

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS – GRADUAÇÃO  
COORDENADORIA DO PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM  
TECNOLOGIA

**O USO DA LÓGICA FUZZY COMO FERRAMENTA DE PROCESSO  
DECISÓRIO PARA O AUMENTO DA CONFIABILIDADE NO PROCESSO DE  
MANUTENÇÃO DOS FILTROS DE CELULOSE DA REDUC**

Waldo Vieira Costa

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
TECNOLOGIA**

Jose Luiz Fernandes – D.Sc.  
Marina Rodriguez Brochado – D.Sc.  
Orientadores

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Dezembro/ 2007

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
I REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
I.1 Agente racional, Identidade e Comportamento.....	7
I.2 Tópicos de Manutenção.....	9
I.2.1 História da Manutenção .....	9
I.2.2 Manutenção Total da Produtividade – TPM.....	11
I.2.2.1 Objetivos e Aplicações do TPM.....	17
I.2.2.2 Os Pilares do TPM.....	20
I.3 Tópicos de Confiabilidade Humana.....	25
I.3.1 Principais Metodologias Usadas na Confiabilidade Humana .....	27
I.3.2 O Aprendizado e o Erro Humano .....	29
I.4 Tópicos dos Modelos de Confiabilidade.....	35
I.4.2 Distribuição de Probabilidade e Aplicações .....	37
I.4.2 Distribuições de Probabilidade Aplicadas à Confiabilidade .....	41
I.4.3 Análise de Sistemas com Componentes em Série e em Paralelo .....	50
I.5 Tópicos de lógica <i>Fuzzy</i> .....	54
I.5.1 Histórico da Tecnologia <i>Fuzzy</i> .....	56
I.5.2 Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	57
I.5.3 Definição de subconjuntos <i>Fuzzy</i> .....	61
I.5.4 Características da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	62
I.5.5 Exemplo de Processamento <i>Fuzzy</i> .....	63
I.5.6 Fuzzificação e Defuzzificação Natural.....	65
I.5.7 Fuzzificação .....	67
I.5.8 Defuzzificação.....	68
II PROPOSTA DE UM MODELO CONCEITUAL PARA AUMENTO DA CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO DE FILTROS DE CELULOSE USANDO A LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	71
II.1- Metodologia do Trabalho .....	72
II.2 Premissas do Sistema do Processo Decisório para Realizar a Manutenção.....	73
II.2.1 Confiabilidade Humana das Ações de Operação dos Filtros .....	74
II.2.2 Fluxo do Processo Decisório da Ação de Intervenção no Equipamento.....	77
II.3 Modelo Conceitual do Processo Decisório de Manutenção <i>Fuzzy</i> .....	79
II.4 Simulação Computacional do Plano de Ação de Intervenção no Equipamento .....	82

III ESTUDO DE CASO NA REFINARIA DUQUE DE CAXIAS .....	83
III.1 Descrição do Cenário.....	84
III.2 Objetivo e Local de Estudo .....	87
III.3 Análise Estatística Para Seleção das Variáveis do Processo de Filtragem .....	89
III.4 Aplicação da lógica <i>Fuzzy</i> Para Aumento da Confiabilidade nas Ações de Manutenção dos Filtros .....	94
III.4.1 Plano de Ação.....	94
III.4.2 Projeto do Sistema de Diagnóstico de Manutenção <i>Fuzzy</i> para o Processo de Tratamento de Condensado .....	95
III.5 Regras de Inferência <i>Fuzzy</i> .....	99
III.6 Defuzzificação .....	101
CONCLUSÃO.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

**FICHA CATALOGRÁFICA**

C837 Costa, Waldo Vieira

O uso da lógica fuzzy como ferramenta de processo decisório para o aumento da confiabilidade no processo de manutenção dos filtros de celulose da REDUC / Waldo Vieira Costa. – 2007.

xi, 112 f. + Apêndice: il.color., tabs.; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2007.

Bibliografia: f. 106-112.

Inclui apêndice.

1. Lógica difusa – Processo decisório. 2. Interação homem-máquina – Confiabilidade. I. Título.

CDD 511.322

## Agradecimentos

- A Deus pela sustentação e por esta oportunidade de aprimoramento.
- Aos meus filhos Ranah e Kaleb e a minha esposa, pela compreensão nos momentos em que estive ausente e por toda ajuda, amor e motivação que sempre procuraram transmitir ao longo desta jornada.
- Aos meus pais Álvaro e Lydia (em memória) e aos meus irmãos Alvinho (em memória), Marilene, Marlene e Vera. Bases dos alicerces da minha caminhada.
- Aos Professores José Luiz Fernandes (D.Sc.) e Marina Rodrigues Brochado (D.Sc.), meus prezados orientadores, pelos valiosos ensinamentos, dedicação, paciência e amizade.
- À equipe de Professores do PPTEC/CEFET/RJ, pelos valiosos conhecimentos transmitidos nas disciplinas que foram ministradas ao longo deste curso.
- Aos meus Colegas de Trabalho e do Mestrado
- Aos funcionários do PPTEC/CEFET/RJ

Resumo da dissertação submetida ao PPTEC/CEFET-RJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em tecnologia (M.T.).

O USO DA LÓGICA FUZZY COMO FERRAMENTA DE PROCESSO DECISÓRIO PARA  
O AUMENTO DA CONFIABILIDADE NO PROCESSO DE MANUTENÇÃO DOS  
FILTROS DE CELULOSE DA REDUC

Waldo Vieira Costa

Dezembro de 2007

Orientadores: Jose Luiz Fernandes – D.Sc.

Marina Rodriguez Brochado – D.Sc.

Programa: PPTEC

A Confiabilidade humana vem paulatinamente sendo estudada e promovendo uma melhor interação Homem-Máquina, considerando os processos inerentes ao comportamento humano. Nisto a lógica *Fuzzy* tem uma inserção bem atuante no modelo do raciocínio humano, pois se constitui em uma das técnicas para a solução de problemas com uma vasta aplicabilidade, especialmente nas áreas de controle e tomada de decisão. O trabalho envolve uma pesquisa descritiva e experimental do problema da confiabilidade no processo de manutenção, com a hipótese da aplicação da teoria *Fuzzy* como agente racional no processo decisório da manutenção. É realizado um estudo de caso de manutenção dos filtros de celulose de uma Refinaria de Petróleo sendo proposto o uso da lógica *Fuzzy* como Agente racional a fim de diminuir as tensões geradas aos especialistas em operação de máquinas e equipamentos que trabalham em regime de turno ininterrupto. Os especialistas submetidos diariamente a fenômenos correspondente ao processo decisório, como: comportamento, emergências operacionais e fadiga, o que geram conflitos e improdutividades. A lógica *Fuzzy* é utilizada na modelagem do problema da interação homem-máquina, onde cada atributo de confiabilidade humana é representado por uma composição de termos lingüísticos, obtidos em um processo de avaliação, feito através do julgamento dos especialistas, sendo a análise do experimento realizada através de simulação no software *Fuzzy tools* do *MATLAB 6.5*.

**Palavras-chave:** Análise de confiabilidade, Lógica *fuzzy*, Manutenção da produtividade total, Interação Homem-máquina

Abstract of dissertation submitted to PPTEC/CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Technology (M.T.).

THE USE OF FUZZY LOGIC AS A TOOL FOR DECISION MAKING TO  
INCREASE THE RELIABILITY IN THE PROCESS OF MAINTENANCE OF THE  
FILTERS PULP OF REDUC

Waldo Vieira Costa

Dezembro / 2007

Supervisors: Jose Luiz Fernandes – D.Sc.

Marina Rodriguez Brochado – D.Sc.

Program: PPTEC

The Human reliability is gradually being studied and promoting better Man-machine's integration, considering the processes involved in human behavior. Surely, the Fuzzy logic has a very active inclusion in the model of human thought, once it constitutes one of most applicable techniques for solving problems, especially in control and decision making areas. This search describes a descriptive and experimental research about human reliability problem applied to maintenance process, considering the application of Fuzzy theory as a rational agent to the decision making process for maintenance. A case study for maintenance in the filters pulp from a Petroleum Refinery, proposing the usage of Fuzzy logics as a rational agent to minimize the stress of machine operation specialists that work in ininterrupt shifts. Those people are submitted to several decision making events such as: behavior, operational emergencies and fatigue, which cause conflicts and lack of productivity. Fuzzy logics is used on man-machine interaction modeling, where each attribute of human reliability represents a set of linguistic terms collected through the judgement of specialists and the experiment analysis is done using simulation generated by Fuzzy tools from MATLAB 6.5.

**Keywords:** Reliability analysis, Fuzzy logic, Total productive maintenance, Man-machine interaction



## Lista de Figuras

Figura I – Procedimento Metodológico da Dissertação .....	5
Figura I.1 – Os Pilares do TPM.....	24
Figura I.2 – Curva da banheira. ....	26
Figura I.3 – Complexidade e comportamento humano. ....	31
Figura I.4 – Classificação de erro humano.....	32
Figura I.5 – Figuras ambíguas (a), (b) e (c).....	34
Figura I.6 – Curvas característica de $\lambda(t)$ em função do tempo t.....	40
Figura I.7 – Características gerais da distribuição exponencial. (a), (b) e (c) .....	42
Figura I.8 – Características gerais da distribuição normal ou de Gauss. (a), (b) e (c)...	44
Figura I.9 – Características gerais da distribuição lognormal (a), (b) e (c).....	46
Figura I.10 – Características gerais da distribuição de Weibull (a), (b) e (c).....	48
Figura I.11 – Sistema hidráulico com seis componentes em série.....	51
Figura I.12 – Sistema hidráulico com componentes dispostos em série paralelo.....	52
Figura I.13 – Sistemas hidráulicos com estrutura aumentada. ....	53
Figura I.14 – Gráfico de Temperatura (Celsius).....	54
Figura I.15 – Gráfico de potência .....	64
Figura I.16 – Gráfico da área. ....	64
Figura I.17 – Sistema de inferência <i>Fuzzy</i> .....	66
Figura I.18 – Gráfico Triangular .....	66
Figura I.19 – Gráfico Trapezoidal .....	67
Figura I.20 – Gráfico Gaussiana .....	67
Figura I.21 – Exemplo de Fuzzificação.....	67
Figura I.22 – Funções de pertinência de uma variável lingüística. ....	69
Figura I.23 – Áreas de ZE e PM combinadas pelo operador de união.....	51
Figura II.1 – Modelo de gestão. ....	74
Figura II.2 – Modelo mental do processo decisório.....	75
Figura II.3 – Fluxo do processo .....	77
Figura II.4 – Modelo de tomada de decisão com cinco pontos.....	78
Figura II.5 – Tomada de decisão para manutenção dos filtros de celulose. ....	79
Figura II.6 – Função Trapezoidal.....	80

Figura II.7 – Modelo mental do processo decisório modificado.....	82
Figura II.8 – Ferramenta Computacional de Simulação.....	83
Figura III.1 – Distribuição das unidades de negócios pelo território nacional .....	84
Figura III.2 – Organograma da REDUC.....	85
Figura III.3 – Modelo de gestão da confiabilidade.....	86
Figura III.4 – Modelo do sistema de geração de vapor.....	87
Figura III.5 – Filtro D 1239 .....	88
Figura III.6 – Modelo do processo da filtração .....	89
Figura III.7– Gráfico de Pareto do sistema de filtragem.....	90
Figura III.8 – Histograma da Vazão de condensado .....	91
Figura III.9 – Histograma do nível do tanque. ....	92
Figura III.10 – Abertura da válvula.....	96
Figura III.11 – Diferencial de pressão.....	97
Figura III.12 – Nível do tanque.....	97
Figura III.13 – Vazão de saída do filtro.....	98
Figura III.14 – Condições do filtro .....	98
Figura III.15 – Regras de inferência no <i>MATLAB</i> .....	100
Figura III.16 – Defuzzificação .....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela I.1 – Diferenças TPM x TQM .....	13
Tabela I.2 – Perdas ligadas a maximização da eficiência .....	14
Tabela I.3 – Resumo das quatro gerações do TPM.....	15
Tabela I.4 – Relação entre as Confiabilidades.....	27
Tabela I.5 – Taxas de falha dos componentes de um sistema hidráulico.....	51
Tabela III.1 – Resultados da análise do sistema de filtragem .....	89
Tabela III.2 – Vazão de condensado .....	91
Tabela III.3 – Classes e freqüências .....	91
Tabela III.4 – Nível do tanque.....	45
Tabela III,5 – Classes e freqüências .....	92
Tabela III.6 – Resultados dos cálculos.....	93
Tabela III.7 – Regras de Inferência <i>Fuzzy</i> .....	99

## Lista de abreviaturas, Siglas e Símbolos

ATHEANA	A Technique for Human Event Analysis
CBM	Breakdown Maintenance
CPC	Common Performance Conditions
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method
D	Vaso de Pressão
ETC	Estação de Tratamento de Condensado
FAA	Federal Aviation Administration
PSF	Performance Shaping Factors
FMEA	Failure Mode and Effect
FMECA	Failure Mode Effect and Critically Analysis
$F(t)$	Função de Densidade de Probabilidade, fdp
F.abs	Freqüência Absoluta
F. Ac. Ab	Freqüência Acumulada Abaixo
F. Ac. Ac	Freqüência Acumulada Acima
GEMS	Generic Error Modeling System
JIT	Just in Time
JIPM	Japanese Institute of Plan Maintenance
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTF	Mean Time To Failure
MPd	Manutenção Preditiva
MSG	Maintenance Steering Group
P	Bomba Hidráulica
PQCDSM	Produtividade Qualidade Custo
RCM	Reliability Centered Maintenance
$R(H)$	Confiabilidade Humana
$R(x)$	Confiabilidade
STP	Sistema Toyota de Produção
THERP	Technique for Human Error Prediction
TBM	Time Based Maintenance
TPM	Total Productive Maintenance
TQM	Total Quality management
VCP	Verificação de Procedimento
$t_0$	Media da Distribuição
$m$	Parâmetro de Forma
$\lambda(t)$	Função Taxa de falha
$\theta$	Parâmetro de Escala
$ux$	Pertinência

## INTRODUÇÃO

A confiabilidade humana vem paulatinamente sendo estudada e promovendo uma melhor interação Homem-Máquina, O homem segundo REZENDE (2003) é o bem mais valioso de uma organização. Esses estudos iniciaram-se em meio aos primeiros estudos da Ergonomia, mas foram SWAIN E GUTTMAN (1983) que primeiro sistematizaram a análise da confiabilidade humana para uso nos procedimentos de avaliação probabilística de risco em plantas nucleares. O método desenvolvido por esses autores, denominado THERP: *Technique for Human Error Prediction* – baseava-se na decomposição da tarefa humana em elementos, na atribuição da probabilidade de erro humano a cada elemento, na determinação de fatores influenciadores do desempenho e da dependência entre estes elementos e finalmente, na quantificação da probabilidade total de erro na tarefa.

Acidentes relevantes aconteceram no final da década de 1980, muitos deles causados pela inadequação do projeto dos sistemas às capacidades cognitivas humanas. Isto motivou uma nova geração de técnicas de Análise da confiabilidade humana, fortemente baseadas no entendimento dos mecanismos da cognição humana.

Entretanto, os processos do pensamento humano sugerem que boa parte da lógica inerente ao raciocínio humano não é a tradicional lógica ambivalente ou mesmo polivalente, mas uma lógica com verdades inerentes ao comportamento humano. Nisto a lógica *Fuzzy* tem uma inserção bem atuante no modelo do raciocínio humano.

A lógica *Fuzzy* exerce um papel básico no que pode ser uma das mais importantes facetas do pensamento humano, a saber: a habilidade de resumir a informação (ZADEH, 1965). Esta capacidade de redução constitui uma das mais importantes vantagens da mente humana, bem como uma característica fundamental que distingue a inteligência humana, do tipo de inteligência mecânica que é incorporada nos atuais computadores digitais.

Segundo COSTA (2006), o emprego das técnicas de análise de sistemas tradicionais não são bem ajustadas para lidar com sistemas humanos, porque elas falham em se adequar com a realidade da indefinição do pensamento e do comportamento humano. Assim, para lidar com tais sistemas de uma forma realista, necessita-se de abordagens que não coloquem acima de tudo o formalismo matemático preciso, rigoroso, e que empreguem, em vez disso, uma estrutura metodológica que seja tolerante com as imprecisões e verdades parciais.

A manutenção tradicional e a confiabilidade dos equipamentos há muito, possuem um arcabouço teórico analítico bastante desenvolvido por autores reconhecidos como (LAFRAIA, 2005) e (PALLEROSI, 2007).

A Manutenção da Produtividade Total – TPM envolve todos os setores da organização e teve a sua origem no TQM (*Total Quality Management* - Gestão da Qualidade Total) conduzida pelas áreas de manufatura. Entre os primeiros conceitos, destaca-se uma frase de NAKAGIMA (1989), referente ao assunto, definindo TPM como a “Manutenção conduzida com a participação de todos”. Neste sentido a palavra “todos”, significa exatamente, o envolvimento de todo o pessoal, incluindo os elementos da média e alta direção num trabalho conjunto e não um trabalho a ser conduzido pelos operadores de forma voluntária e que não lhes diz respeito.

