prioridade de manutenção é baixa.

A MCC é baseada na aplicação dessas quatro categorias de tarefas de manutenção e, como será visto adiante, através dessas é possível tratar quaisquer tipos de falhas que possam ocorrer em um ambiente industrial. Alguns dos benefícios relativos a custos, quando da aplicação de um programa de MCC, podem ser enumerados (SMITH, 1993):

- a) Controle e redução dos custos de O&M;
- b) Redução de paradas de emergência na planta;
- c) Base de documentos do programa de MP para o uso de agências reguladoras, seguradoras e contratos de garantia;
- d) Estoque e identificação de itens sobressalentes mais precisos;
- e) Aumento da disponibilidade<sup>12</sup> na planta;
- f) Planejamento e agendamento de MP's mais eficientes;
- g) Redução nos custos de manutenção corretiva.

---

<sup>12</sup> De acordo com a norma brasileira NBR-5462/1994, “disponibilidade é capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados”.

### B.1.4 O Processo de Análise de Sistemas da MCC

O processo de análise de sistemas da metodologia da MCC será discutido em termos de sete passos que, segundo Smith (1993), é a forma mais conveniente de sistematicamente delinear as informações requeridas e aplicá-las na análise das tarefas de manutenção para a implementação do programa de MCC. As etapas propostas são ilustradas na Figura B.4, e cada passo será brevemente descrito na seqüência.

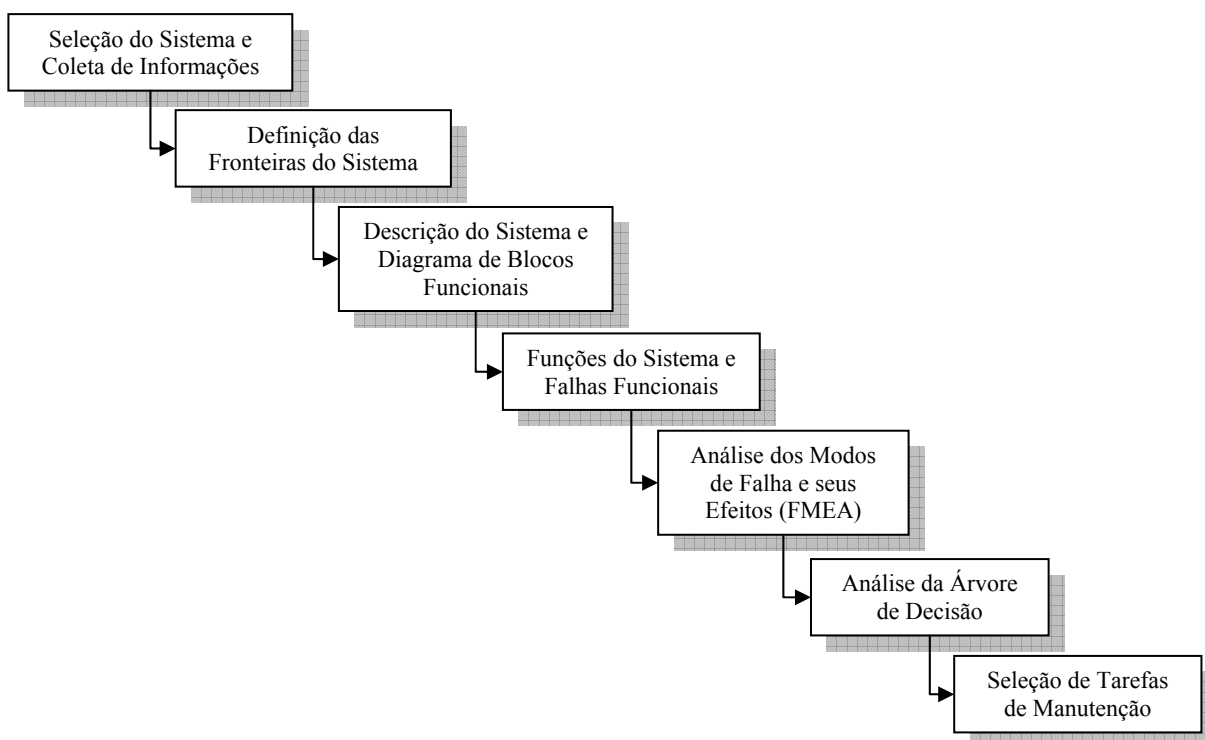


Figura B.4 - Passos para a implementação da MCC.  
Fonte: adaptado de SMITH, 1993.

#### B.1.4.1 Seleção do Sistema e Coleta de Informações

Os níveis de montagem podem ser identificados como componente (*e.g.*, impelidor, mancal), subsistema (*e.g.*, compressor, turbina), sistema (*e.g.*, suprimento de ar comprimido, suprimento de gás combustível) e planta ou fábrica. O nível de sistema é o ponto de partida para o processo de análise da MCC, já que os sistemas apresentam um número significativo de modos de falha a serem priorizados entre si quando se tem em vista recursos limitados para as tarefas de MP. Os primeiros sistemas da planta a serem analisados devem ser aqueles com um número e/ou custo elevado de tarefas de MP e/ou MC, e sistemas críticos dos pontos de vista operacional, de segurança e de questões ambientais. Na coleta de informações, deve-se

utilizar a documentação técnica do sistema como: esquemas e diagramas de bloco funcionais, P&ID's, histórico de falhas dos equipamentos e ações de manutenção efetuadas, manuais do fabricante e de operação, especificações técnicas dos equipamentos, entre outros.

#### B.1.4.2 Definição das Fronteiras do Sistema

Nessa etapa, deve-se relacionar os equipamentos incluídos no sistema juntamente com as principais fronteiras físicas. A definição precisa das fronteiras é um fator importante por dois aspectos. Primeiro, para se ter certeza de que nenhuma função potencialmente importante foi desconsiderada e, segundo, porque a fronteira será o fator determinante no estabelecimento do que entra e do que sai do sistema na forma de fluxo (gás, vapor, ar, torque, eletricidade, etc.), as chamadas interfaces de entrada e saída. A fronteira de um sistema pode ser uma válvula, um flange de exaustão de uma turbina, um coletor de sucção, etc., e as interfaces constituídas por eles serão importantes na construção dos blocos funcionais do próximo passo.

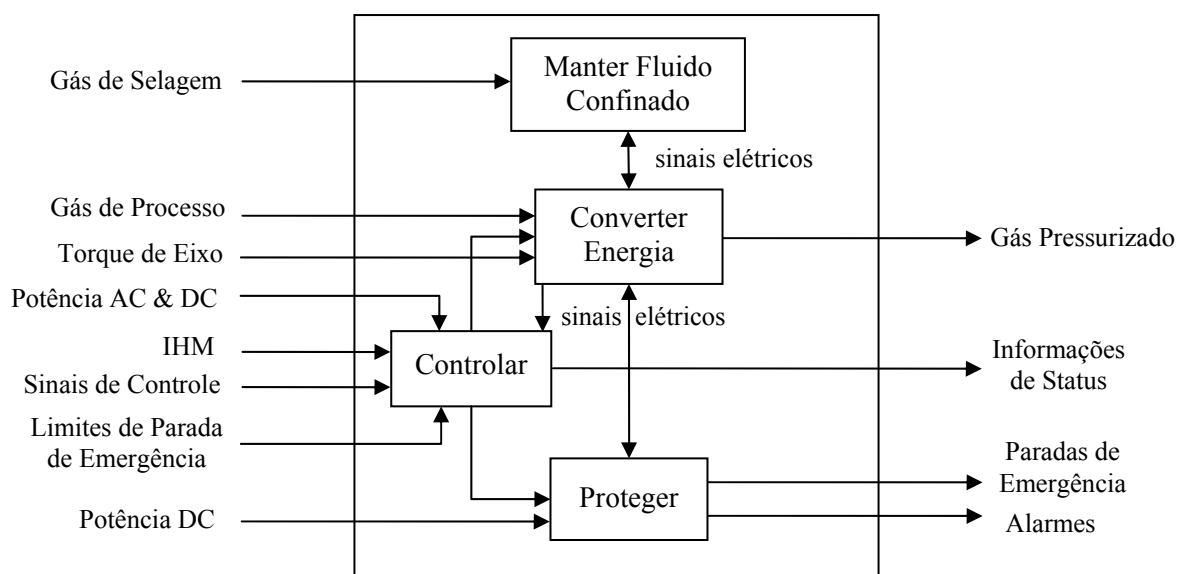


Figura B.5 - Diagrama de blocos funcionais de um compressor centrífugo típico.

Fonte: adaptado de SMITH, 1993.

#### B.1.4.3 Descrição do Sistema e o Diagrama de Blocos Funcionais

A partir das etapas anteriores, elaboram-se cinco itens de informação:

- a) A descrição funcional do sistema com o arranjo dos equipamentos, além dos elementos redundantes e de proteção, e a instrumentação associada quando o caso;



- b) O diagrama de blocos funcionais indicando a representação de alto nível (geralmente com alguma abstração) das funções do sistema (Figura B.5);
- c) As interfaces de entrada e saída;
- d) A estrutura de desdobramento funcional do sistema, detalhando os subsistemas e componentes contidos nos blocos funcionais do diagrama anterior (Figura B.6);
- e) O histórico de falhas dos equipamentos durante os dois ou três últimos anos.

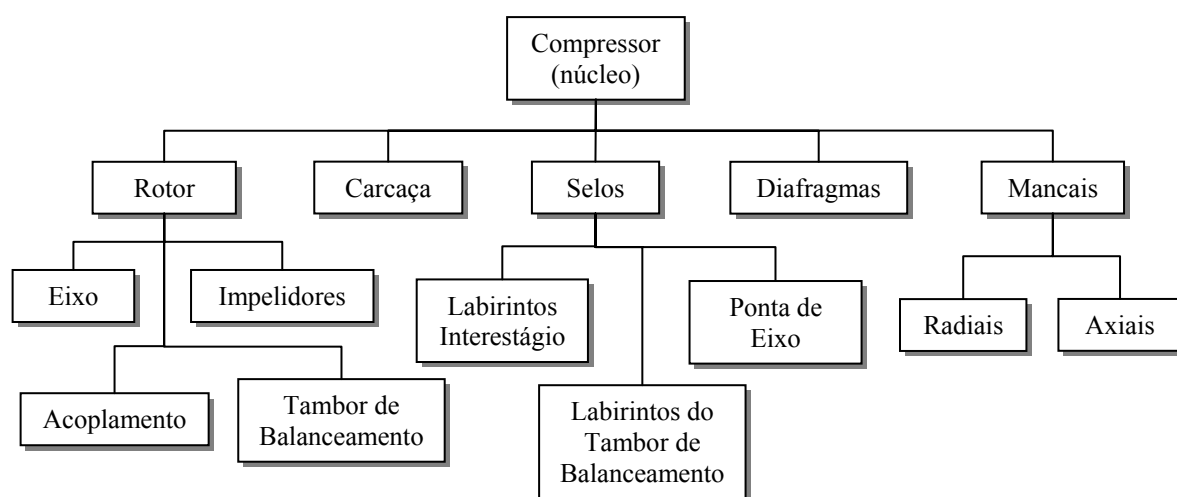


Figura B.6 - Estrutura de desdobramento funcional de um compressor centrífugo típico.  
 Fonte: adaptado de TASSELI *et al.*, 2002.

#### B.1.4.4 Funções do Sistema e suas Falhas Funcionais

As informações dos passos anteriores fornecem a base para a definição das funções do sistema, que é o enfoque principal do processo de análise da MCC. A delimitação das interfaces de saída constitui a fonte primária de informação para a definição das funções do sistema e, para cada subsistema que o compõe, se geram afirmações funcionais relacionadas ao seu papel parcial no sistema. Na descrição das falhas funcionais o foco é a perda de função e não a falha do equipamento em si. O Quadro B.1 ilustra a forma correta de se estabelecer as funções de um sistema ou subsistema e suas falhas funcionais.

Função	Falhas Funcionais
Fornecer uma pressão de 100 kgf/cm <sup>2</sup> no coletor de descarga.	1. A pressão fornecida é menor que 100 kgf/cm <sup>2</sup> . 2. A pressão fornecida é maior que 100 kgf/cm <sup>2</sup> .
Manter uma vazão mínima e uniforme de 5500 m <sup>3</sup> /h.	1. A vazão fornecida é menor que 5500 m <sup>3</sup> /h. 2. A vazão está pulsante.

Quadro B.1 - Exemplos de funções e falhas funcionais.