Entretanto, a variação do comportamento humano é causada por fatores internos ao homem, provoca conseqüências externas. Cada pessoa desenvolve a sua personalidade específica. Esta personalidade é resultado dos mesmos processos básicos de cognição, pois os fatores comuns, que formam a cognição humana, dependem da cultura, sociedade, o ambiente e o estilo de vida. Estes fatores agem na parte psicológica e, por conseguinte, o seu estado emocional, apresentado taxas de falhas não previsíveis, ao longo de sua vida útil.

Assim, devido à complexidade dos seres humanos a falha humana resulta das interações homem-trabalho ou homem-ambiente, que não atendam a determinados padrões esperados. Nesse conceito, estão implícitos três elementos: uma ação humana variável; uma transformação do ambiente (ou máquina) que não atenda a determinados critérios; e um julgamento da ação humana frente a esses critérios. Esses elementos levam a uma falha humana, (LIDA 1998). Muitos acidentes são atribuídos à falha Humana ou ao fator Humano, essas falhas oriundas da desatenção ou negligência levam a um acidente.

### **Situação Problema**

Dentre os processos produtivos da Refinaria Duque de Caxias – REDUC destaca-se a Central de Geração e Distribuição Termoelétrica, do qual depende todo o processo produtivo e por isso, especial atenção deve ser dada a este setor para manter seu bom funcionamento. Este setor é responsável pela geração de vapor e energia elétrica que abastece toda a refinaria. Para a geração de vapor, as caldeiras que utilizam água captada da Barragem de Saracuruna, que é previamente tratada já na refinaria.

Na Central termoelétrica, o vapor gerado é distribuído aos processos de produção, que aproveitam a sua capacidade térmica e sua energia cinética para a produção dos derivados de petróleo. Como nada é perfeito, as perdas que ocorrem no vapor depois que realizou o trabalho requerido incorre na perda de parte de sua energia, o que o transforma novamente em água e que agora passa a ser chamado de Condensado.

No procedimento atual, o operador deste processo realiza a manutenção e, a escolha do melhor momento é baseada na sua própria experiência profissional, aliada aos dados do fabricante e ao conhecimento dos especialistas de manutenção. O processo físico ou *hard*, atual para tomada de decisão gera tensões ao especialista, pois o cenário em que convive é composto por variáveis que ao longo do processo geram erros, assim, há uma busca árdua pelo especialista em manter as variáveis sob controle. Além das tensões físicas, existem as tensões internas, inerentes a: identidade, ao comportamento e ao omoral do especialista, as quais contribuem sensivelmente na tomada de decisão. O somatório dessas tensões tem contribuído para que o mesmo trabalhe em um ambiente hostil, levando a erros de avaliação, acidentes e falta de concentração.

A questão que se apresenta, neste trabalho, é como determinar faixas ideais em torno de valores ideais de determinadas variáveis, para se decidir sobre o momento de manutenção, relacionando-se outras variáveis deste processo que são fatores importantes na decisão final, considerando-se o aumento da confiabilidade operacional.

A hipótese considerada para melhoria deste problema consiste em buscar através de entrevistas com os operadores e especialistas, dados para a determinação dos conjuntos *Fuzzy*, seus valores, suporte, domínio e formação dos conjuntos de grau de pertinência para se montar à lógica proposicional e construir o sistema *Fuzzy* que terá como saída um valor numérico que será interpretado de acordo com o seu valor *Fuzzy* de saída, o qual constituirá o melhor momento para a limpeza do filtro de celulose da Central Termelétrica da REDUC.

### **Objetivo Geral:**

Este trabalho tem como objetivo propor um modelo de apoio à decisão para o aumento da confiabilidade no processo de manutenção dos filtros de celulose de uma Refinaria de Petróleo, através da proposta de se utilizar a lógica *Fuzzy* para se determinar o melhor momento de intervenção da manutenção.

### **Objetivos Específicos:**

- Investigar os conceitos e abordagens de Confiabilidade, destacando a lógica *Fuzzy*;
- Investigar os processos de tomada de decisão na manutenção do sistema de tratamento de condensado da Unidade de Geração de Energia da Refinaria Duque de Caxias;
- Propor o Modelo de se utilizar a lógica *Fuzzy* para se determinar o melhor momento de realização da limpeza dos filtros que são utilizados para retirar as impurezas contidas nos condensados resultantes dos trabalhos realizados pelo vapor produzido nas caldeiras da central.

### **Procedimento Metodológico**

O estudo parte da hipótese de que a lógica *Fuzzy* pode auxiliar na modelagem de um problema de manutenção, considerando a tomada de decisão de intervenção de um equipamento, e caracterizar que esta escolha do melhor momento é baseada na sua própria experiência profissional, aliada aos dados do fabricante e ao conhecimento dos especialistas de manutenção.

Para o desenvolvimento desta dissertação é adotada a pesquisa exploratória, visto que ela tem por finalidade definir o problema com maior precisão e identificar cursos relevantes de ação permitindo construir hipóteses mais adequadas. Os métodos empregados em um primeiro momento é uma pesquisa bibliográfica, que compreende: levantamentos em fontes secundárias (bibliográficas, documentais, etc.), levantamentos de experiência, estudos de casos selecionados e observação informal (visitas técnicas).

Em um segundo momento o trabalho envolve uma pesquisa descritiva e experimental do problema da confiabilidade no processo de manutenção. É descritiva, pois relaciona a abordagem da confiabilidade dos equipamentos e humana, conforme PALLEROSI (2007), com a hipótese da aplicação da teoria *Fuzzy* como agente racional no processo decisório da manutenção, o que possibilita a construção do modelo, conforme apresentada na Figura I.

O trabalho experimental é realizado através de um estudo de caso de manutenção dos filtros de celulose de uma Refinaria de Petróleo. A análise do experimento realiza-se através de simulação no software *Fuzzy tools* do *MATLAB 6.5*. O resultado demonstra uma melhor interação Homem-Máquina no processo de manutenção.

Logo, procura-se preservar sua integridade empregando neste trabalho o uso da ferramenta *Fuzzy* como elemento de interação homem-máquina, a fim de diminuir tensões geradas no dia-a-dia dos especialistas que trabalham no processo de recuperação de condensado da Central Termoelétrica da Refinaria Duque de Caxias – REDUC, e com isso obter o momento ideal para realizar a manutenção, de forma confiável, nos filtros de celulose deste sistema. Cada atributo de confiabilidade humana será uma composição de termos lingüísticos, obtidos em um processo de avaliação, feito através do julgamento dos especialistas.



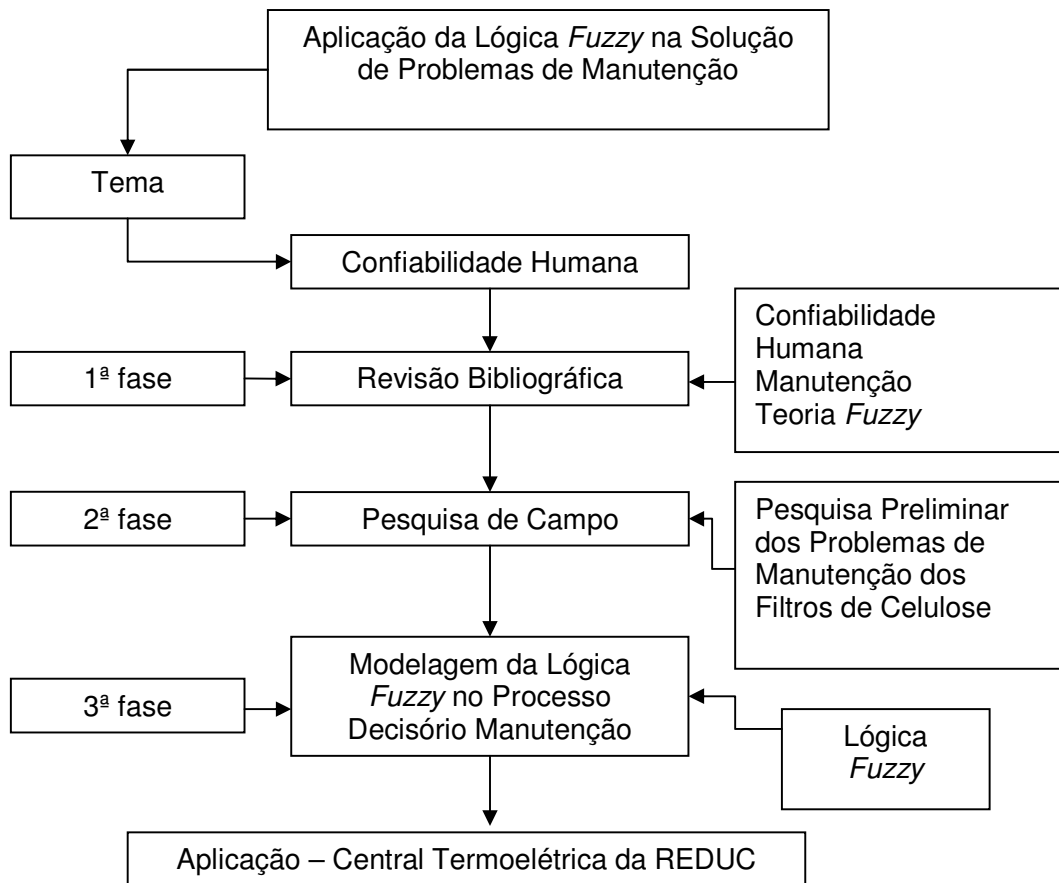


Figura I – Procedimento Metodológico da Dissertação.

### Organização do Trabalho

O presente trabalho é apresentado de acordo com a seguinte estruturação:

Na introdução apresentam-se a justificativa, os objetivos gerais e específicos, a metodologia aplicada bem como a estrutura do trabalho.

No capítulo I é realizada uma revisão bibliográfica das abordagens sobre Agente racional, Identidade do comportamento, a Manutenção Total da Produtividade – TPM e as principais metodologias da confiabilidade humana, destacando a aprendizagem e erro humano.

Ainda neste capítulo continua-se a revisão de bibliografia, agora, quanto aos modelos de confiabilidade pertinentes ao tema da manutenção, e também é apresentada uma breve evolução da teoria *Fuzzy*, sendo descritos as características da lógica *Fuzzy* e exemplo do seu processamento.

No capítulo II é realizada a descrição da proposta de utilização neste trabalho que envolve uma pesquisa descritiva e experimental do problema da confiabilidade no processo de manutenção, com a hipótese da aplicação da teoria *Fuzzy* como agente racional no processo decisório da manutenção. É proposto o uso da lógica *Fuzzy* como agente racional a fim de auxiliar na tomada de decisão dos filtros de celulose de uma Refinaria de Petróleo.

No capítulo III é descrito o estudo de caso de manutenção dos filtros de celulose de uma Refinaria de Petróleo considerando as tensões geradas aos especialistas em operação de máquinas e equipamentos que trabalham em regime de turno ininterrupto, sendo submetidos diariamente a fenômenos correspondentes ao processo decisório, como comportamento, emergências operacionais, fadiga o que geram conflitos e improdutividades. Ainda neste capítulo é apresentada uma análise do experimento através de uma simulação no software *Fuzzy tools* do *MATLAB 6.5*.

Ao final conclui-se que a aplicação da teoria *Fuzzy* pode auxiliar na tomada de decisão na manutenção dos filtros de celulose de uma Refinaria de Petróleo. E são apresentadas as recomendações para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO I

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### I.1 Agente racional, Identidade e Comportamento

O Agente racional ou inteligente apresenta diferentes posicionamentos dos mais diversos pesquisadores. Assim, a tentativa de se encontrar uma única definição para o que se chama de inteligência ainda fracassa. Entretanto, existe um consenso: entidades que apresentam determinado comportamento, considerado inteligente, são os chamados *agentes*.

Para RUSSEL (1995), um agente é uma entidade que pode ser percebida pelo seu ambiente e agir sobre ele, ou ainda uma entidade que apresente algumas características da inteligência humana, funcionando contínua e autonomamente em um ambiente. Um Agente racional é aquele que age da forma mais correta, ou seja, aquela que lhe garanta maior sucesso, considerando seus objetivos e metas.

FERNEDA (1992) adotou a definição de que Agentes racionais são sistemas capazes de produzir e controlar seu próprio conhecimento dentro de certo domínio. Tal sistema deve ser capaz de realizar algumas tarefas tais como: decidir, classificar, diagnosticar, adivinhar, simular, obrigar, conceber ou planejar.

A evolução do conhecimento de um Agente racional, ou seja, sua aprendizagem leva a um resultado da comunicação dele com outros agentes (humanos ou artificiais). Os estudos neste aspecto têm evoluído de forma que hoje temos ferramentas, que através da interação com o homem, são capazes de modelar o raciocínio humano. Como exemplo destas ferramentas tem-se as Redes Neurais, os Algoritmos Genéticos e a Lógica *Fuzzy*. Esses sistemas vêm amigavelmente interagindo com o homem, aliviando seu fardo de cargas relativas à identidade e ao comportamento, cujas influências (muitas vezes negativas) interferem no processo decisório.

Para HABERMAS (1988), identidade refere-se tanto a uma propriedade complexa que as pessoas podem adquirir a partir de uma determinada idade, e que os torna independentes da influência das outras pessoas (autodeterminação), como a uma capacidade da pessoa de identificar-se consigo mesma de forma reflexiva (auto-realização). Portanto, a identidade é sempre uma relação dialética entre indivíduo e sociedade, entre suas identificações e as identidades reconhecidas pelos outros, entre distinção e semelhança e entre mudança e continuidade.

Esta relação dialética é retomada por RICOEUR (1991) em sua obra *O si-mesmo como um outro*, apresenta os conceitos de Mesmidade e Ipseidade para articular as dimensões da identidade e do “si-mesmo” dentro do universo da pessoa humana.

Segundo o autor, o “si-mesmo”, apesar de estar sujeito a transformações, organiza ao longo da vida uma biografia a partir das vivências e interações sociais. Ao ser assumido de forma narrativa pelo indivíduo, esta biografia, baseada num conjunto de traços e identificações, toma a forma de caráter pessoal e acaba por constituir a ipseidade do mesmo.

Já o comportamento é um conjunto de atitudes e reações do indivíduo em face do meio social. O comportamento humano é o traço mais familiar do mundo em que as pessoas vivem. De acordo com SKINNER (1967) “o comportamento é uma interação entre o indivíduo e o ambiente”.

O estudo do comportamento humano no âmbito organizacional tem crescido muito, o foco destes estudos tem sido na área nuclear. RASSMUSSEN (1990) forneceu uma influência marcante no tempo de pesquisa dos fatores humanos na área nuclear. Ele considerava três tipos de comportamento humano: comportamento baseado na destreza (onde existe uma relação automática “estímulo – resposta”; não existe um processo de interpretação ou diagnóstico e depende do nível de treinamento e prática, mas não da complexidade da tarefa); comportamento baseado em regras (é governado por regras que o operário conhece, tem um nível de prática menor do que o comportamento anterior devido a que as tarefas são executadas comparando a informação que se recebe com regras e padrões com os quais estão familiarizados usando o enfoque SE-ENTÃO, requer de certo nível de interpretação e diagnóstico) e o comportamento baseado no conhecimento, que depende totalmente dos conhecimentos do operário e habilidade para utilizá-los.

O modelo de Rassmussen é apoiado na suposição de que os seres humanos geralmente realizam suas tarefas no nível mais baixo possível para minimizar o volume de elementos de tomada de decisões ou de processos cognitivos. As tarefas baseadas na destreza requerem pouco ou nenhum processo de tomada de decisões e, por isso, ao receber o estímulo a tarefa é diretamente executada. No caso das tarefas baseadas em regras requer-se certo processo de tomada de decisões; por isso ao receber o estímulo inicial, a informação recebida passa por um processo de integração, processamento e planejamento do que será feito, isto é, seleção do procedimento adequado para a situação e sua execução.