#### B.1.4.5 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA<sup>13</sup>)

O propósito básico dessa etapa é identificar os equipamentos que podem atuar na criação de uma falha funcional. É nesse passo que, pela primeira vez no processo de análise dos sistemas, as funções dos sistemas e seus equipamentos serão diretamente conectados. A matriz de falhas funcionais e equipamentos deve ser preparada para identificar os componentes que podem desempenhar um papel preponderante na caracterização de uma falha funcional. Esse documento requer um razoável conhecimento do projeto do sistema e das suas características operacionais. Entretanto, é durante a elaboração da FMEA que o nível de detalhes mostrará a necessidade de incluir ou retirar algum componente da matriz de falhas funcionais e equipamentos, onde os analistas irão definir os modos de falha específicos dos componentes, suas causas raízes e seus efeitos locais e globais; e é somente nesse nível que se pode definir se uma tarefa de MP é apropriada para prevenir, mitigar ou detectar a iminência desses modos de falha. Alguns exemplos de descrição dos modos de falha são ilustrados no Quadro B.2. A FMEA foi discutida em maiores detalhes no Capítulo 2 (v. seção 2.3.3) pela sua importância na investigação e identificação de falhas potenciais, e pelo seu poder de síntese do conhecimento existente sobre a função dos componentes nos equipamentos industriais.

Entupido	Deformado	Corroído	Danificado
Bloqueado	Quebrado	Sujo	Superaquecido
Desconectado	Contaminado	Fadigado	Desgastado

Quadro B.2 - Exemplos de descritores típicos de modos de falha.

Fonte: adaptado de SMITH, 1993.

#### B.1.4.6 Análise da Árvore de Decisão

Os modos de falha que “sobreviveram” ao exame inicial dos seus efeitos apontados pela FMEA, serão agora classificados dentro de um processo qualitativo denominado Análise da Árvore Lógica ou de Decisão (LTA). O propósito dessa etapa é priorizar a ênfase e a aplicação de recursos que cada modo de falha receberá, reconhecendo que cada função, falha funcional e modo de falha não apresentam o mesmo impacto na planta. Existem várias formas de estabelecer uma lista de prioridades de modos de falha.

<sup>13</sup> *Failure Modes and Effects Analysis*. A norma brasileira NBR-5462/1994 traduz o termo FMEA como “Análise dos Modos de Pane e seus Efeitos” e o define como “um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falha que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto”.

Entretanto, o processo da MCC utiliza uma estrutura lógica ou de decisão com três perguntas simples que permitem ao analista, precisa e rapidamente, colocar cada modo de falha em uma das quatro categorias de impacto e evidência na planta: (A) Segurança, (B) Parada Operacional, (C) Econômico e (D) Falha Oculta. Cada uma das perguntas: (1) Evidência, (2) Segurança e (3) Parada é respondida com “sim” ou “não” e, como é possível observar, há uma semelhança entre a árvore de decisão do MSG-2 (Figura B.2) e a da MCC (Figura B.7). Os modos de falha que não são evidentes podem representar os mesmos riscos que aqueles perceptíveis sob condições normais de operação e devem, portanto, ser classificados da mesma forma que os demais, seguindo a análise da árvore de decisão normalmente.

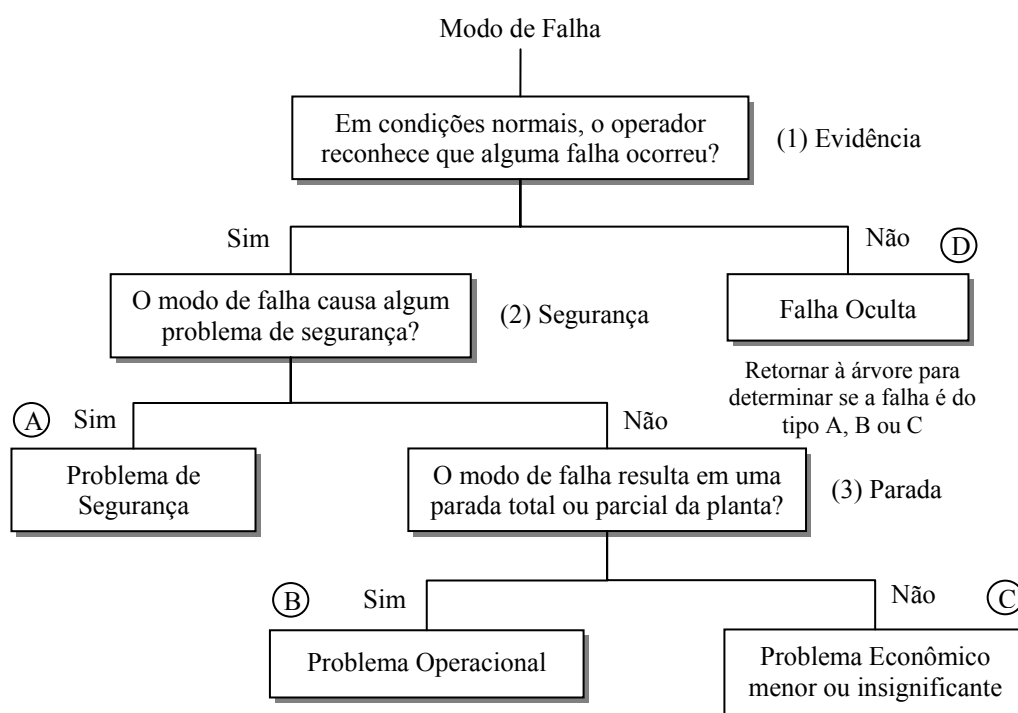


Figura B.7 - Estrutura de análise da árvore de decisão.  
 Fonte: SMITH, 1993.

#### B.1.4.7 Seleção das Tarefas de Manutenção

Os esforços para a análise de sistemas, até esse ponto, foram conduzidos para delinear aqueles modos de falha onde uma tarefa de MP trará o maior retorno pelo investimento realizado. Nessa última etapa, deve-se determinar a lista das tarefas aplicáveis e, então, selecionar a mais eficaz dentre as candidatas. Essa é a finalidade principal da MCC e, portanto, deve-se definir o significado dos termos aplicável e eficaz:

- a) **Aplicável.** A tarefa previne ou reduz a ocorrência de uma falha, detecta o início do processo de falha, ou descobre uma falha oculta;
- b) **Eficaz.** A tarefa é a opção mais eficiente do ponto de vista de custos dentre as candidatas.