## **I.2 Tópicos de Manutenção**

### **I.2.1 História da Manutenção**

A história da manutenção para SIQUEIRA (2005), pode ser dividida em três gerações distintas, cada uma caracterizada por um estágio diferente de evolução tecnológica dos meios de produção e pela introdução de novos conceitos e paradigmas. São elas:

- Primeira Geração – caracterizada pela Mecanização, que ocorreu ao final da Segunda Guerra Mundial, contava com máquinas simples e sobredimensionadas para função onde eram aplicadas, em consequência as sociedades da época pouco dependia de seu desempenho, exigindo somente que fossem restauradas quando apresentassem defeitos. A atividade de manutenção se limitava às tarefas preventivas de serviços (como limpeza e lubrificação) e tarefas corretivas de eliminação das falhas.
- Segunda Geração – iniciada aproximadamente em 1950 e resultado do esforço de Industrialização pós-guerra, esta geração acompanhou a disseminação das linhas de produção contínuas e registrou a primeira onda de escassez de mão de obra especializada advinda da velocidade de implantação da automação. Por causa disto, houve um maior esforço científico de pesquisa e desenvolvimento de técnicas de manutenção preventiva voltadas para a redução dos impactos das falhas nos processos de produção, gerando então as técnicas de manutenção preditivas que se destacaram na indústria aeronáutica, voltadas para as técnicas de qualidade total.
- Terceira Geração – é a fase da Automatização, onde o consumo em larga escala dos produtos industrializados elevou o nível de dependência da sociedade aos produtos industriais. Com isso houve também elevação de custos, de mão de obra e de capital associados à concorrência mundial, que conduziram à prática do dimensionamento dos equipamentos no limite dos processos, reduzindo suas faixas operacionais e aumentando a importância da manutenção.

A dependência por parte dos serviços essenciais e de utilidade pública aos processos automáticos impôs então a exigência de requisitos de maior disponibilidade, confiabilidade, qualidade e garantia de desempenho dos produtos. Além disto, evoluiu nas pessoas a consciência da importância da preservação do meio ambiente e da garantia da segurança aos usuários dos processos e produtos industriais. Esta conscientização motivou então ao surgimento de metodologia de manutenção voltada para a confiabilidade.

A geração atual é, ainda, o berço das maiores contribuições relacionadas às metodologias de gestão da manutenção, abrangendo desde o surgimento das primeiras técnicas de monitorização da condição (manutenção preditiva – MPd), como aprimoramento da MP no princípio desta fase; a utilização de ferramentas de auxílio à decisão e a análise de risco; o surgimento do método de análise dos modos de falha e seus efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis* – FMEA) e de sistemas especialistas; a maior atenção na fase de projeto a aspectos de confiabilidade e manutenibilidade, até a criação de grupos de trabalho multidisciplinares, com o envolvimento de todos os níveis hierárquicos da companhia, para o estabelecimento de metodologias mais eficientes no gerenciamento de ativos, tais como o TPM (Total Production Maintenance) e RCM (Reliability Centred Maintenance) (MOUBRAY, 1997).

O TPM e a RCM são os dois programas de gestão da manutenção mais usados no mundo (FLEMING, 2000).

Na década de 60 do século passado, formou-se um grupo de estudos, o *Maintenance Steering Groups* – MSG (Grupo de Direcionamento da Manutenção), liderado por Stanley Nowlan e Howard Heap, reunido pela *Federal Aviation Administration* – FAA, órgão americano responsável pela regulamentação das linhas aéreas, com o intuito de avaliar os métodos de manutenção utilizados e propor alternativas para o incremento da confiabilidade.

A alta taxa de “mortalidade infantil”, seguida de uma faixa de taxa de falha constante, finalizando com um aumento exponencial até o descarte, que representa a curva da banheira, foi considerada como padrão de representação da vida útil de equipamentos até o início da década de 1970. Então, verificou-se que cada vez mais equipamentos se caracterizavam por apresentarem modos de falhas distintos dos até então conhecidos (MATA FILHO et al., 1998)

Os resultados destes estudos foram transformados em documento MSG1, em 1969. O mesmo foi aperfeiçoado em 1970 surgindo o MSG2. E em 1978, este relatório aperfeiçoado foi publicado como *Reliability Centred Maintenance* – RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC).

Por fim, em 1993 foi publicada a última revisão, o MSG 3, que traz uma abordagem mais ampla de gestão dos itens, incorporando a terotecnologia (projetistas da área de manutenção atuando junto ao projeto, na definição da melhor localização, instalação, acesso e forma de mantê-lo) (MATA FILHO et al., 1998). O relatório de Nowlan e Heap e o MSG 3 formam a base para programas de MCC na indústria aeronáutica, como também para programas derivados, como o RCM 2, o mais utilizado nas diversas áreas da indústria (SIQUEIRA, 2000).

A MCC é uma metodologia utilizada para assegurar que qualquer item, sistema ou processo mantenha suas funções, controlando os riscos de segurança e integridade ambiental, a qualidade e a economia, por meio das políticas de manutenção existentes (VIZZONI, 1998).

FLEMING (2000) define MCC como “uma consideração sistemática das funções do sistema, o modo como estas funções falham e um critério de priorização explícito baseado em fatores econômicos, operacionais e de segurança, para a identificação de tarefas de manutenção aplicáveis e custo/eficientes”.

A Refinaria Duque de Caxias - REDUC, onde foi feito o estudo de caso proposto neste trabalho, utiliza a TPM como ferramenta fundamental em busca da confiabilidade operacional. Assim, focarei o estudo nesta metodologia.

### **I.2.2 Manutenção Total da Produtividade – TPM**

Envolve todos os setores da organização e que teve a sua origem no TQM (*Total Quality Management* - Gestão da Qualidade Total) conduzida pelas áreas de manufatura. Entre os primeiros conceitos, destaca-se uma frase de NAKAGIMA (1989), referente ao assunto, definindo TPM como a “Manutenção conduzida com a participação de todos”. Neste sentido a palavra “todos”, significa exatamente, o envolvimento de todo o pessoal, incluindo os elementos da média e alta direção num trabalho conjunto e não um trabalho a ser conduzido pelos operadores de forma voluntária e que não lhes diz respeito.

Para WILMOTT (1995), TPM é definido como “TQM com dentes”, pois ele enfatiza a importância das pessoas numa filosofia de “capaz de fazer” e “melhoria contínua” e a importância do pessoal da produção e manutenção trabalharem juntos. Segundo MIRSHAWKA e OLMEDO (1994), TPM (ou MPT) é um programa organização, desde a alta administração até os trabalhadores da linha de produção. Com isto os autores querem ressaltar que um programa de TPM abrange todos os departamentos, incluindo-se os departamentos de Manutenção, Operação, Transportes e outras facilidades, Engenharia de Projetos, Engenharia de Planejamento, Engenharia de Construção, Estoques e Armazenagem, Compras, Finanças e Contabilidade e Gerência da Instalação.

Segundo ROBERTS (2001) do Departamento de Tecnologia e Engenharia Industrial da *Texas A&M University-Commerce*, o TPM traz um novo conceito com relação ao envolvimento do pessoal da produção na manutenção dos equipamentos das plantas e instalações, pois incentiva o aumento da produtividade e ao mesmo tempo levanta a moral dos trabalhadores e sua satisfação pelo trabalho realizado. Relacionando também com a Qualidade Total, ele observa: “O sistema TPM nos recorda o conceito popular de TQM, que surgiu em 1970 e se mantém popular no mundo industrial. Eles têm muitas ferramentas em comum, como a delegação de funções e responsabilidades cada vez maiores aos trabalhadores, indicadores de sua melhoria e otimização.

No trabalho que descreve a “Implantação de um Programa de Manutenção Produtiva Total em uma Indústria Calçadista em Franca”, SALTORATO e CINTRA (1999), consideram que: “A Manutenção Produtiva Total é uma filosofia de gerenciamento global”.

A Manutenção Produtiva Total é uma filosofia de gerenciamento global da manutenção que constitui um dos pilares do “*Just in Time*”, significando a integração da manutenção com a produção pelo envolvimento dos operadores nas atividades de limpeza, conservação e manutenção das máquinas que operam. Desta forma, eles entendem que através da participação ativa de todos os envolvidos no processo, de forma contínua e permanente se conseguirá zero quebra, zero defeito e zero perda no processo.

Ao estabelecer as relações das ferramentas da produtividade com a Automação, que junto com o JIT (*Just-in-Time*) se constituem nos pilares de sustentação do STP (Sistema Toyota de Produção), GHINATO (1996) define a Manutenção Produtiva Total, “como uma abordagem de parceria entre a produção e a manutenção, para a melhoria contínua da qualidade do produto, eficiência da operação, garantia da capacidade e segurança”.

Percebe-se que na concepção de GHINATO (1996), assim como de outros autores, o TPM está intimamente ligado às dimensões da qualidade intrínseca, preço, prazo, atendimento, moral e segurança, significando que além de manter a operação, o TPM também mantém a competitividade da empresa, proporcionando a sua sobrevivência. Para TAKAHASHI e OSADA (1993) a Manutenção Produtiva Total, é uma campanha que abrange a empresa inteira, com a participação de todo o corpo de empregados para conseguir a utilização máxima do equipamento existente, utilizando a filosofia do gerenciamento orientado para o equipamento. Com esta campanha, eles entendem que melhorando às máquinas, dispositivos e acessórios para torná-los mais confiáveis, seguros e de fácil manutenção, treinando todo o pessoal para operá-los com eficiência e segurança, se estará despertando o interesse dos operadores, educando-os para que cuidem das máquinas da fábrica e garantindo a qualidade do produto.

A análise das diversas definições e conceitos leva a um consenso de que o TPM busca criar uma nova forma de trabalho, que maximize a eficiência de todo o sistema produtivo. Por isso, o TPM não deve ser encarada como uma simples ferramenta ou programa. Afinal o TPM é focada nas pessoas, usando o equipamento como material “didático” em seu desenvolvimento.

Segundo ROBERTS (2001) do Departamento de Tecnologia e Engenharia Industrial da Texas A&M *University Commerce*, a abordagem sobre intitulado “A Manutenção Produtiva Total – Tem origem divergentes: “Alguns afirmam que teve início na indústria de manufatura americana faz mais de quarenta anos. Outros o associam ao plano que se usava na Nippondenso, fábrica de componentes elétricos para automóveis, fornecedora da “*Toyota Motor Company*” do Japão no final da década de 1960.



No entanto, foi Seiichi Nakajima, um alto funcionário do Instituto Japonês de Planejamento de Manutenção (JIPM) quem recebeu o crédito de haver definido os conceitos de TPM e contribuir para a implementação em diversas fábricas no Japão.

No aspecto essencialmente conceitual, a Manutenção Produtiva Total, ou *Total Productive Maintenance*, significa a Falha Zero e Quebra Zero das máquinas ao lado do Defeito Zero nos produtos e Perda Zero no processo. Mais que um simples conceito, ela representa a mola mestra do mais que um simples conceito, ela representa a mola mestra do desenvolvimento e otimização da performance de uma indústria produtora, através da maximização da eficiência das máquinas, com o envolvimento incondicional do capital humano. O TPM, apesar de ter surgido no Japão há décadas, só chegou aos Estados Unidos em 1987, e logo em seguida foi introduzida no Brasil a partir das diversas visitas do “criador” da técnica, o Dr. Seiichi Nakajima.

Segundo KARDEC e NASCIF (2003), a TPM está diretamente relacionado com o gerenciamento da qualidade total (Total Quality Management –TQM), contudo observa-se algumas diferenças. A Tabela I.1 apresenta as principais distinções entre o TPM e a TQM.

Tabela I.1– Diferenças TPM x TQM.

CARACTERÍSTICA	TPM	TQM
Propósito	Eliminar perdas desperdícios	Qualidade do processo
Como atingir o propósito	Participação intensiva de pessoal	Aplicar o uso de software para sistematizar a gestão
Processo	Entrada no processo influenciada pela melhor utilização dos equipamentos	Garantir a qualidade na saída do processo

Para PALMEIRA e TENÓRIO (2002), desde seu nascimento em 1971 o TPM seguiu uma evolução constante que pode ser dividido em quatro gerações:

Primeira geração – No início do TPM as ações para maximização da eficiência global dos equipamentos focavam apenas as perdas por falhas e em geral eram tomadas pelos departamentos relacionados diretamente ao equipamento.

Segunda geração – A segunda geração do TPM tem início na década de 80, período em que o objetivo de maximização da eficiência passa a ser buscado por meio da eliminação das seis principais perdas observadas nos equipamentos: perda por quebra ou falha, perda por preparação e ajuste, perda por operação em vazio e pequenas paradas, perda por velocidade reduzida, perda por defeitos no processo e perda no início da produção.

Terceira geração – No final da década de 80 e início da década de 90 surge a terceira geração do TPM, cujo foco deixa de ser somente o equipamento e passa a ser o sistema de produção. A maximização da eficiência passa a ser buscada então por meio da eliminação de dezesseis grandes perdas, divididas de acordo com a Tabela I.2 abaixo.

Tabela I.2 – Perdas ligadas a maximização da eficiência.

TIPOS DE PERDAS	MODO DAS PERDAS
Oito perdas ligadas aos equipamentos	Por quebra ou falha, por instalação e ajustes, por mudanças de dispositivos de controle ou ferramentas, por início de produção, por pequenas paradas e inatividade, por velocidade reduzida, por defeitos e retrabalhos e perda por tempo ocioso.
Cinco perdas ligadas às pessoas	Falha na administração, perda por mobilidade operacional, perda por organização da linha, perda por logística e perda por medições e ajustes
Três perdas por recursos físicos de produção	Perda por falha e troca de ferramentas e gabaritos, perda por falha de energia e perda de tecnologia

Quarta geração – A quarta geração tem início a partir de 1999, considera que o envolvimento de toda a organização na eliminação das perdas, redução dos custos e maximização da eficiência ainda é limitado. Essa geração contempla uma visão mais estratégica de gerenciamento e o envolvimento também de setores como o comercial, de pesquisa e desenvolvimento de produtos, para eliminação das perdas divididas entre processos, inventários, distribuição e compras. A Tabela I.3 – apresenta um resumo das quatro gerações do TPM.

Tabela I.3 – Resumo das quatro gerações do TPM.

GERAÇÃO	ESTRATÉGIA	FOCO	PERDAS
Primeira e Segunda	Máxima eficiência	Equipamento	Seis principais perdas nos equipamentos (falhas)
Terceira	Produção e TPM	Sistema de produção	Dezesseis perdas (equipamentos, fatores humanos e recursos na produção)
Quarta	Gestão e TPM	Empresa	Vinte perdas (processo, inventário, distribuição e compras)

O TPM tem feito tanto sucesso que nesses poucos anos, em quase todas as partes do mundo, os gerentes de manutenção, produção e de planta estão falando sobre TPM, tentando descobrir algo mais sobre o método ou aprendendo a implementá-lo mais corretamente. Das fábricas eletrônicas na Malásia às empresas montadoras de carros nos EUA e na Europa, das indústrias de processo de alumínio no Canadá às grandes siderúrgicas e fábricas de papel do Brasil, estão todas buscando estruturar sua versão do TPM como um remédio para seus problemas de ineficiência e produtividade.

Com o TPM procura-se melhorar as operações da planta, aumentar a produtividade e reduzir os custos. Faz-se necessário, no entanto, que isso seja realizado de forma correta, para que se possa chegar aos resultados esperados. Há que se levar em conta principalmente o clima organizacional e a cultura da empresa: o TPM já produziu benefícios no Japão, EUA e Brasil, além de diversos outros países, principalmente da Ásia, porém, pode não levar aos mesmos bons resultados na empresa caso se tente simplesmente copiar o sistema japonês.

O órgão encarregado da veiculação e implementação das atividades é o Instituto Japonês de Planejamento de Manutenção. Para marcar a conquista da perfeição da manutenção, o JIPM concede anualmente o *Gran-Prix* PM, outorgando-o após uma avaliação criteriosa, às empresas que se destacaram e que conquistaram resultados significativos através do TPM. Pode-se ressaltar que quase na totalidade elas gozam de uma elevada reputação junto ao mercado, sendo consideradas exemplares em termos de qualidade e produtividade. Isto significa que TPM é um meio mais do que apropriado para o desenvolvimento e progresso de uma organização.

Devido a sua introdução ter sido através de uma empresa de manufatura (a Nippondenso, conforme já citado), inicialmente o TPM foi expandida dentro da área de indústrias de manufaturas e montagens. Ainda nos anos de 1980, o TPM passou a ser aplicada também nas indústrias de processo, como Indústrias Químicas, de Plástico, Papel e Celulose, Farmacêuticas e Alimentícias.

Os processos industriais estão enormemente envolvidos numa nova modalidade operacional, através da incorporação cada vez maior de robôs e automações conhecidos como mecatrônica, ou seja, a junção da mecânica com a eletrônica. Desta forma, é premente a necessidade de um pessoal operacional e de manutenção muito mais preparados, dotados de novas capacidades e outros conhecimentos técnicos. O TPM propicia também os recursos necessários para a conquista e o domínio desta nova conjuntura. Com a competitividade entre as empresas tornando-se cada vez mais acirrada, as empresas buscam a eliminação de todas as modalidades de desperdícios e perdas, com procura da eficiência maior mesmo em condições limites.

Para a conquista dos desafios cada vez mais difíceis, há a necessidade de uma motivação apropriada. O *Gran-Prix* PM, outorgado através de uma avaliação criteriosa em consonância com a política industrial recomendada pelas autoridades governamentais, constitui um mecanismo apropriado para o objetivo em questão. NAKAJIMA (1989) foi um dos primeiros estudiosos a conceituar o assunto TPM, segundo ele, “algumas das empresas que conquistaram o Prêmio PM conseguiram incrementar a produtividade em 50% e reduzir o nível de defeito para 1/10 do anteriormente vigente”, ou seja, estes são números que realmente chamam a atenção pela sua relevância. De acordo com NAKAJIMA (1989) a diferença da área de trabalho com e sem TPM é gritante. Ele coloca que: “É o mesmo que comparar um homem sadio com um outro doente. O primeiro trabalha com disposição, empenho e vigor, enquanto que no segundo se percebe a sobrecarga e a dificuldade, associados a uma tensão da incerteza do futuro. Infelizmente não existem remédios miraculosos ou mágicos capazes de recuperar as máquinas e equipamentos que sofreram desgastes ou quebras. Gasta-se tempo e dinheiro para sanar estes problemas e recuperar as máquinas e equipamentos”. Em continuidade, ele coloca: “O TPM representa uma forma de revolução, pois conclama a integração total do homem x máquina x empresa, onde o trabalho de manutenção dos meios de produção passa a constituir a preocupação e a ação de todos”.

Segundo A. Roberto Muller, presidente da *Asea Brown Boveri* do Brasil, prefaciando MIRSHAWKA E OLMEDO (1994): “... assim como TQC – *Total Quality Control* – TPM também buscou as siglas iniciais do inglês – *Total Productive Maintenance* e objetiva promover a integração da manutenção do sistema produtivo, de forma total, tanto nos aspectos administrativos como operacionais”.

Fazer TPM significa montar uma estrutura onde haja a participação de todos os escalões, desde os da alta direção até os operacionais de todos os departamentos, ou seja, uma nova sistemática de manutenção, com envolvimento de todos. Trata-se da efetivação de um “*Equipment Management*”, isto é, a administração das máquinas por toda a organização.

Por hábito, quando se lida com equipamentos tem-se uma pré-concepção de que é até normal ou natural que eles apresentem defeitos e deixem de operar. Esse paradigma é especialmente combatido pelo TPM que procura dar às pessoas a visão de que um equipamento pode alcançar quebra zero, de que o ambiente em volta dele pode ser mantido impecável e de que não apenas em sonho, pode-se pensar em usinas nucleares, na verdade para se chegar a este estágio, é necessário trabalhar muito mais com as atitudes do que com a habilitação do pessoal para a manutenção. Em primeiro lugar deve-se terminar com alguns limites, com algumas linhas divisórias, com alguns mitos como: “eu opero a máquina e quando ela quebrar você conserta”.

### **I.2.2.1 Objetivos e Aplicações do TPM**

A interpretação das definições e conceitos de TPM permite destacar alguns objetivos desta nova modalidade de gestão. Segundo MIRSHAWKA e OLMEDO (1994) os cinco principais conceitos listados a seguir são: garantir a eficiência global das instalações, implementar um programa de manutenção para otimizar o ciclo de vida dos equipamentos, requerer o apoio dos demais departamentos envolvidos no plano de elevação da capacidade instalada, solicitar dados e informações de todos os funcionários da empresa, e incentivar o princípio do trabalho em equipe para consolidar ações de melhoria contínua.

A – Garantir a eficiência global das instalações. Ou seja, deve-se operar em sincronia com a velocidade projetada, produzir na taxa planejada e fornecer resultados de qualidade em harmonia com velocidade e taxa. O grande problema que envolve os equipamentos é que em muitas empresas brasileiras não se sabe corretamente qual é a velocidade de projeto ou qual é a taxa de produção. Quando a gerência não conhece as respostas convenientes para a velocidade de projeto e/ou a taxa de produção, ela estabelece cotas de produção arbitradas. O segundo problema é que, com o passar do tempo, pequenos entraves fazem com que os operadores mudem a taxa, com a qual manipulam o equipamento. À medida que essas dificuldades persistirem, o resultado da máquina em termos de trabalho pode ser de apenas 50% da capacidade, para a qual ela foi construída. Isto, sem dúvida nenhuma, pode conduzir a um investimento adicional de capital no equipamento, na tentativa de se alcançar à saída de produção exigida.

B – Implementar um programa de manutenção para otimizar o ciclo de vida dos equipamentos.

É análogo a dizer que se deve criar o que atualmente chamam de programa de manutenção preventiva e preditiva (MP/MPRED). Tem-se aqui uma meta básica, ou seja, a de se instalar um programa que funcione de acordo com as mudanças que ocorram no equipamento.

Cada peça do equipamento, à medida que vai envelhecendo, exige diferentes tipos de cuidados e dedicação quanto ao atendimento da manutenção; um bom programa de manutenção preventiva e preditiva naturalmente leva em conta essas variações no tratamento das peças. Através da manutenção dos registros de falhas, das chamadas para atender a complicações, e das condições básicas do próprio equipamento, o programa é modificado para estar de acordo com as necessidades da máquina. Ao operador é então exigido que faça a limpeza básica e a lubrificação do equipamento, o que de fato constitui a “primeira linha de defesa” contra muitas causas de defeitos e complicações. À alta administração pode-se requerer que autorize e garanta que a manutenção tenha o tempo suficiente para que possa terminar no prazo correto, qualquer serviço ou reparo exigido, com o objetivo de conservar a máquina na condição que assegure o seu funcionamento nas taxas projetadas.

C – Requerer o apoio dos demais departamentos envolvidos no plano da elevação da capacidade instalada. Assim, por exemplo, ao se incluir a manutenção de equipamentos nas decisões de projeto/compra assegura-se que a padronização da máquina vai ser levada em consideração e obedecida. Os itens inerentes a esse assunto podem sozinhos contribuir de forma significativa em grandes economias para a empresa. A padronização reduz os níveis de estoque, as exigências de treinamento e os tempos de partida. Outro procedimento importante é o apoio dado à manutenção pela armazenagem. Bom atendimento logístico pode reduzir em muito o tempo em que a produção fica interrompida, porém mais importante do que isto é a otimização dos níveis de estoque, ou ao menos, tentar evitar a existência de grandes estoques.

D – Solicitar dados e informações de todos os funcionários da empresa. Ao se pedir aos empregados de todos os níveis que, com as suas aptidões e seus conhecimentos, colaborem na melhoria do processo de fabricação, além de se conseguir a integração, alcança-se uma das condições mais importantes para um excelente ambiente numa empresa: A satisfação do cliente interno. Em muitas empresas internacionais, esse item, às vezes, está englobado no programa de sugestões.

A prática da sugestão deveria ocorrer com muito mais freqüência nas empresas brasileiras; sugestões de como obter melhor manutenção, mais limpeza e organização. Contudo, a realidade de nossas fábricas não é nada fácil. Apesar dessa frustração no ambiente da empresa nacional, não se deve desanimar; é preciso buscar a eliminação dessa barreira e ir além. Incentivar ações de melhoria contínua. Quanto mais aberta for a gerência às idéias da força de trabalho, mais simples será para as equipes funcionarem.

Essas equipes podem ser formadas por áreas, por departamentos, por linhas de produção, por processos ou por equipamentos. Elas podem ser constituídas por operadores, pelo pessoal de manutenção e inclusive pelo pessoal da gerência.

Estes envolverão por sua vez, dependendo das necessidades, outras pessoas numa base de: “para cada problema chama-se às pessoas diretamente envolvidas”.

Assim não é nada estranho encontrar nos times de melhoria da manutenção (TMM) profissionais que estejam trabalhando na engenharia, nas compras e na armazenagem. Os TMM fornecem realmente respostas para problemas que algumas empresas têm tentado por muitos anos resolver de forma isolada ou independente. O grande indicador do sucesso do programa TPM é sem dúvida esse esforço ou trabalho de equipe.

### Características do TPM

Algumas características peculiares da TPM, que a diferenciam dos movimentos tradicionais, como o da manutenção corretiva, preventiva, preditiva ou da manutenção do sistema de produção. Algumas definições básicas se tornam necessárias para o bom entendimento da evolução dos sistemas de manutenção e suas principais diferenças e características.

A Manutenção Corretiva, ou Manutenção da Quebra (CBM, *Breakdown Maintenance*), é a mais primitiva das formas de efetuar manutenção, faz parte da primeira geração, e ainda é muito comum hoje não tendo sido de todo eliminada do dia-a-dia das empresas. A manutenção corretiva como designa o próprio nome, são realizadas depois que o defeito ocorreu e são de natureza emergencial. Elas normalmente não são programadas, sendo quase sempre executadas quando ocorrem paradas imprevistas da máquina por falhas ou defeitos ocupando, portanto, um período de tempo em que a máquina deveria estar operando.

Por outro lado a Manutenção Preventiva apresenta um avanço em relação à corretiva, pois tem o caráter preventivo de interferir em máquinas e equipamentos antes que ocorra a falha ou defeito. A Manutenção Preventiva usa como argumento de referência, a Manutenção Baseada no Tempo (TBM, *Time Based Maintenance*), que através do acompanhamento do tempo de operação, procede a manutenção periódica das máquinas e equipamentos obedecendo a um plano pré-estabelecido pelo fabricante ou experiência profissional. O grande inconveniente da Manutenção Preventiva, porém, está na troca de peças em períodos regulares que pode resultar em não aproveitamento da vida útil total das mesmas, já que as peças são trocadas por tempo e não por condições de uso.

A Manutenção Preditiva leva em grande consideração o aspecto econômico, considerando ser contraproducente parar uma máquina ou equipamento para executar serviços de manutenção preventiva quando o mesmo ainda apresenta condições boas de operação.

Assim, também deve ser evitado esperar que a máquina falhe para então repará-la. A Manutenção Preditiva é baseada nas condições (CBM, *Conditions Based Maintenance*), e na performance e no desempenho das máquinas e dos equipamentos no sistema de produção.

A adoção da Manutenção Preditiva leva a supor que seja a solução ideal para as falhas e defeitos nas máquinas e equipamentos, pois ela consiste em interferir na máquina para providenciar manutenção eficaz, no momento adequado. Tal momento é estabelecido mediante estudo e monitoramento cuidadosos dos vários elementos que intervêm no processo de operação, visando detectar a iminência de uma falha. A Manutenção do Sistema de Produção, segundo NAKAJIMA (1989) representa a integração da Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva. Os primeiros contatos das empresas japonesas com a Manutenção Preventiva ocorreram no início da década de 1950, com a apresentação desta pelos americanos. Tais técnicas americanas rapidamente evoluíram na década subsequente para Manutenção do Sistema da Produção e na década de 1970 se cristalizaram na Manutenção Produtiva Total.

### **I.2.2.2 Os Pilares do TPM**

A estrutura que fundamenta a implantação, garantindo o sucesso e até mesmo a sobrevivência de um modelo de gestão voltado para a qualidade e produtividade, deve estar muito bem fundamentada. Os pilares do TPM devem ser desenvolvidos em equipes, coordenadas pelos gerentes ou líder de cada equipe. A estruturação do TPM deve estar em consonância com a estrutura hierárquica da empresa. Em muitas empresas, o comitê diretor é formado pelo presidente e respectivos diretores e os comitês regionais são coordenados por seus gerentes e supervisores. Todo o trabalho de implantação dos pilares deve ter como foco as dimensões "PQCDSM" (produtividade, qualidade, custos, atendimento ao cliente, segurança e a melhor maneira de se atingir a metas do TPM é conhecer, analisar e eliminar as grandes perdas que podem ocorrer na empresa. Acidentes no trabalho, fluxo inadequado de documentos e limpeza inadequada são alguns exemplos de perdas. Para evitá-las, o trabalho do TPM é dividido em nove pilares, listados na seqüência:

- 1) Melhoria Específica – ajuda a entender as maiores perdas de cada área ou equipamento e a implantar melhorias para reduzi-las.

Etapas da Metodologia do Pilar Melhoria específica:

- a) Selecionar equipamento ou processo como modelo
- b) Organizar as equipes de Projetos.
- c) Detectar as perdas atuais.
- d) Definir as metas.
- e) Desdobramento das metas (plano de ação).



- f) Desdobramento, avaliação e análises das medidas defensivas.
- g) Implementação do plano.

2) Manutenção Autônoma – envolve e ensina os operadores, por meios de trabalhos nos equipamentos, a trabalhar em equipe, a conhecer e trabalhar melhor nos equipamentos. A Manutenção Autônoma é a interface produtiva entre a operação e manutenção (COSTA, 2004). A Manutenção Autônoma também ajuda a descobrir deficiências dos equipamentos, através dos planos de limpeza e inspeções, mostrando onde estão as maiores perdas e, portanto, o potencial de melhorias. Os dois lemas deste pilar são “do nosso equipamento nós cuidamos” e “limpeza e inspeção”.

Etapas da Metodologia do Pilar Manutenção Autônoma:

- a) Limpeza inicial (limpeza e inspeção).
- b) Medidas contra fontes de sujeiras e locais de difícil acesso.
- c) Elaboração de Normas Provisórias de Manutenção Autônoma.
- d) Inspeção geral (educação para capacitação técnica em inspeção com bases em manuais).
- e) Inspeção autônoma (revisão das normas de limpeza, lubrificação e inspeção).
- f) Padronização (padronização dos vários itens controlados no posto de trabalho visando à completa sistematização de manutenção).
- g) Controle autônomo (desenvolvimento de diretrizes e metas da empresa).

3) Manutenção Planejada – tem como objetivo aumentar a eficiência do equipamento, buscando a quebra zero.

Etapas da Metodologia do Pilar Manutenção Planejada:

- a) Reconhecimento da necessidade de uma estrutura de manutenção planejada (identificar problemas e funções atuais a partir do ambiente sob a qual a indústria ou empreendimento esteja capacitado a confirmar).
- b) Estabelecer objetivos, diretrizes e metas de manutenção planejada.
- c) Formação de uma organização e esclarecimento das respectivas posições (obtenção de um consenso pleno a respeito das funções, negócios a serem realizados e papéis a serem desempenhados dentro de uma organização de manutenção planejada).
- d) Esclarecimentos dos itens de implantação para estabelecimento da estrutura.

Para implantar a manutenção planejada a estrutura correspondente à mesma deve ser implantada principalmente pela divisão de manutenção planejada seguindo às seguintes orientações:

- Apoio e orientação às atividades.

- Atividades para alcance de zero falhas.
  - Estabelecimento de uma estrutura de manutenção planejada (sistema, padrão planejamento e controle de informação de manutenção).
  - Controle de lubrificação.
  - Controle de peças sobressalentes.
  - Controle dos custos de manutenção.
  - Pesquisas sobre manutenção preventiva
- h) Aprimoramento das tecnologias e conhecimentos sobre manutenção.
- e) Estudo de aspectos específicos de implementação referentes a cada item.(esclarecer problemas e objetivos anteriores).
- f) Organização do plano de Implementação.
- g) Verificação dos resultados e estabelecimentos do sistema de manutenção, compreender (captar) os fatores que foram alcançados conforme o planejamento inicial, e verificar se as metas podem ser alcançadas. Isto significa tanto controlar a manutenção como um empreendimento, quanto á maneira através da qual a fábrica é sistematizada.

4) Manutenção da Qualidade – busca zerar o número de defeitos que afetam o consumidor. A busca desta redução é feita de duas maneiras: prevenindo e plano de ação para que os problemas não voltem a ocorrer. Para prevenir os defeitos, o grupo faz um levantamento de pontos do equipamento que poderão gerar defeitos de qualidade. Estes pontos são chamados de “ponto Q”. Após o levantamento destes pontos, são implantados melhorias e controles para evitar novos defeitos.

Etapas da Metodologia do Pilar da Qualidade:

- a) Confirmação do Estado atual (confirmar padrão de qualidade e as características de qualidade).
- b) Pesquisar o processo que gerou defeitos.
- c) Pesquisar e analisar os defeitos.
- e) Estudar as medidas de combate aos defeitos e restaurar os defeitos.
- f) Analisar as condições para produtos não defeituosos que não estão confirmados.
- g) Implementar as melhorias e avaliá-las.
- h) Definir as condições que não produzem defeitos.

5) Controle inicial – objetiva garantir a melhor performance do equipamento adquirido através de uma abordagem sistemática de especificação, projeto de feedback ao projeto/fornecedores.

Etapas da Metodologia do Pilar Controle Inicial:

- a) Pesquisa e análise da situação atual (definir fluxo de trabalho atual, isolar o problema, captar a incorporação de medidas de prevenção).
- b) Estabelecer o sistema de Controle Inicial.(estudar e estabelecer um sistema básico para controle inicial e definir o alcance da aplicação do sistema).
- c) Treinamento do novo sistema. Estabelecer modelos (números de itens suficientes para que todos os projetistas possam ter a experiência e temas adequados aos níveis dos projetistas) para homogeneizar, e para aprimorar o sistema e implantar atividades.
- d) Utilização completa e Fixação do novo Sistema (expansão do âmbito de aplicação a todos os temas).