Se nenhuma tarefa de MP é aplicável, então a única opção é a manutenção corretiva (MC). Da mesma forma, se o custo de uma tarefa de MP aplicável excede os custos advindos de uma falha, então a opção mais eficaz é a MC. A exceção a essas regras seria para aquelas falhas que comprometem a segurança da planta, onde uma modificação de projeto se torna obrigatória. O desenvolvimento da lista das tarefas de MP candidatas é um passo crucial e, freqüentemente, requer a ajuda de várias fontes. O envolvimento do pessoal da manutenção na seleção de tarefas é imprescindível para colher os benefícios da sua experiência e para lhes conferir os benefícios intangíveis de co-participar do processo da MCC. Entretanto, outras fontes de informação como o conhecimento do pessoal de operação, dados técnicos e conhecimento especializado dos fornecedores e fabricantes dos equipamentos são recomendadas para garantir a inclusão das técnicas e tecnologias mais modernas disponíveis no mercado. Isto é especialmente importante quando se deseja introduzir tarefas BC como o monitoramento da performance e a manutenção preditiva.

O diagrama de decisão da Figura B.8 é bastante útil ao analista para ajudá-lo a selecionar logicamente as tarefas de MP para cada modo de falha. Através de oito perguntas é possível definir, de uma forma lógica e estruturada, quais tarefas de MP são aplicáveis e mais eficazes dentre as possíveis. É importante observar que a primeira pergunta refere-se ao conhecimento da relação entre idade e confiabilidade, aquela determinada pelos dados históricos de falha (mais precisamente, pela taxa de falhas ao longo do período de uso) e representada de forma genérica pela curva da banheira. Conforme foi comentado na subseção B.2.1, a representatividade e a precisão dos dados de falhas são limitadas tanto pela qualidade e quantidade desses dados como pelo modelo utilizado na sua representação. Embora a coleta de dados históricos de falhas não seja obrigatória, ela exerce um papel muito importante na racionalização das tarefas BT e, portanto, a metodologia da MCC recomenda fortemente essa prática como fonte de conhecimento dos mecanismos de falha.

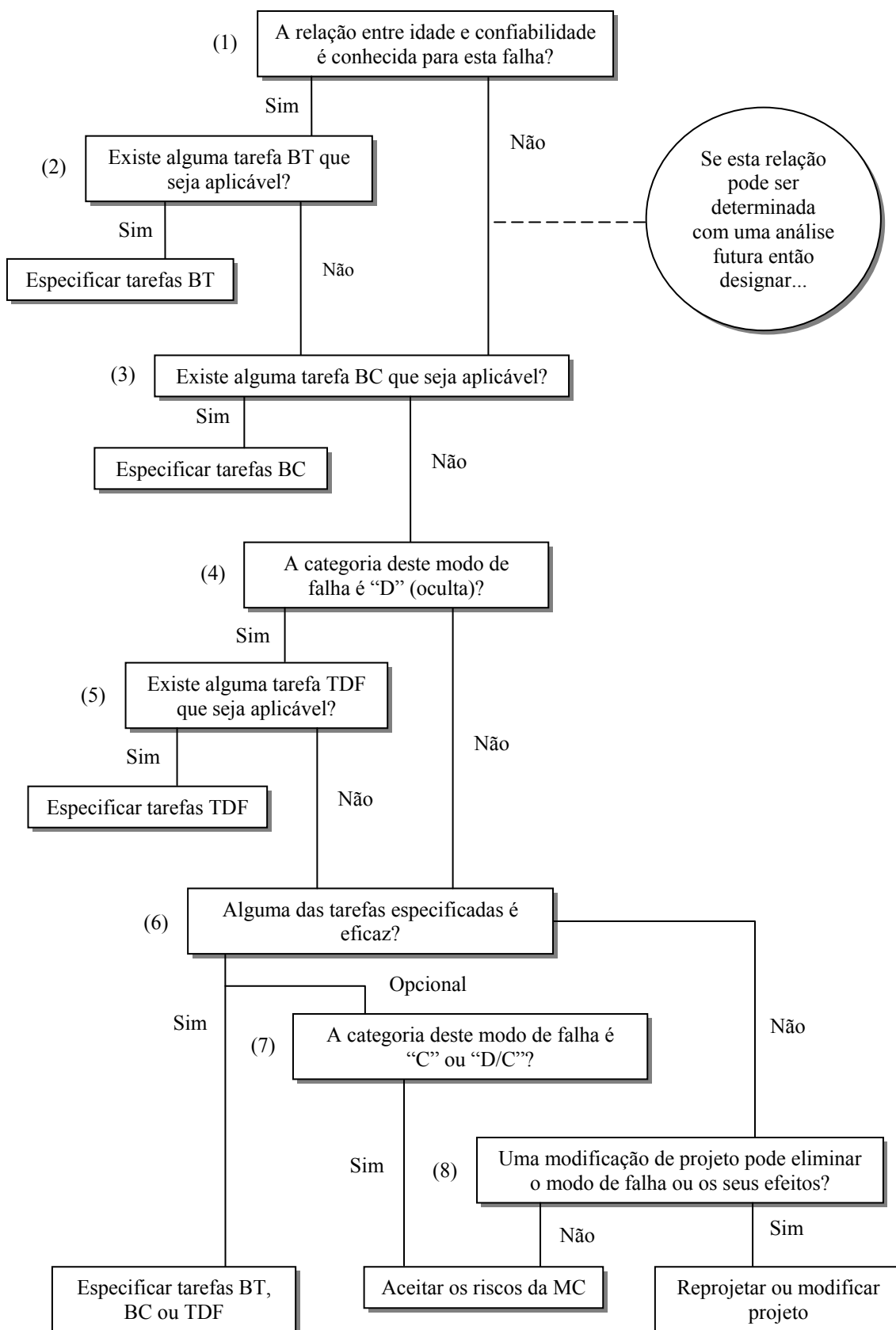


Figura B.8 - Diagrama de decisão para a seleção de tarefas de manutenção.

Fonte: SMITH, 1993.

O processo de análise de sistemas da MCC está completo nesse ponto. Entretanto, em si, ele não é perfeito e necessita, portanto, de revisões e ajustes pela gerência de manutenção como uma parte construtiva de qualquer processo de implementação da MCC. É importante lembrar que cada um dos sete passos ou etapas descritas aqui deve gerar uma documentação completa, com formulários e esquemas que devem ser utilizados para a comparação das tarefas de MP determinadas antes e depois da análise da MCC (no caso de plantas existentes que possuíam um programa de MP anterior). Essa comparação vai evidenciar as diferenças entre as sistemáticas de MP permitindo um “exame de sanidade” das novas tarefas através de uma checagem, julgamento e aprovação de sua pertinência no contexto das boas práticas difundidas no ambiente da manutenção.