6) Educação e treinamento – todo o trabalho de implantação de novas tecnologias exige mudanças nas pessoas. Muito treinamento e educação básica são fundamentais. Esse pilar possibilita aumento de conhecimento, desenvolvimento de habilidades e as mudanças comportamentais. As duas ferramentas mais importantes são: “matriz e habilidades” (onde os participantes discutem conhecimentos necessários para executar funções); e “lição ponto-a-ponto” (que é uma maneira de adquirir e de se transmitir conhecimentos rápidos aos companheiros de equipe, sobre determinado assunto específico, com duração de cinco minutos, aproximadamente).

Etapas da Metodologia do Pilar Educação e Treinamento:

- a) Estabelecimento de políticas e medidas prioritárias através da investigação do estado atual de Educação e Treinamento.
- b) Estabelecimento de Sistema de Treinamento para aprimoramento de habilidades de manutenção e operação.
- c) Aprimoramento das atividades de Manutenção e Operação.
- d) Consolidação do ambiente de desenvolvimento voluntário.
- e) Avaliação de atividades e estudos de abordagem futura.

7) Saúde e segurança e Meio Ambiente – ser elaborado um programa de treinamento preventivo, auditoria de riscos, gestão visual e de acompanhamento das providências. Dispositivos de segurança devem ser colocados nos locais críticos para evitar acidentes. O Meio Ambiente, por sua importância no contexto mundial, não poderia ficar fora do foco principal da TPM. Assim, esse pilar cumpre o objetivo de através dos auditores ambientais, preservar o meio ambiente das influências negativas que os equipamentos de operação possam trazer.

Etapas da Metodologia do Pilar SMS:

- a) Conscientização e valorização do Meio Ambiente e redução dos defeitos.

- b) Atividades de melhorias para prevenção de acidentes e redução de defeitos.
- c) Conhecimentos e conscientização das atividades de prevenção do perigo.
- d) Medidas contra fontes de erros humanos.
- e) Garantia da segurança quando das paralisações ou outros trabalhos.
- f) Orientação e treinamento individual no local de trabalho.
- g) Educação e conscientização do grau de periculosidade das matérias e ferramentas manuseadas.
- h) Suporte cooperativo dos operadores nas atividades de prevenção de acidentes.
- i) Completa segurança no transito dentro dos limites da empresa.

8) Melhoria nos processos administrativos (TPM OFFICE) – o objetivo deste pilar é aumentar a velocidade e principalmente a qualidade das informações que passam por estas áreas, e eliminar a “papelada” desnecessária. Apresentada a teoria sobre a indústria extrativa e a definição, objetivos, características, relação com o 5S, e os nove pilares do TPM.

Etapas da Metodologia do Pilar TPM Office:

- a) Atingir resultados tangíveis.
- b) Lidar com escritórios com os mesmos conceitos de uma fábrica.
- c) Aplicar abordagem dos equipamentos para o TPM de escritório.
- d) Delinear o que o setor deve ser, e estabelecer esta meta para poder alcançá-la.

A figura I.1, Mostra o Modelo dos Pilares do TPM.

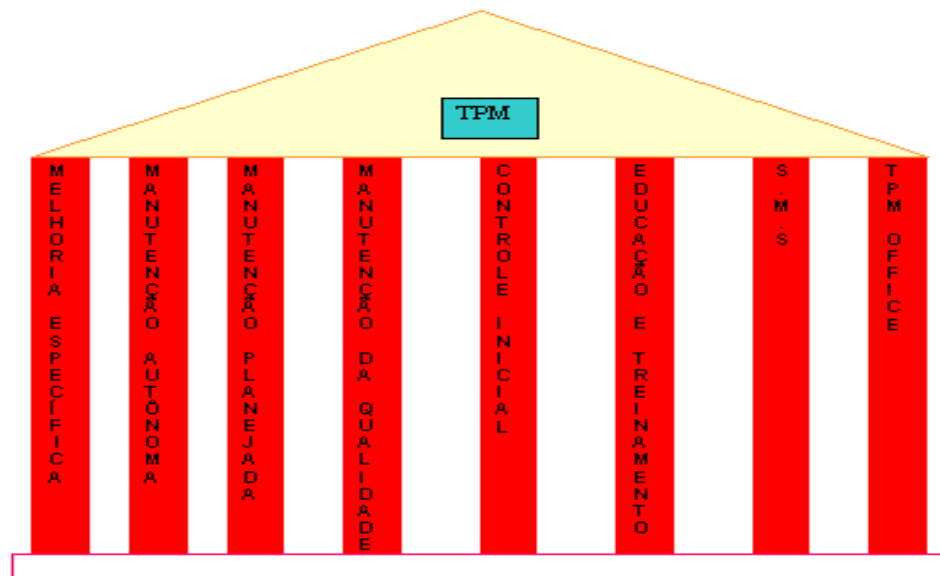


Figura I.1 – Os Pilares do TPM.

### Trabalhos nas Várias Áreas

Empresas de renome internacional podem ser citadas como exemplo de sucesso com a implementação de TPM e que serviram e servem de “*benchmarking*” para a divulgação e ampliação do uso deste modelo de gestão. ROBERTS (2001) do Departamento de Tecnologia e Engenharia Industrial da Texas A&M *University-Commerce*, observa que as empresas, Ford, Eastman Kodak, Dana Corp., Allen Bradley, Harley Davidson, são algumas das empresas que têm implantado TPM com êxito.

Conforme relata o autor, todas elas conseguiram um aumento de produtividade, graças à implantação da TPM. Na Kodak, por exemplo, ele conta que com um investimento de 5 milhões de dólares, foi conseguido aumentar o equivalente à 16 milhões de dólares em benefícios de produtividade, diretamente derivados do TPM. Em outro exemplo, o autor relata que em uma fábrica de aparelhos domésticos conseguiu-se a redução do *setup* (preparação – troca de ferramentas) através do TPM, de várias máquinas, de 4 a 6 horas para vinte minutos. Isto equivale a ter disponível, 2 a 3 máquinas a mais, ao valor médio de 1 milhão de dólares cada. Em algumas divisões da Texas Instruments, comenta o autor, o TPM proporcionou o aumento de 80% de produtividade.

Praticamente, segundo ROBERTS (2001), as empresas acima mencionadas asseguraram haver reduzido o tempo perdido por falhas nos equipamentos em 50% ou mais, além da redução do inventário e aumento significativo na pontualidade da entrega, reduzindo também a necessidade de subcontratar serviços para regularizar a demanda. Ele coloca ainda que: “... com a competitividade como nunca houve, é indubitável que o TPM é a diferença entre o êxito e o fracasso para muitas empresas. A sua eficiência é comprovada não só em plantas industriais, mas também na construção civil, manutenção de edifícios e várias outras atividades, inclusive vários esportes”.

### I.3 Tópicos de Confiabilidade Humana

A confiabilidade humana  $R(H)$  segundo PALLEROSI (2007) é uma seqüência lógica do estudo da Confiabilidade dos equipamentos, onde segundo COSTA (2006) envolve uma noção de, na durabilidade e presteza em operar sem falhas.

Reconhecendo que o homem falha, e que estas falhas podem ser classificadas, quantificadas e matematicamente analisadas por meio de adequada distribuição estatística. Assim ela é descrita como a probabilidade de que uma pessoa não falhe no cumprimento de uma tarefa requerida, quando exigida. Seguindo a expressão:

$$R_H = 1 - F_H, \text{ onde } F_H \text{ é a probabilidade de falha.} \quad (I.1)$$

Logo a Confiabilidade total (Máquina +Homem) é do tipo arranjo série, dada pelo produto:

$$R_t = R_{máq} \cdot R_H \quad (I.2)$$

A definição mais empregada da Confiabilidade humana é, segundo FILHO (1991) “a probabilidade de um desempenho bem sucedido de tarefa pelo homem em qualquer estágio no sistema operativo dentro de tempo mínimo especificado”.

A revolução industrial trouxe grande desenvolvimento para a humanidade. Houve um grande foco para o aumento dos processos produtivos. Esta caminhada até os dias de hoje, aponta uma preocupação constante no desempenho dos equipamentos e serviços, no que diz respeito à: disponibilidade, manutenção e durabilidade, etc. O homem assim passou a ter grande participação no planejamento, na organização na ação e nos controles dos processos produtivos. Logo, estudos ligados ao comportamento humano, têm tido um foco cada vez maior.

De modo análogo aos equipamentos, as taxas de falhas humanas se enquadram em três distintos períodos de atuação (PALLEROSI, 2007), como mostra a figura I. 2.

- I. Falhas no período inicial (aprendizagem), com quantidades de falhas decrescentes.
- II. Falhas aleatórias (distribuição tipo Exponencial), após a conclusão do período de aprendizagem.
- III. Falhas crescentes, caracterizadas por estresse prolongado, incapacidade progressiva ou outros fatores gerados por degradação física, ambiental ou outras condições, de modo cumulativo.

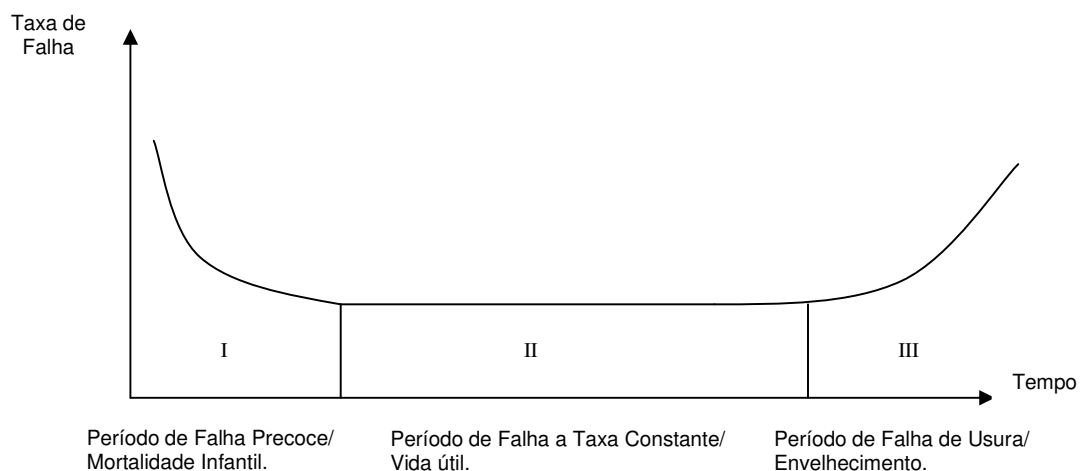


Figura I.2 – Curva da banheira (PINHO, 2000).

A relação entre a Confiabilidade de Equipamento e a Confiabilidade Humana é mostrada na tabela I.4.

Tabela I.4 – Relação entre as Confiabilidades.

CONFIABILIDADE HUMANA		CONFIABILIDADES DE EQUIPAMENTOS
I	Falhas no período inicial (aprendizagem), com quantidades de falhas decrescentes.	Período de Falha Precoce/Mortalidade infantil
II	Falhas aleatórias (distribuição tipo Exponencial), após a conclusão do período de aprendizagem	Período de Falha a Taxa Constante/Vida útil
III	Falhas crescentes, caracterizadas por estresse prolongado, incapacidade progressiva ou outros fatores gerados por degradação física, ambiental ou outras condições, de modo cumulativo	Período de Falha de Usura/ Envelhecimento

### I.3.1 Principais Metodologias Usadas na Confiabilidade Humana

Os estudos do erro humano iniciaram-se em meio aos primeiros estudos da Ergonomia, mas foram SWAIN E GUTTMAN (1983) que primeiro sistematizaram a análise da confiabilidade humana para uso nos procedimentos de Avaliação Probabilística de Risco em plantas nucleares. O método desenvolvido por esses autores, denominado THERP: *Technique for Human Error Prediction* – baseava-se na decomposição da tarefa humana em elementos, na atribuição da probabilidade de erro humano a cada elemento, na determinação de fatores influenciadores do desempenho e da dependência entre estes elementos e finalmente, na quantificação da probabilidade total de erro na tarefa. Acidentes relevantes aconteceram no final da década de 80, muitos deles causados pela inadequação do projeto dos sistemas às capacidades cognitivas humanas. Isto motivou uma nova geração de técnicas de Análise da Confiabilidade Humana, fortemente baseadas no entendimento dos mecanismos da cognição humana.

O maior expoente desta tendência foi sem dúvida James Reason, que publicou sua teoria sobre o erro humano (GEMS – *Generic Error Modeling System*), definindo erro humano como todas as ocasiões em que uma seqüência planejada de atividades mentais ou físicas falham em atingir o resultado pretendido e quando estas falhas não podem ser atribuídas à intervenção do acaso. REASON (1990) mostra, em seu trabalho, que os erros humanos decorrem de uma sub-especificação cognitiva e que podem se manifestar de uma variedade de formas.

REASON (1990), ainda aponta quatro grandes elementos na produção de um erro: a natureza da tarefa, as circunstâncias do ambiente, o mecanismo cognitivo que gerencia o desempenho humano e a natureza do indivíduo.

O trabalho de REASON (1990) apresenta uma classificação bastante abrangente dos mecanismos e da manifestação dos erros.

Outros estudos procuraram identificar a influência do contexto na atividade cognitiva humana. HOLLNAGEL (1998) desenvolveu o CREAM – Cognitive Reliability and Error Analysis Method, método de análise da confiabilidade humana que explora a relação entre o erro, a natureza das tarefas e o contexto. Sistemas de registro e análise dos eventos de erro humano foram desenvolvidos para aperfeiçoar as análises de segurança das plantas nucleares (ATHEANA – A Technique for Human Event Analysis) [NRC, 2000] e de sistemas de controle de tráfego aéreo (HERA-JANUS – Human Error in ATM).

Com o objetivo de efetivar a melhoria da confiabilidade humana, os estudos recentes apontam para técnicas de investigação e ação sobre as condições de contexto que ocasionam o erro. Mais recente é a Teoria da Resiliência de HOLLNAGEL, que advoga que mais que confiabilidade, as intervenções sobre um sistema crítico devem prover a capacidade de que ele se recupere de situações de degradação das condições de trabalho, de forma que a organização, os grupos de trabalho e indivíduos continuem exercendo sua capacidade de controle do risco. Todos estes estudos permitem concluir que os mecanismos do erro humano são inerentes ao processo cognitivo humano e desta forma, é de se esperar que o erro humano aconteça. Como estes mecanismos são afetados pelas condições de contexto no qual as ações se dão, pode-se reduzir seus efeitos e a probabilidade de sua ocorrência pela intervenção sobre estes fatores.

O trabalho de SWAIN E GUTTMAN (1983) definiu o conceito de Fatores Influenciadores do Desempenho (FID) – em inglês, *Performance Shaping Factors*. Estes fatores são variáveis do ambiente que reconhecidamente podem afetar a ação humana e são tratados, no trabalho, como multiplicadores da probabilidade do erro humano. Os fatores tabulados por SWAIN E GUTTMAN (1983) referem-se à operação humana em ambientes industriais. No trabalho desses autores, por exemplo, a presença de um supervisor que verifica o trabalho do operador é responsável pela redução em 10 vezes da probabilidade do erro deste operador.

No CREAM, HOLLNAGEL definiu um conceito correlato, o de condições comuns de desempenho (CPC – *Common Performance Conditions*). O autor definiu nove condições para a operação de sistemas críticos: a adequação da organização; as condições de trabalho; adequação da interface homem-sistema e apoio operacional; a disponibilidade de procedimentos; o número de objetivos a serem alcançados simultaneamente; o tempo disponível para o atendimento as metas; o grau de treinamento e experiência e a eficiência na colaboração dos envolvidos.



A importância do reconhecimento dos FID está no fato de que estes são mais facilmente controláveis através de intervenções, tais como o treinamento ou o projeto adequado dos sistemas de apoio à operação. Mantendo-se estes fatores em suas condições ótimas, permite-se a redução da probabilidade do erro.

### **I.3.2 O Aprendizado e o Erro Humano**

Paradigma e a forma de pensar, como definido por KUHN (1994), é uma estrutura imaginária, um modelo de pensamento próprio de cada época da história e produzido pela experiência de mundo, pela linguagem da época e imposto a todos os domínios do pensamento. MORIN (1990), ao conceituar o paradigma de pensamento como princípios supralógicos de organização do pensamento, retoma o conceito anterior, explicando-o: para ele, esses princípios supralógicos são constituídos pelos pressupostos filosóficos acerca da realidade, ou seja, o que ela é e a forma de estudá-la. Como afirma o autor, esses princípios são ocultos e governam nossas visões das coisas e do mundo, sem que tenhamos consciência disso.

Na realidade, são crenças e conhecimentos que conduzem nosso pensamento, sem que saibamos que o fazem. Essas crenças e conhecimentos são produzidos e transmitidos em determinados períodos da história da humanidade. Cada momento histórico produz determinada *representação social*, isto é, uma visão geral do mundo que orienta todos os pensamentos e os discursos daquela época. Em outras palavras, a interpretação e a construção da realidade são baseadas nessa visão geral, nesse paradigma, nessa estrutura imaginária que dita a forma e a norma aceitável, viável de se pensar.