O trabalho de Ribeiro e Pinto (2004) descreve o projeto piloto de implantação da MCC em uma Estação de Entrega da REPLAN ligada ao GASBOL. Segundo os autores, nas seis áreas estudadas foram identificados 309 modos de falha. Desse total, 107 (35,7%) eram falhas ocultas, ou seja, os componentes poderiam falhar e a percepção dessa falha somente ocorreria se um outro evento (algumas vezes, de grandes conseqüências) ocorresse. Foram levantados 90 modos de falha que necessitariam serem verificados periodicamente (busca de falhas) a fim de se garantir a confiabilidade da Estação de Entrega. Foram determinados 68 modos de falha possíveis de serem evitados ou minimizados através de ações preventivas (restauração, troca, inspeção ou monitoramento). Apesar da Estação de Entrega da REPLAN ser desabilitada, o estudo de MCC proporcionou uma evidência da importância da inspeção visual periódica, objetivando identificar situações anormais de operação que não são detectadas pela Central de Supervisão e Controle no Rio de Janeiro. O relatório desse estudo foi apresentado ao corpo gerencial que, a partir dos resultados alcançados e do depoimento dos participantes, decidiu estabelecer um programa de estudos das principais instalações do GASBOL.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – DADOS DO BEN 2006 SOBRE O GÁS NATURAL

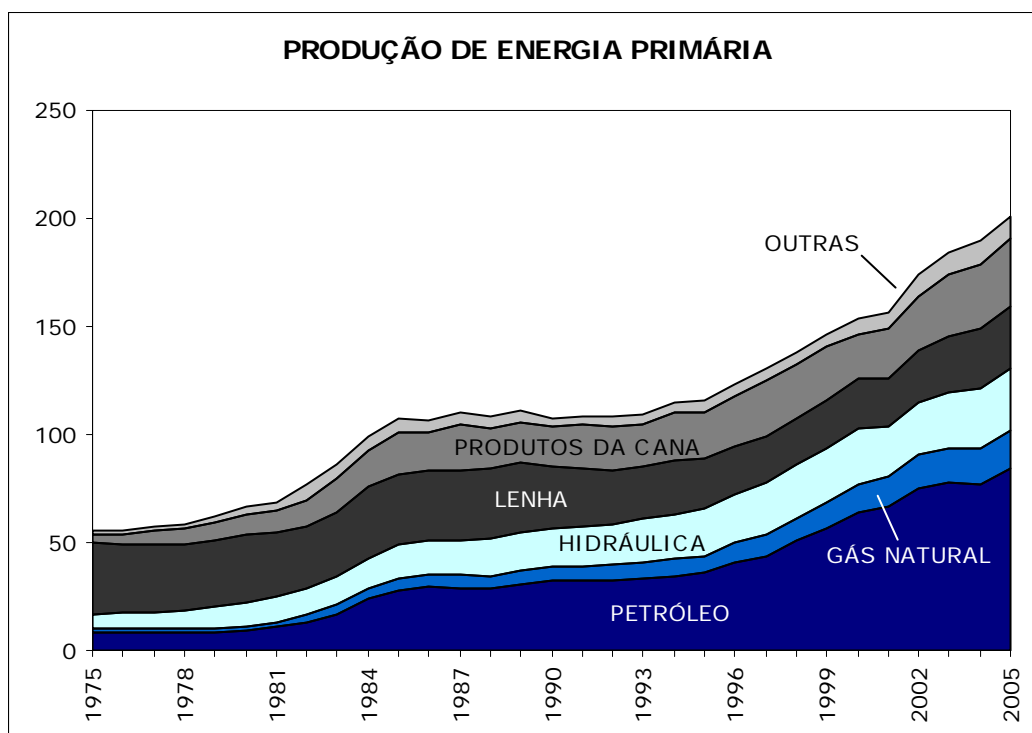


Gráfico A.1 - Produção anual de fontes renováveis e não renováveis de energia primária em  $10^3$  tep (mil toneladas equivalentes de petróleo).

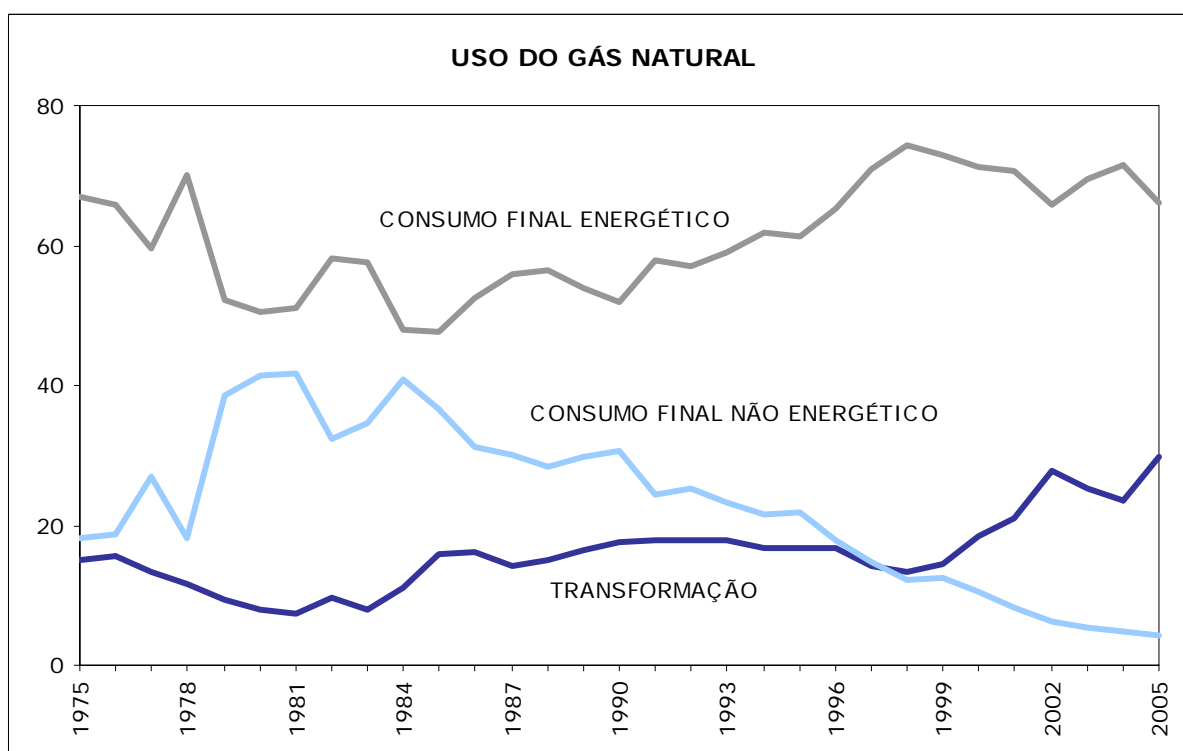


Gráfico A.2 - Consumo anual do GN em  $10^6$  m<sup>3</sup> (milhões de metros cúbicos) para os diversos fins.