Assim, explica-se a importância da representação social ou paradigma de pensamento como um dos elementos básicos da formação do sistema de representação de cada indivíduo, mas isso não é suficiente para esclarecê-lo. O contexto socioeconômico e cultural no qual o indivíduo está inserido, seus valores, suas intenções e/ou objetivos completam e se somam na compreensão da formação da representação mental ou da criação pelo indivíduo de uma imagem mental de uma situação, coisa ou fenômeno.

O paradigma segundo MORIN (1990) estabelece a forma de pensar de certa época, influenciando os conhecimentos científicos pelas crenças vigentes ou existentes naquele dado momento. Com o desenvolvimento científico, somados às mudanças de crença, o paradigma de determinada época é modificado. Isso significa dizer que em cada época predomina determinado paradigma. Essas mudanças, esses avanços vão interagindo com o modo de pensar dominante e com a concepção da realidade. A estrutura do pensamento é redirecionada, as premissas são revalidadas, e os conceitos e suas associações ou não-associações são revistos.

Dessa forma, a idéia daquilo que é possível e do que não é possível se transforma. Passa-se adotar uma nova visão geral, uma nova concepção da realidade, um novo paradigma.

### O comportamento Humano

A variação do comportamento humano causado por fatores internos ao homem, provoca conseqüências externas. Cada pessoa desenvolve a sua personalidade específica. Esta personalidade é resultado dos mesmos processos básicos de cognição, pois os fatores comuns, que formam a cognição humana, dependem da cultura, sociedade, o ambiente e o estilo de vida. Estes fatores agem na parte psicológica e, por conseguinte, o seu estado emocional, apresentado taxas de falhas não previsíveis, ao longo de sua vida útil.

### Psicologia e demais ciências

Cada vez tem sido abandonada a hipótese de causa única na formação do comportamento humano. O desenvolvimento científico de áreas do conhecimento como Sociologia, Antropologia, Biologia, Ciências Políticas e Economia trouxeram uma contribuição muito importante para o estudo do comportamento. A integração dos conhecimentos de outras áreas do conhecimento humano tem possibilitado a identificação de fatores que influenciam o comportamento. É impossível explicar o comportamento por meio de uma causa única. Como mostra a figura I.1, o comportamento humano é uma resultante de fatores psicológicos e não-psicológicos, tais como fatores biológicos, antropológicos, sociológicos, econômicos, psicológicos e políticos. Esses fatores interagem, mantendo uma dinâmica responsável pela formação e pelo desenvolvimento das características e processos psicológicos e, conseqüentemente, pela mudança do comportamento. Os fenômenos psicológicos não são estáticos e não podem ser explicados, como muitos tentam fazê-lo, pela abordagem linear causa-efeito.

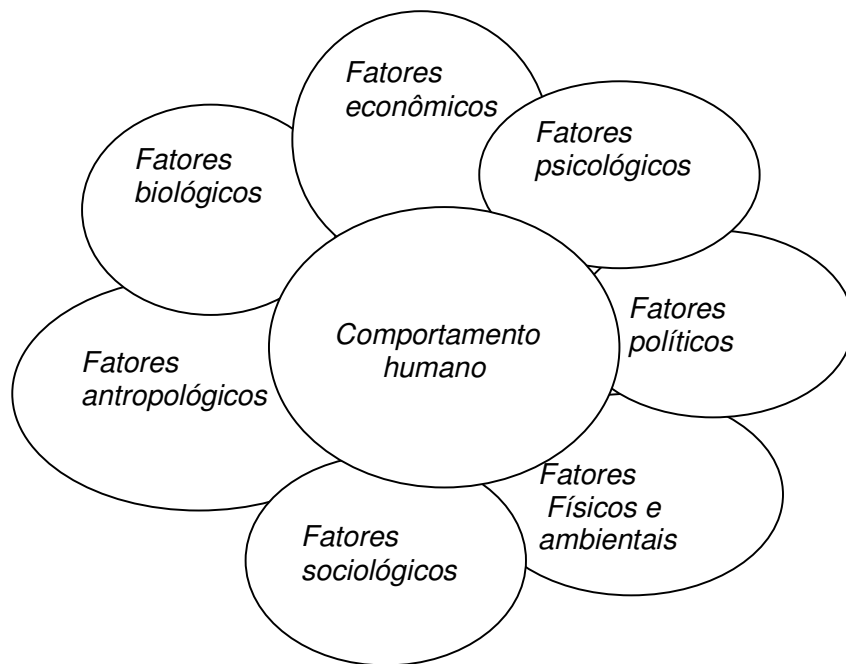


Figura I.3 – Complexidade e comportamento humano (AGUIAR, 2006).

### Falhas Humanas

As organizações são seres vivos em constante sinergia com o Meio-Ambiente. Segundo RESENDE (2003) "O ser humano é o capital intelectual mais importante da organização". Assim, devido à complexidade dos seres humanos a falha humana resulta das interações homem-trabalho ou homem-ambiente, que não atendam a determinados padrões esperados. Nesse conceito, estão implícitos três elementos: uma ação humana variável; uma transformação do ambiente (ou máquina) que não atenda a determinados critérios; e um julgamento da ação humana frente a esses critérios.

Esses elementos levam a uma falha humana, para LIDA (1998) "Muitos acidentes são atribuídos à falha Humana ou ao fator Humano, essas falhas oriunda da desatenção ou negligência levam a um acidente. Houve então uma série de decisões que criaram as condições para que isto acontecesse, como por exemplo: falha na percepção, decisão ou ação. Estudiosos como RASSMUSSEN (1990) classificaram as falhas ou erros como randômicas, sistêmicas, ou esporádicas. As falhas são representadas na figura I.3, onde compara-se com a habilidade de se atingir um alvo.

Assim, as falhas randômicas são dispersas em torno do valor desejado sem preferência; isto é, na média verdadeira (em  $x$  e  $y$ ), mas a variância pode ser muito grande, isto devido á falta de treinamento. As falhas sistemáticas apresentam dispersão pequena, com tendência a afastar-se do valor médio, causadas por uso de ferramentas fora de calibração, desempenho ou procedimento incorreto.

As falhas esporádicas são frutos de um modo descuidado ou extremo das pessoas agirem, como desempenhando uma ação não requerida ou invertendo esta ordem. São as mais difíceis de conviver.

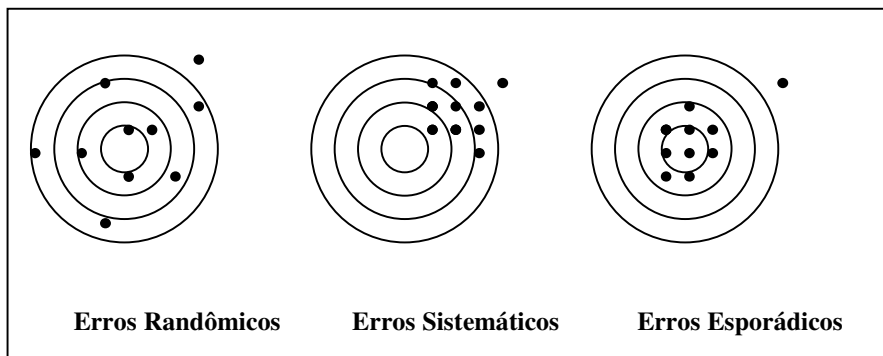


Figura 1.4 – Classificação de erro humano (RASSMUSSEN, 1990).

Há muita incerteza intrínseca nas interações que dificulta fazer afirmações certas no momento de julgar uma determinada ação humana, ou seja, os processos de tomada de decisão. O problema fundamental é que o especialista tem um modelo mental de como tal sistema deveria atuar e tal modelo está repleto de subjetividade e nuances inerentes ao modo pelo qual pensamos.

Este modelo mental ou cognitivo que são conhecimentos disponíveis em um indivíduo, compreendendo as relações preferenciais entre certas configurações da realidade e as ações que serão efetuadas e os conhecimentos que permitem uma manipulação mental desta realidade, inclui informação recebida, sensação, percepção, memória a curto e longo prazo, tomada de decisão e uma ação resultante.

#### Tomada de decisões e o seu controle

Segundo o Behaviorismo, o indivíduo toma decisões em função: a) de aprendizagens anteriores; b) da discriminação dos estímulos aversivos e atrativos; c) da auto-observação sobre seus eventos encobertos (sentimentos pessoais); d) de sua história de reforçamento e de punição; e) das condições do meio ambiente e do nível de estimulação que tenha recebido em alguma direção; f) do comportamento verbal valorativo para a comunidade verbal da qual faça parte.

Além disso, recebe a influência de aspectos relacionados à sua hereditariedade, das experiências que vivenciou em sua história passada de vida, e da cultura da comunidade à qual pertence que lhe estabelece valores e padrões de comportamento como referência discriminativas.

A tomada de decisões para AGUIAR (2006) pode ser, no entanto, controlada nas organizações, por meio da manipulação de estímulos e reforços socialmente administrados e seus membros. Essa estratégia aumenta a probabilidade da resposta ou da tomada de decisão na direção desejada pela organização. A oscilação entre as formas incompletas de respostas é incômoda e aversiva. O reforçamento contribui para eliminar esse conflito. Quando adequadamente administrado, o reforço aumenta a probabilidade da tomada de decisões, e pode direcionar um indivíduo a decidir por aspectos que atendam ao que é esperado pelos outros que estão ao seu redor, sendo que o sujeito se torna suscetível a adequar-se ao comportamento esperado, na ânsia de obter reforçadores, ficando, dessa forma, sob controle emocional dos demais, sem dar-se conta que não está reconhecendo os seus próprios eventos internos e escolhas pessoais.

Os padrões de tomada de decisões têm um impacto enorme no modo de como as pessoas se sentem e pensam. Estes padrões permitem inferir que todos os indivíduos, através da experiência, a formação e a instrução acumulada com os anos, vão criando modelos mentais da forma de como os acontecimentos ocorrem, de como funcionam os objetos ou com se comportam as pessoas. Isto é o resultado da tendência natural de dar explicações lógicas das coisas, pois, o cérebro humano se encontra adaptado para interpretar o mundo e somente basta que receba o mínimo sinal, para se lançar a dar explicações, racionalizações e entendimento.

A tomada de decisão é uma das atividades intelectuais mais comuns dos seres humanos. Diariamente, tomamos centenas de decisões, desde quando se acorda até o momento que se dorme. O processo decisório usa tanto a memória de curta duração como a de longa duração, e a principal causa das dificuldades das decisões complexas está na baixa capacidade de memória de curta duração.

#### Limitações da capacidade de perceber

É limitada à capacidade da pessoa humana de apreender a realidade exterior a si própria, designada pela palavra *mundo*. Essa limitação decorre, em primeiro lugar, de imensa complexidade e do caráter dinâmico do mundo, que torna impossível conhecê-lo de modo integral. Em segundo lugar, decorre da própria natureza da percepção, um processo psicológico que envolve outros, como o pensamento e a memória, sujeitos a variadas perturbações. E decorre, finalmente, das limitações dos órgãos sensoriais, que são os canais por meio dos quais a pessoa humana entra em contato com o mundo e por onde se inicia o processo perceptivo.

Por meio dessas variadas mediações de processos seletivos, fisiológicos e psicológicos, chega-se a uma percepção inevitavelmente parcial do mundo, embora este nos apresente certa estabilidade, o que nos dá freqüentemente a ilusão de uma realidade acabada.

#### A experiência passada e a percepção presente

Estudos desenvolvidos na área da percepção têm demonstrado que a experiência passada do indivíduo também estimula a percepção presente; a percepção de objetos, pessoas e eventos no presente são contaminados pelas experiências passadas. O indivíduo, portanto, projeta seu mundo interior naquilo que está percebendo. Por essa razão, diz-se que as pessoas percebem o que querem e não o que realmente existe.

A projeção e sua influência no processo de percepção. As figuras ambíguas I.5 (a), (b) e (c), são um exemplo de projeções de experiências passada no estímulo presente. As pessoas percebem figuras diferentes, ao observar a mesma figura. Quanto mais ambíguas são as figuras, mais subjetiva se torna a percepção e maiores serão as influências da experiência passada, dos motivos, do estado emocional, das necessidades básicas e das características de personalidade do indivíduo sobre sua percepção.



(a)



(b)



(c)

Figura I.5 – Figuras ambíguas (a), (b) e (c), influência na percepção (AGUIAR, 2006).

#### Contraste e percepção

A influência das características do ambiente na percepção foi estudada, tendo sido mostrado que tais características podem ser determinantes da mudança de atenção. Os objetos mais brilhantes, os sons mais agudos e as cores mais fortes são geralmente mais notados. A predominância desses fatores indica a intensidade como um dos determinantes da atenção. Estímulos diferentes dentro de um conjunto de estímulos semelhantes também são normalmente mais percebidos. O contraste é, portanto, outro fator de retenção da atenção.

## **I.4 Tópicos dos Modelos de Confiabilidade**

Normalmente a idéia que se tem de confiabilidade é de confiança no equipamento durabilidade e presteza em operar sem falhas. No entanto, segundo LAFRAYA (2001), “Matematicamente, a confiabilidade é definida como a probabilidade de que um componente ou sistema cumpra sua função com sucesso, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas”.

Como está geralmente ligada com as falhas durante a vida do produto, é então um aspecto de incerteza da engenharia e por isso pode ser representada por uma função de probabilidade. Para SIQUEIRA (2005) “a manutenção interessa a probabilidade de que o item sobreviva a um dado intervalo de tempo (de tempo, ciclo, distancia, etc). Esta probabilidade de sobrevivência denomina confiabilidade”.

De acordo com NETO (2002) a confiabilidade consiste numa coleção de procedimentos estatísticos para análise de dados relacionados ao tempo até a ocorrência de um determinado evento de interesse, a partir de um tempo inicial pré-estabelecido.

Afirma-se então que a confiabilidade é a característica que um item expressa pela probabilidade de que ele realize sua função requerida, na maneira desejada, sob todas as condições relevantes ou durante os intervalos de tempo quando é requerido a fazê-lo.

A confiabilidade é definida como a probabilidade de que um sistema executará sua função planejada para um período especificado de tempo sob um determinado conjunto de condições (LEWIS, 1996).

Segundo PINHO (2000), o conceito genérico de confiabilidade pode ser definido como a probabilidade de um sistema ou um produto executar sua função de maneira satisfatória, dentro de um intervalo de tempo operando conforme certas condições.

Na maior parte das caracterizações apresentadas, faz-se uso explícito do termo probabilidade que em muitas vezes irá aparecer relacionado ao número de vezes que um sistema opera adequadamente. Além do termo probabilidade, outro ente matemático indispensável no estudo de Confiabilidade é a estatística.

A probabilidade e a estatística são ingredientes essenciais afirma SALEH (2005), sem eles a confiabilidade não poderia ser caracterizada como uma disciplina técnica. A Teoria das Probabilidades e a Estatística tornam-se então fundamentais na história do pensamento analítico no âmbito científico e, o desenvolvimento de tais áreas ajudou a construir a teoria da confiabilidade caracterizando-a dessa forma como uma disciplina.

Chama-se Teoria Matemática de confiabilidade a disciplina que corresponde basicamente a um conjunto de idéias, modelos e métodos para tratar problemas relativos à performance de sistemas e suas componentes.

FLEMING (1981) afirma que “o objetivo principal da análise de confiabilidade é avaliar a performance de um sistema de interesse”.

Tradicionalmente, deve-se aos matemáticos franceses Pascal e Fermat, o surgimento, até certo ponto, da teoria matemática da confiabilidade uma vez que é em seus estudos que tudo começa, apesar de estarem limitados apenas a questões relacionadas a jogos de azar. Porém, Laplace em 1812, introduziu uma série de técnicas com novas e variadas aplicações, que consistia, de uma forma geral, na análise de probabilidades e estatística. Laplace foi um dos responsáveis em ampliar a extensão dessas duas áreas da matemática.

Além da probabilidade e estatística como pilares essenciais ao desenvolvimento da teoria matemática da confiabilidade têm-se de acordo com SALEH (2005), a idéia e a prática de produção que foram também fatores responsáveis pelo desenvolvimento da confiabilidade. A produção de bens em grandes quantidades, também foi um ingrediente fundamental no desenvolvimento do que é conhecido hoje como Engenharia de Confiabilidade. O interesse pela produção em larga escala no menor tempo possível e ainda com o compromisso de uma produção de qualidade, fez com que estudos nesta área fossem estimulados. Foi o desafio de produzir em larga escala e com qualidade garantida um dos fatores propícios à criação de um controle de qualidade estatístico, que era muito utilizado no início da década de 20 e que, em meados dos anos 50 esta técnica passou a ser objeto de estudo de disciplinas relacionadas à Confiabilidade.

Na década dos anos 40 surgem teorias matemáticas que servem para embasar e consolidar ainda mais os estudos feitos na área de confiabilidade. O matemático Robert Lusser desenvolveu uma equação associada a um sistema em série.

Na década de 50, com a criação da indústria aeroespacial e eletrônica mais a implantação de indústrias nucleares pelo mundo, ocorre um crescimento significativo do desenvolvimento de metodologias de cálculo e aplicações de Confiabilidade. A ênfase é dada pelos analistas, em aplicações da confiabilidade nas etapas de projetos, ou seja, concentram-se recursos para a execução da manutenção após a ocorrência de falhas. É nesta década, que surgem também aplicações relacionadas ao comportamento humano.

Nos anos 60 cresce o desenvolvimento de natureza teórica e prática e H. A. Watson propõe a “Análise de árvore de falhas”. Muitos outros trabalhos são publicados dando ênfase a conceitos relacionados a renovações, estacionaridade, tendência, etc. Aplicações de ordem prática são também estabelecidas nesse período. Publicações sobre fundamentos da análise de confiabilidade em sistemas mecânicos (estruturas) e estudos de confiabilidade de sistemas computacionais começam a ser caracterizados e passa a figurar no cenário científico dessa década.

Na década de 70 ocorre a expansão dessa área por meio de aplicações nas mais diversas áreas, destacando-se a área nuclear.



Os primeiros modelos de análise de confiabilidade em programas computacionais (software) são apresentados nesse período.

A partir dos anos 80, países detentores de tecnologia de ponta adotam definitivamente técnicas de análise da confiabilidade em diversos setores da Engenharia, sendo aplicada em pesquisas relacionadas ao controle de qualidade, sistemas eletroenergéticos, de telecomunicações, de centrais nucleares, aeroviários, mecânicos, industriais, computacionais, sistemas de defesa (com aplicações militares) e no comportamento humano.

#### **I.4.2 Distribuição de Probabilidade e Aplicações**

Para a compreensão dos estudos de confiabilidade e taxa de falhas, se faz necessário o entendimento sobre o conceito de máquina. Máquina significa qualquer aparelho que se destina ao cumprimento de uma tarefa específica. Toda parte de uma máquina que desempenha um papel específico que contribui com o seu funcionamento chama-se componente. Ao conjunto de componentes que objetiva uma tarefa específica contribuindo para o funcionamento da máquina dá-se o nome de sistema de componentes. Denomina-se sistema multicomponente todo sistema composto de diversos componentes.

No âmbito da análise de confiabilidade, o termo componente aparece como uma unidade básica de um sistema. Mas, na verdade, é o tipo de análise de confiabilidade de um sistema que será responsável por definir a unidade básica do sistema que muitas vezes sob um aspecto, pode ser um determinado componente e que em outra análise pode ser tratado como um sistema.

Outra expressão bastante freqüente e comum no estudo da análise de confiabilidade é a expressão modo de falha. Essa expressão refere-se às probabilidades de um componente falhar. Diante disso, um componente pode ter um ou vários modos de falha. Uma falha ocorre quando um componente ou sistema deixa de desempenhar sua função requerida. Já um defeito, ocorre quando um componente ou sistema não atende a uma especificação técnica mensurável.

Um componente está operando sob o seu estado normal se não se encontra em estado de falha. A utilização do termo falha básica serve para indicar falhas que não ocorrem em razão de outras falhas. Este tipo de falha é considerado o mais básico, dentro da análise de confiabilidade.

Um componente pode ser classificado como *reparável* quando, ao ser trocado, é considerado tão bom quanto novo e se eliminou o defeito/falha e seu potencial de ocorrência. Se um componente não puder restabelecer esta condição, o componente é classificado como irreparável.

Considere que a confiabilidade de um sistema ou componente é a probabilidade de que o mesmo funcione por um dado período de tempo, sob condições operacionais especificadas e segundo um critério de sucesso pré-estabelecido.

Então, do ponto de vista probabilístico, o tempo de vida do sistema ou componente é representado por uma variável aleatória  $T$  e sua confiabilidade é expressa por:

$$R(T) = P(T > t), \quad (1.3)$$

tal que  $R(t)=1$  quando  $t=0$  e  $R(t)=0$  quando  $t = \infty$ , ou seja, a confiabilidade é a probabilidade de que o sistema ou componente sobreviva a um intervalo de duração  $t$ .

Para calcular a confiabilidade de um componente segundo ACHILES (2006) pode-se utilizar o conceito de taxa de falha, denotada por  $\lambda(t)$ , que corresponde intuitivamente ao número de falhas que um componente apresenta por unidade de tempo. Em termos matemáticos define-se taxa de falha como a probabilidade condicional de um sistema ou componente falhar em um intervalo infinitesimal, dado que estava funcionando no início desse intervalo.

Chama-se tempo médio de falha a média dos tempos de falha calculada a partir da distribuição de probabilidade que os seus tempos de falha seguem. Sendo  $T$  a variável aleatória representativa dos tempos de falha de um componente, então:

$$f(t)\Delta t = P(t < T < t + \Delta t) \quad (1.4)$$

será a probabilidade de que a falha ocorra entre  $t$  e  $t + \Delta t$  e  $f(t)$  é a função densidade de falha onde  $\Delta t$  é considerado suficientemente pequeno.

A função de distribuição acumulada

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad (1.5)$$

é denominada inconfiabilidade, e representa a probabilidade de que a falha ocorra até o tempo  $t$ . Daí segue que

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.6)$$

Logo, substituindo 1.5 em 1.6 obtém-se:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (1.7)$$

Por outro lado, segue que:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Pode-se interpretar probabilisticamente a taxa de falha  $\lambda(t)$  da seguinte forma:

$$\lambda(t)\Delta t = P(T < t + \Delta t | T > t) = \frac{P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P(T > t)} \quad (1.9)$$

Mas, substituindo 1.4 e 1.5 em 1.9 tem-se:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.10)$$

substituindo agora 1.8 em 1.10 segue que:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.11)$$

De 1.11 obtém-se:

$$f(t) = \lambda(t) \exp \left[ - \int_0^t \lambda(u) du \right] \quad (1.12)$$

e

$$R(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(u) du \right] \quad (1.13)$$

O tempo médio para falhar, MTTF é dado por

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (1.14)$$

O comportamento genérico da taxa de falha de componentes se assemelha muito a uma curva no formato de uma banheira, sendo assim, tradicionalmente o gráfico de  $\lambda(t)$  em função do tempo  $t$  é denominado curva da banheira. Como mostrado na figura I.2.

No gráfico representado na figura I.6 pode-se afirmar que existem três regiões distintas definidas. A primeira, à esquerda, apresenta altos valores de taxa de falha que acabam decrescendo com o decorrer do tempo. Este período é denominado mortalidade infantil e representa a situação em que protótipos de componentes estão sendo testados e aprimorados à medida que falham.

A segunda região representa uma taxa de falha constante caracterizando o período denominado de vida útil. Neste período os componentes estão prontos para uso comercial e caso ocorra algum tipo de falha, esta tem causas devida a agentes externos.

Na terceira região, observa-se que as taxas de falhas aumentam com o decorrer do tempo. O período caracteriza o envelhecimento, onde os fenômenos característicos podem estar relacionados à corrosão, à fadiga, etc.

Porém, nem todos os componentes apresentam como modelo de curva, a curva sugerida na figura I.6, como representante da função taxa de falha. Sendo assim, pode-se estabelecer classes de componentes associadas a determinados modelos que caracterizam o comportamento das falhas. A figura I.6 apresenta três modelos de curvas que caracterizam o comportamento de  $\lambda(t)$  em função do tempo  $t$ .

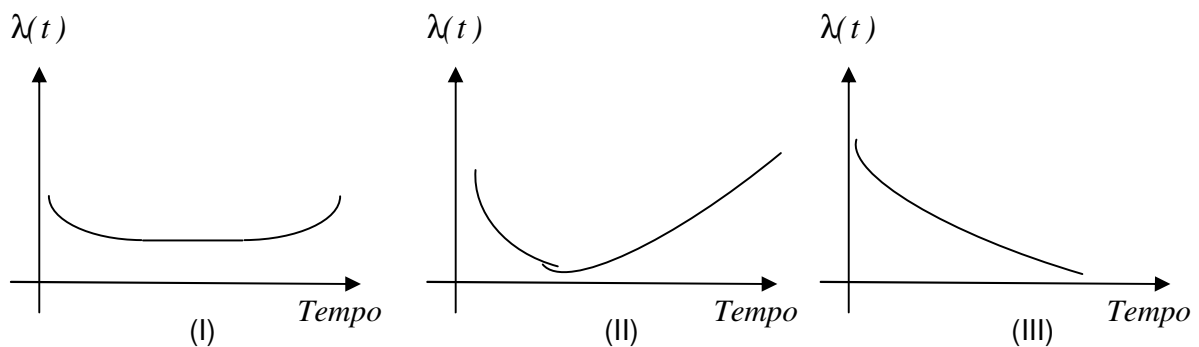


Figura I.6 – Curvas característica de  $\lambda(t)$  em função do tempo  $t$  (PINHO, 2000).

As curvas apresentadas na figura I.6 estão associadas às seguintes classes:

- A curva (I) corresponde a uma curva representativa de taxa de falha de componentes eletro-eletrônicos, em que o período de mortalidade infantil é extremamente curto, sendo seguido por um período longo de vida útil.

- A curva (II) caracteriza o comportamento de taxas de falhas de componentes mecânicos. Esta curva apresenta um período de mortalidade infantil mais longo em relação aos componentes eletro-eletrônicos, sendo seguido por uma vida útil mais curta e por um envelhecimento prolongado. Curvas desse tipo caracterizam, por exemplo, taxas de falhas de válvulas, bombas, motores e etc.
- Na curva (III) tem-se a caracterização de uma curva que representa a falha de software. O programa é escrito e começa a ser testado a partir do momento que funciona, sua taxa de falha vai à zero.

#### I.4.2 Distribuições de Probabilidade Aplicadas à Confiabilidade

##### Distribuição Exponencial

Para um componente que está no seu período de vida útil, a densidade de falha é dada por:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (I.15)$$

e a confiabilidade por:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (I.16)$$

sendo a sua taxa de falha constante e representada por  $\lambda$ .

A probabilidade do componente não sobreviver a um intervalo de tempo  $t$ , isto é, a sua inconfiabilidade, pode ser representada por  $\bar{R}(t)$  e será dada por:

$$\bar{R}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (I.17)$$

enquanto que o MTTF desse componente será dado por:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (I.18)$$

Dessa forma, a distribuição exponencial descreve sistemas com taxa de falhas constante. A figura I.7 caracteriza o comportamento das funções  $f(t)$ ,  $R(t)$  e  $\lambda(t)$  em relação ao tempo  $t$ .

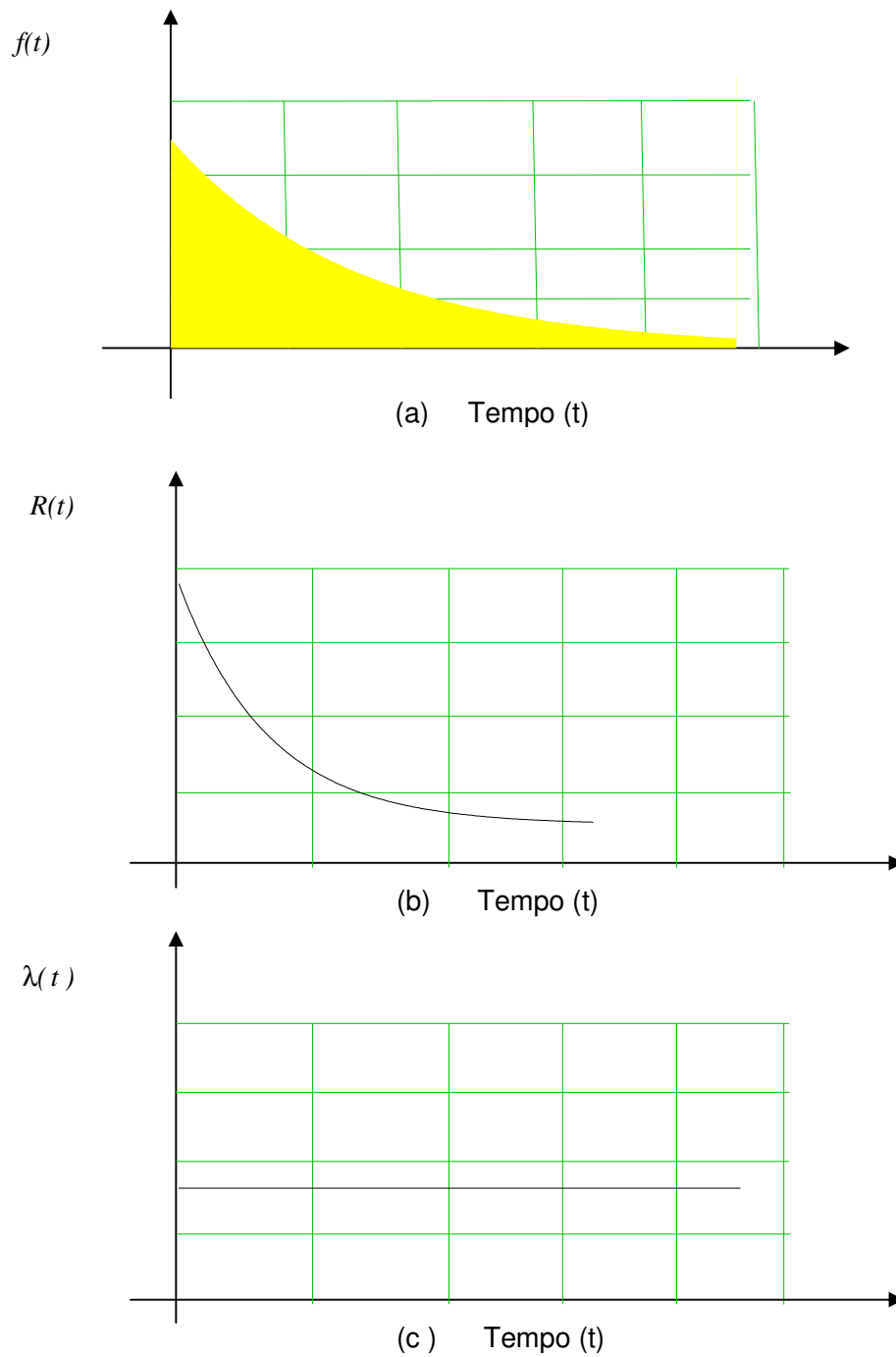


Figura I.7 – Características gerais da distribuição exponencial. (a), (b) e (c) (EBELING, 2000).

Cabe observar que o fato de um componente estar no seu período de vida útil implica no fato dele não ter memória.

### Distribuição Normal ou de Gauss

Para a distribuição normal tem-se

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (I.19)$$

onde  $\mu = MTTF$  e  $\sigma$  é o desvio padrão. A confiabilidade é dada por:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (I.20)$$

em que  $\Phi(u)$  é a função distribuição da normal padrão  $N(0,1)$ . A taxa de falha neste caso será dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}{1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)} \quad (I.21)$$

O comportamento das funções  $f(t)$ ,  $R(t)$  e  $\lambda(t)$  em relação ao tempo  $t$  está caracterizado na figura I.8.

Cabe lembrar que este tipo de distribuição é usado em estudos onde se confere variações de dados simetricamente dispostas ao redor da média.

Uma das razões para a aplicação deste tipo de distribuição advém do fato de que quando um valor está sujeito a muitas variações que se somam, independentemente de como estas variações são distribuídos, os resultados dessa distribuição composta, é normalmente distribuída.