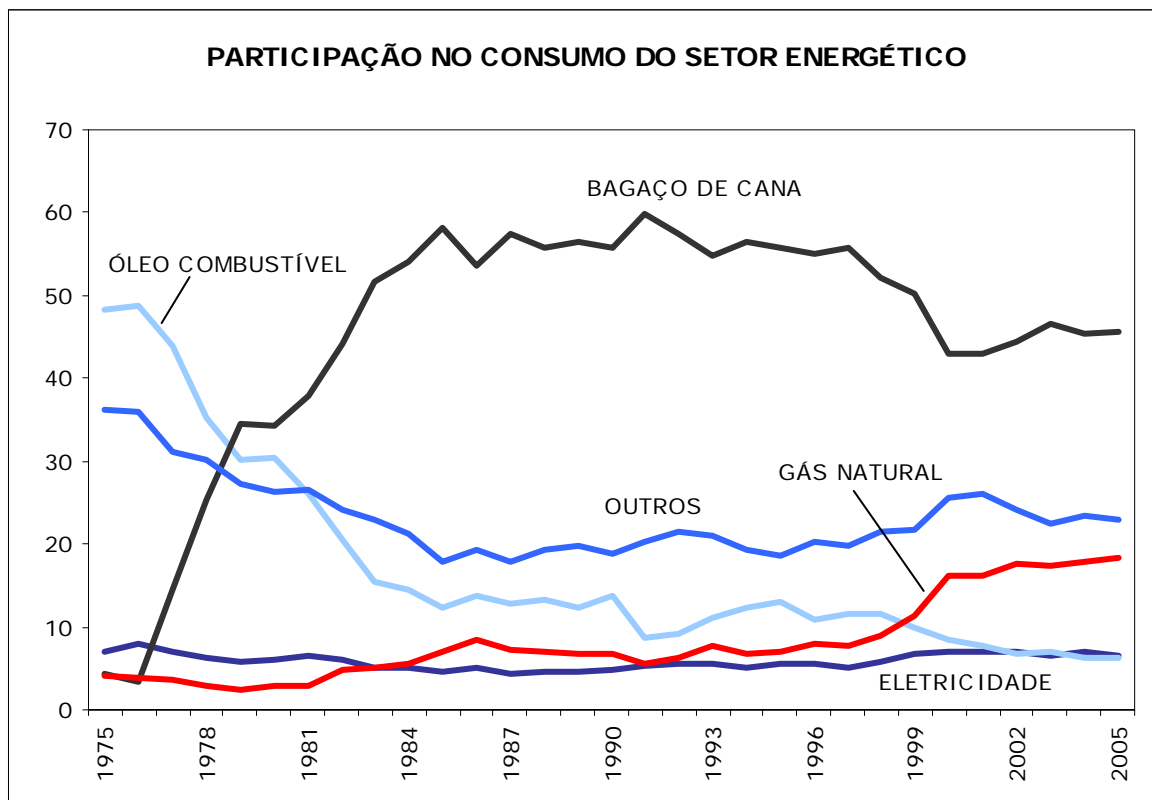


Gráfico A.3 - Participação anual das fontes primárias de energia no consumo do setor energético em  $10^3$  tep.

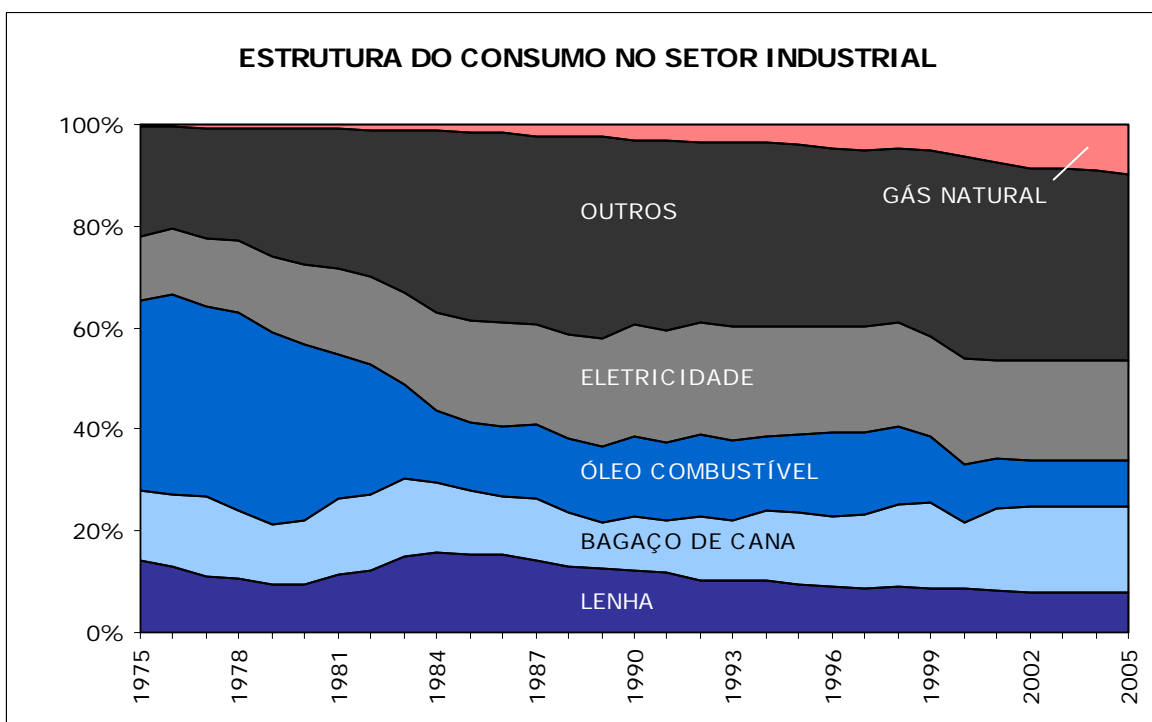


Gráfico A.4 - Estrutura percentual do consumo anual de fontes primárias de energia pelo setor industrial.

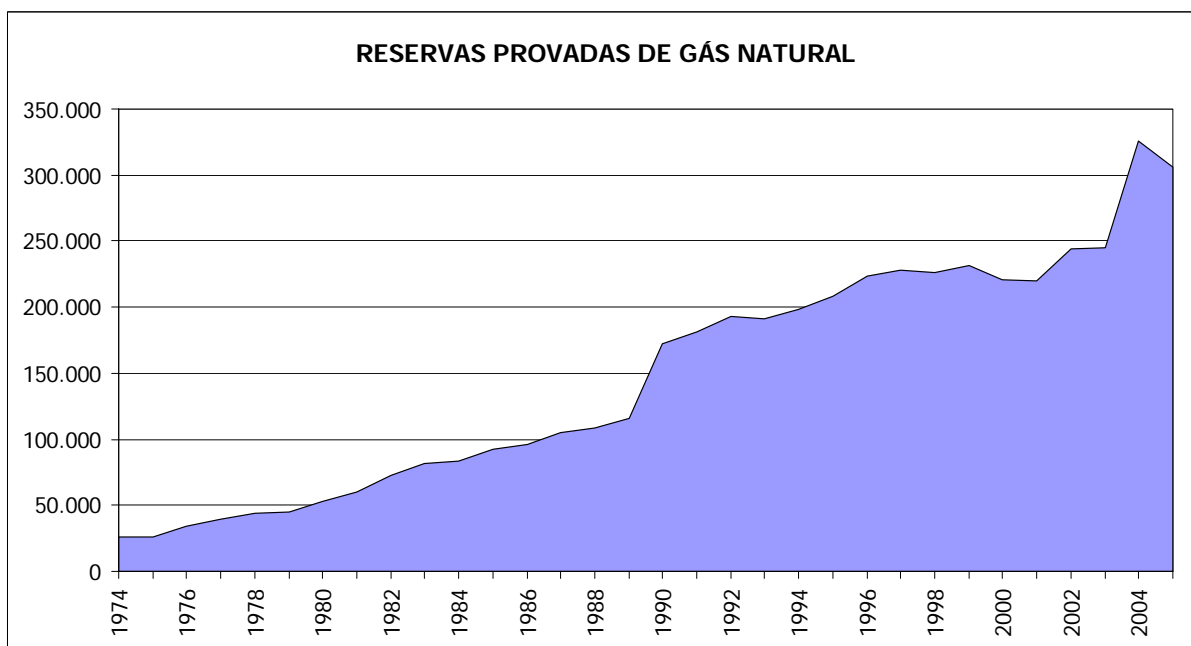


Gráfico A.5 - Evolução anual das reservas provadas de GN no Brasil em 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>.

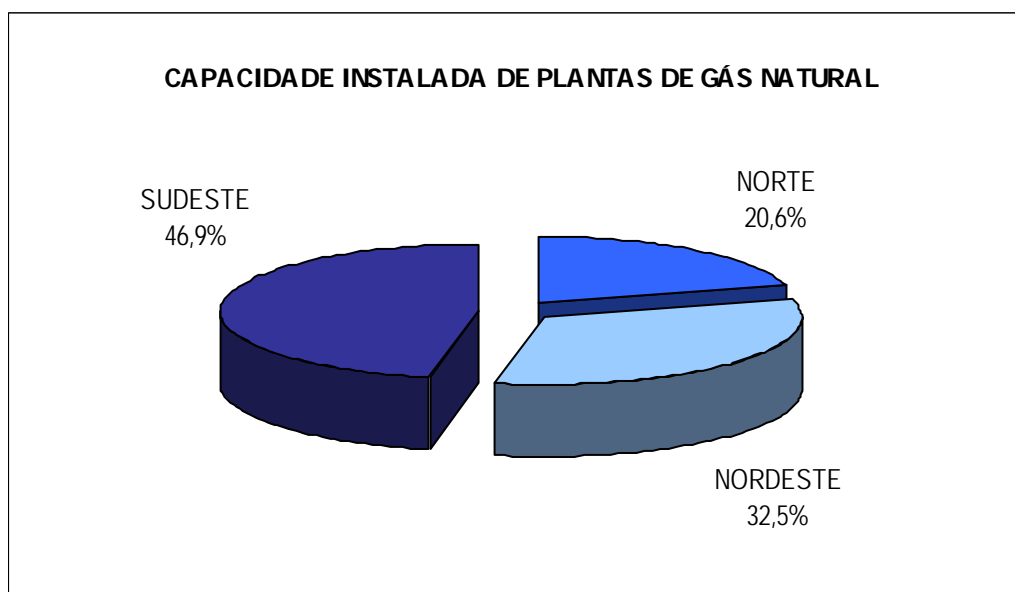


Gráfico A.6 - Distribuição da capacidade instalada de plantas de GN por região do país em 2005.

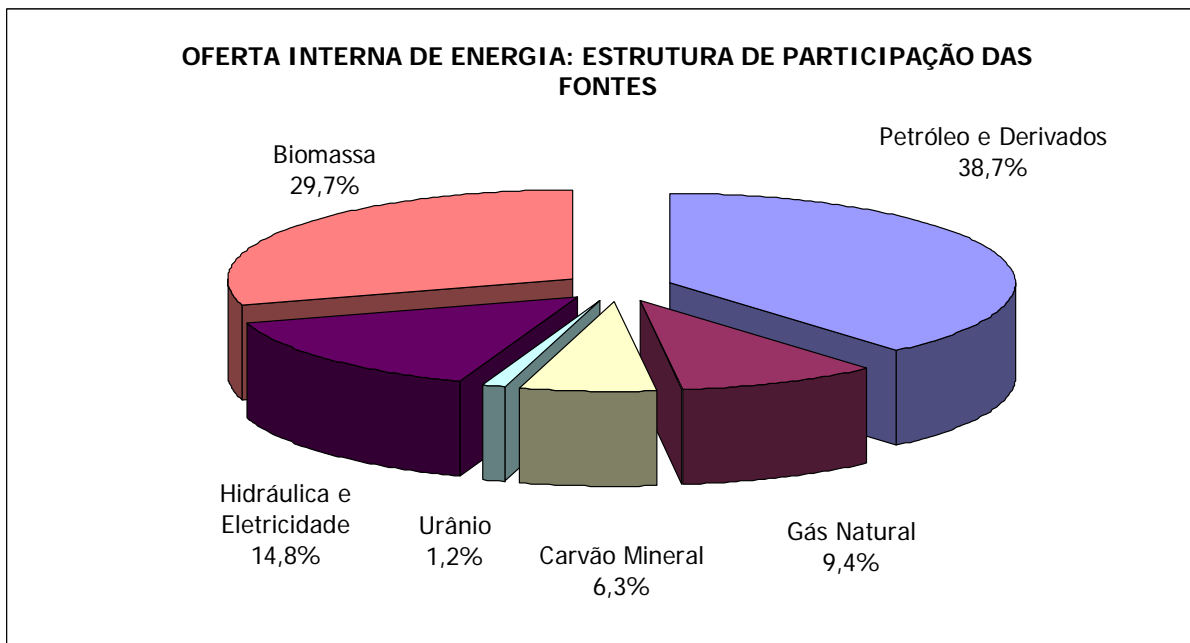


Gráfico A.7 - Oferta interna percentual de fontes de energia primária no Brasil em 2005.

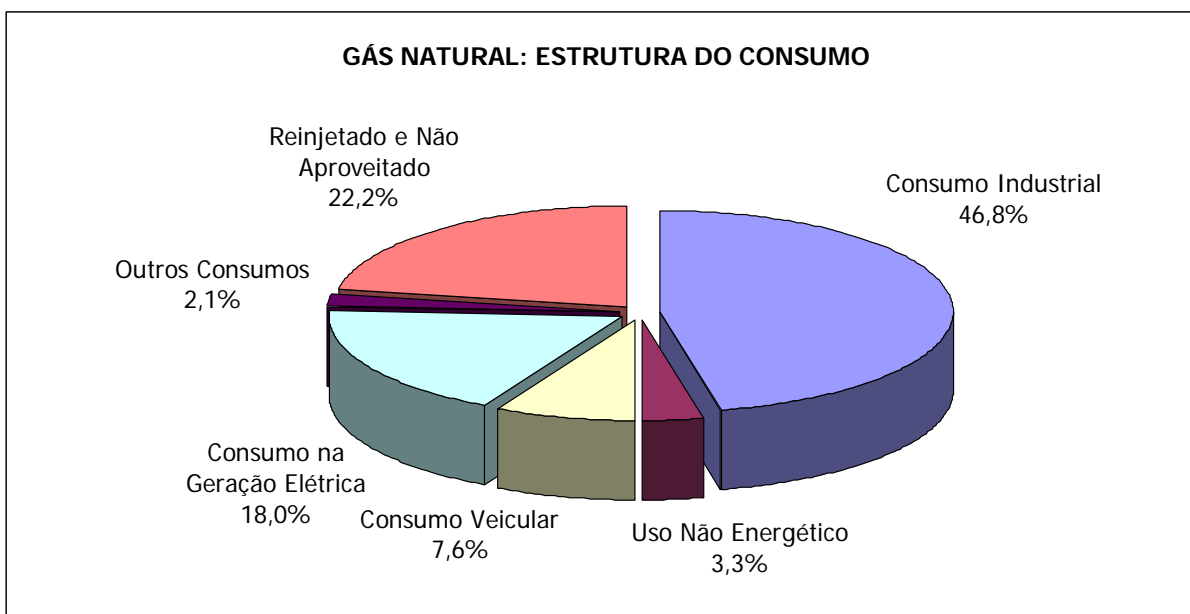


Gráfico A.8 - Estrutura percentual do consumo de GN por tipo de uso no Brasil em 2005.

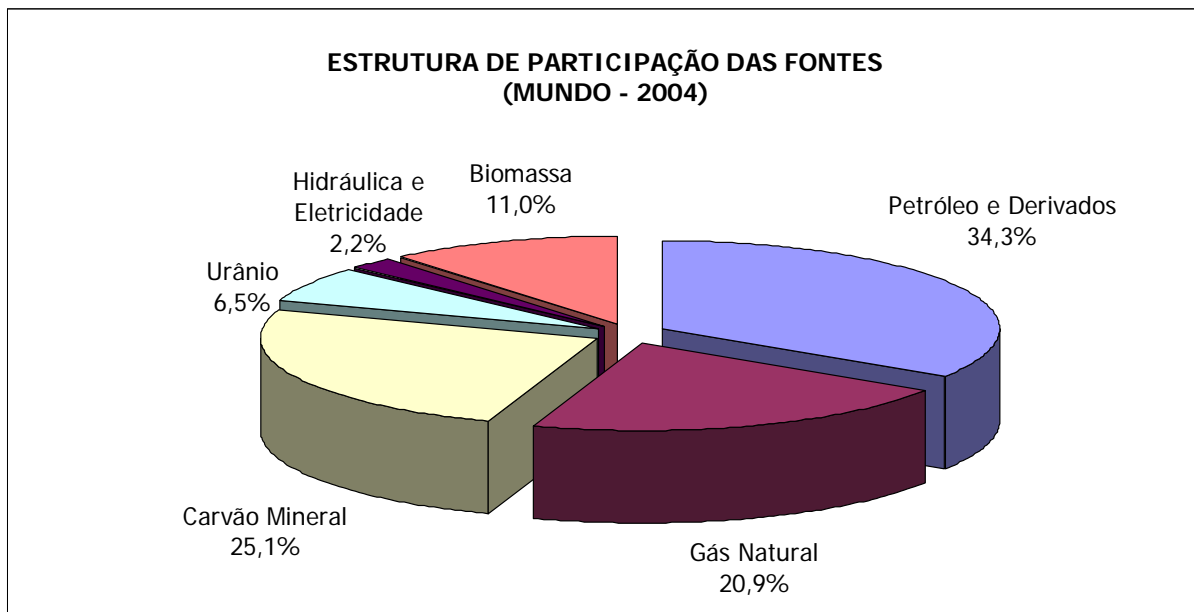


Gráfico A.9 - Estrutura percentual da oferta de fontes de energia no mundo em 2004.