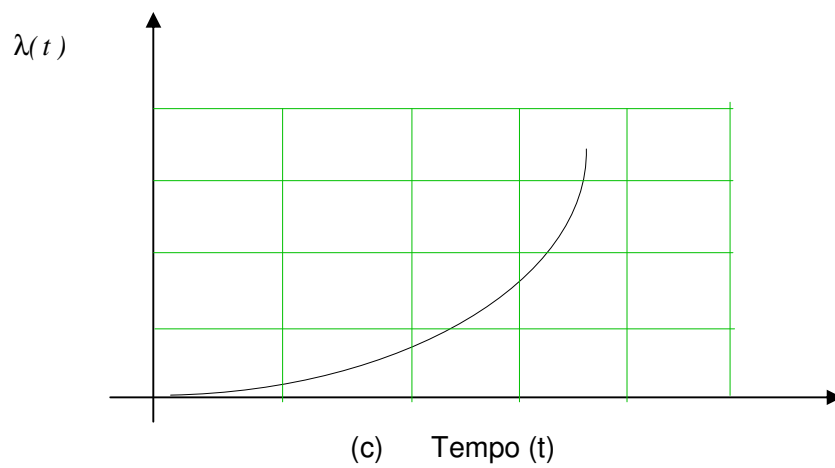
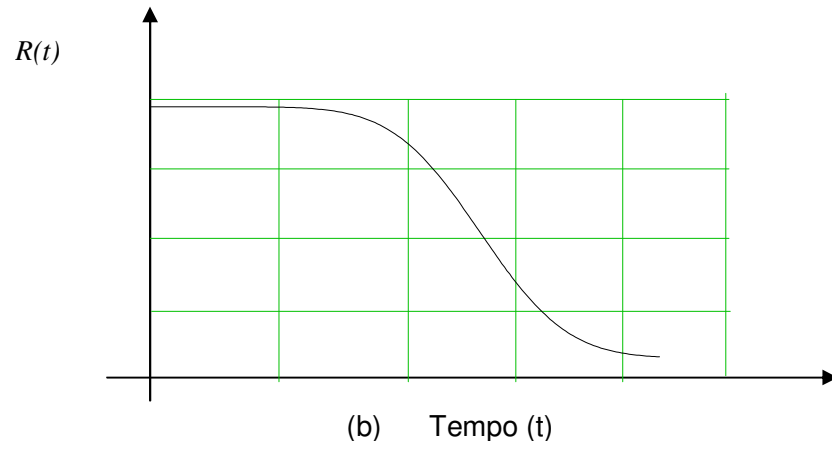
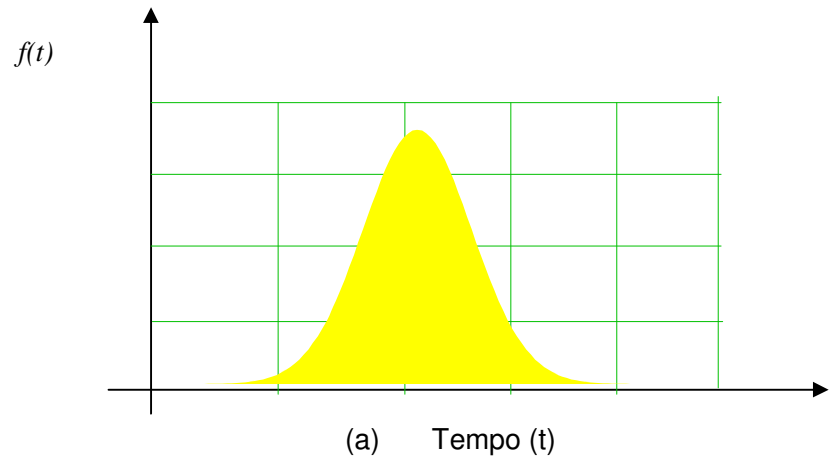


Figura I.8 – Características gerais da distribuição normal ou de Gauss (a), (b) e (c) (EBELING, 2000).



### Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal é uma distribuição mais estável que a distribuição normal, isto porque tem uma forma mais variada, que possibilita por sua vez um melhor ajuste da população estudada. Para a distribuição lognormal tem-se:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}wt} \exp\left[-\frac{1}{2w^2}\left(\ln\frac{t}{t_0}\right)^2\right] \quad (1.22)$$

onde  $w$  é um parâmetro associado à dispersão dos tempos de falha e  $t_0$  é a mediana da distribuição. A confiabilidade é dada por:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{w} \ln\frac{t}{t_0}\right) \quad (1.23)$$

e a taxa de falha por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}wt} \exp\left[-\frac{1}{2w^2}\left(\ln\frac{t}{t_0}\right)^2\right]}{1 - \Phi\left(\frac{1}{w} \ln\frac{t}{t_0}\right)} \quad (1.24)$$

onde,

$$MTTF = t_0 \exp\left(\frac{w^2}{2}\right) \quad (1.25)$$

e a variância de  $f(t)$  é dada por:

$$VAR[f(t)] = t_0^2 \exp(w^2) \cdot [\exp(w^2) - 1] \quad (1.26)$$

O comportamento das funções  $f(t)$ ,  $R(t)$  e  $\lambda(t)$  em relação ao tempo  $t$  está caracterizado na figura I.9.

As aplicações dessa distribuição correspondem à determinação dos ciclos para falha à fadiga de metais e componentes metálicos (quando submetidos a tensões alternadas em nível significativamente menores que o limite de resistência do metal); na determinação da distribuição de tempos para a falha de componentes mecânicos sujeitos a desgaste; na determinação da vida de rolamentos e na determinação do tempo médio para manutenção de componentes mecânicos.

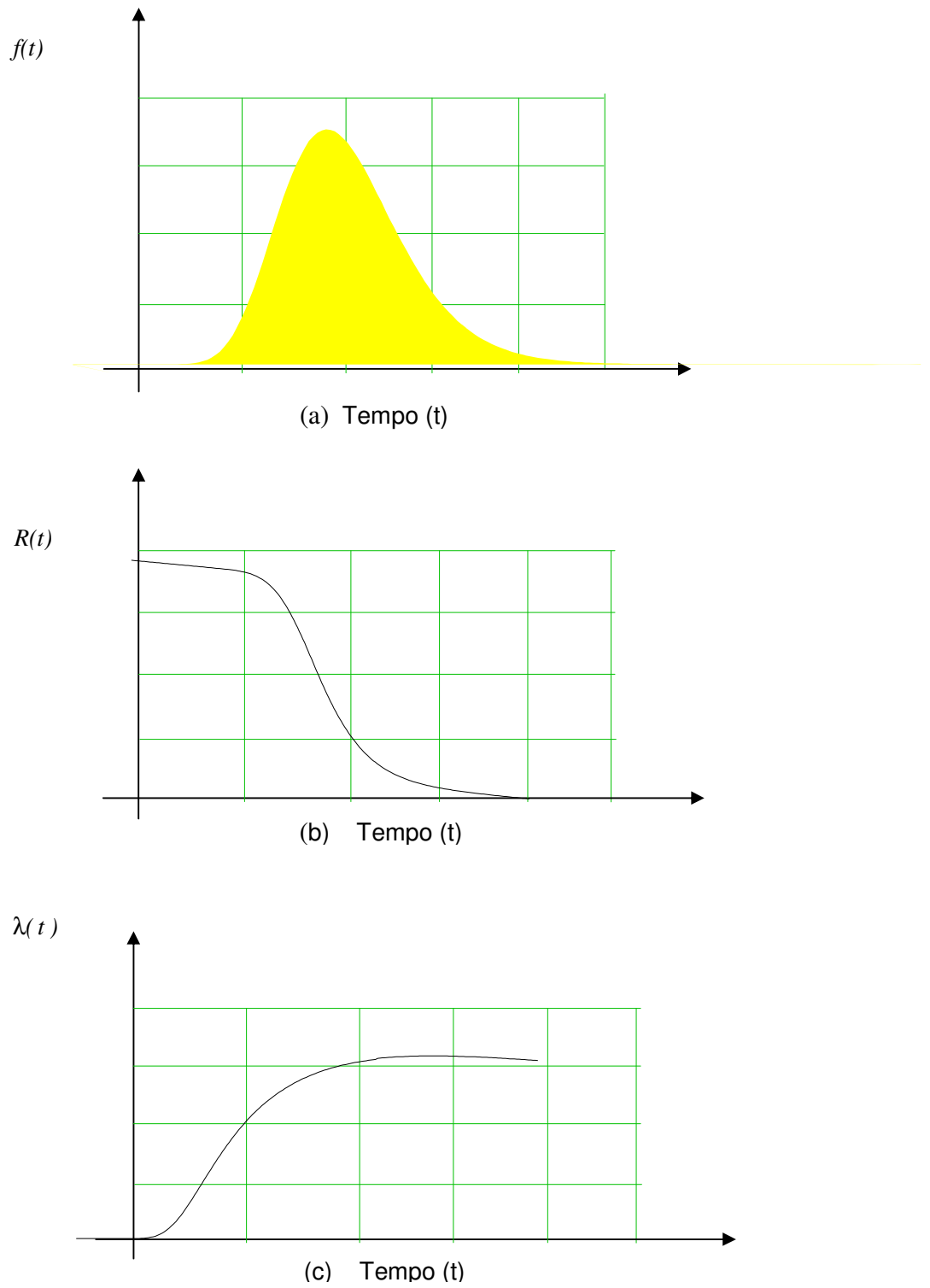


Figura I.9 – Características gerais da distribuição lognormal (a), (b) e (c) (EBELING, 2000).

### Distribuição de Weibull

A taxa de falha para a distribuição de Weibull é obtida através da fórmula matemática:

$$\lambda(t) = \frac{m}{\theta} \left( \frac{t-t_0}{\theta} \right)^{m-1} \quad (1.27)$$

onde  $m$  é o parâmetro de forma e  $\theta$  é o de escala, também denominado vida característica,  $t_0$  é a vida inicial e  $t$  é o tempo de falha. A função densidade de falha é dada por:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda(t) \exp \left[ - \left( \frac{t-t_0}{\theta} \right)^m \right] & \text{para } t \geq 0 \\ 0 & \text{para } t < 0 \end{cases} \quad (1.28)$$

e a confiabilidade por:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t-t_0}{\theta} \right)^m \right] \quad (1.29)$$

Quanto ao parâmetro  $m$ , pode-se estabelecer o comportamento da função taxa de falha a partir dos possíveis valores que este assume. Assim:

- Se  $m < 1$  então a taxa de falha é decrescente com o tempo.
- Se  $m = 1$  então a taxa de falha é constante, caracterizando falhas aleatórias.
- Se  $m > 1$  então a taxa de falha é crescente com o tempo.
- Se  $m = 2$  então a taxa de falha é linearmente crescente com o tempo.
- Se  $m > 2$  então a taxa de falha cresce a uma taxa proporcional à potência  $(m - 1)$

As características gerais da distribuição de Weibull, com dois parâmetros, são dadas na figura I.10 por meio dos gráficos de  $f(t)$ ,  $R(t)$  e  $\lambda(t)$  em função do tempo  $t$ .

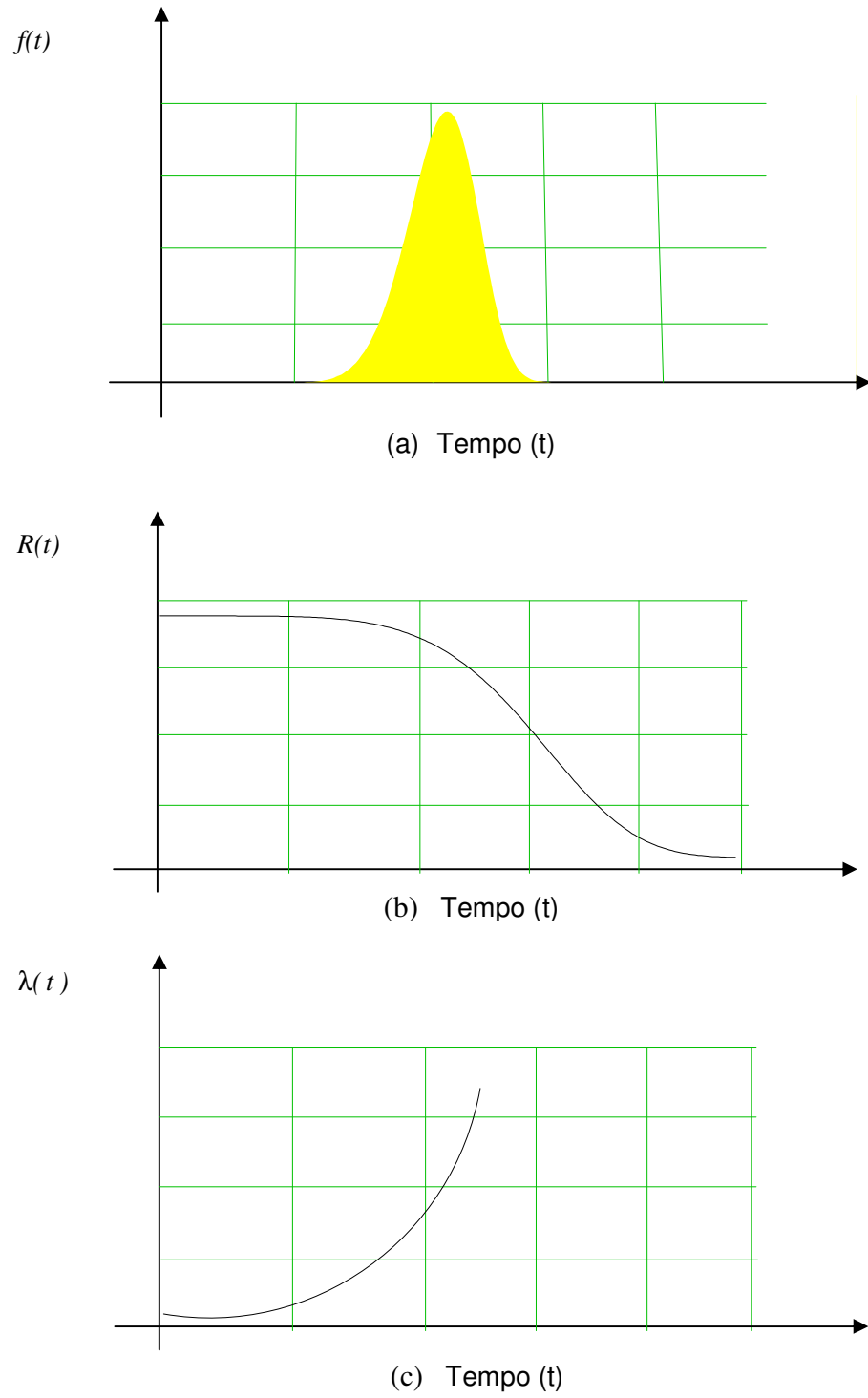


Figura I.10 – Características gerais da distribuição de Weibull (a), (b) e (c) (EBELING, 2000).

Nos casos em que o tempo de vida inicial é igual a zero, isto é,  $t_0 = 0$  tem-se:

$$\lambda(t) = \frac{m}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{m-1} \quad (1.30)$$

$$f(t) = \begin{cases} \lambda(t) \exp \left[ - \left( \frac{t}{\theta} \right)^m \right] & \text{para } t \geq 0 \\ 0 & \text{para } t < 0 \end{cases} \quad (1.31)$$

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\theta} \right)^m \right] \quad (1.32)$$

No caso em que  $t_0 = 0$  e  $m = 1$ :

$$\lambda(t) = \frac{1}{\theta} \quad (1.33)$$

$$f(t) = \frac{1}{\theta} \exp \left[ - \frac{t}{\theta} \right] \quad (1.34)$$

$$R(t) = \exp \left[ - \frac{t}{\theta} \right] \quad (1.35)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (1.36)$$

As equações 1.33, 1.34, 1.35 e 1.36 caracterizam uma distribuição exponencial.

As falhas que se manifestam em um sistema são suscetíveis de efeitos muito diferentes. Certas falhas não afetam diretamente as funções do sistema e não necessitam senão de uma ação corretiva que não constituem problemas. Outras afetam a disponibilidade do sistema ou segurança. Os efeitos de falhas devem ser avaliados. Utiliza-se uma escala de gravidade dos efeitos e reparte-se, assim, os níveis de degradação do funcionamento do sistema em categorias ou classes de gravidade. Para tal, considera-se quatro categorias:

- Falhas menores - nocivas ao bom funcionamento de um sistema causando prejuízo desprezível ao referido sistema ou ao meio ambiente, sem, todavia apresentar risco para o homem.

- Falhas significativas – nocivas ao bom funcionamento de um sistema sem, todavia causar prejuízo notável, nem apresentar risco importante ao homem.
- Falhas críticas – falhas que acarreta a perda de uma (ou das) função (funções) essencial de um sistema e causa prejuízos importantes ao referido sistema ou a seu meio ambiente, não apresentando, contudo, senão um risco desprezível de morte ou de ferimento.
- Falhas catastróficas- falha que ocasiona perda de uma (ou das) função (funções) essencial de um sistema causando prejuízo importante ao referido sistema ou ao seu meio ambiente e acarreta para o homem, a morte ou prejuízo corporal.

#### Classificação em Função

A falha de um sistema resulta de causas de falha, estas são definidas como circunstâncias ligadas à concepção, à fabricação ou ao emprego e que acarretassem a falha. As causas de falhas têm como consequência a falha por intermédio de um mecanismo de falha. Este é definido como todo processo físico-químico ou outro que acarrete a falha.

As falhas podem ser clarificadas em três categorias:

- Falha primeira – falha de um sistema cuja causa direta ou indireta não é a falha de outro sistema.
- Falha segunda – falha de um sistema cuja causa direta ou indireta é a falha de outro sistema e para qual esta sistema não foi qualificado ou dimensionado.
- Falha de controle - falha de um sistema cuja causa direta ou indireta é a falha de outro sistema e para qual este sistema foi qualificado e dimensionado.

#### Modo de Falha

Modo de falha é definido como o modo pelo qual uma falha é observada. Assim, a cada falha de um componente, se associa modos e causas de falhas. Os modos de falha são gerados por causas de falha, um modo de falha representado o efeito (ou efeitos).

As falhas de um componente têm efeito sobre as funções do mesmo. O modo da falha será denominado com o mesmo nome do efeito.

### **I.4.3 Análise de Sistemas com Componentes em Série e em Paralelo**

Considere um sistema hidráulico (LAFRAIA, 2001) composto pelos componentes descritos na tabela I.5 seguidos de suas respectivas taxas de falha. Admita que se um componente desse sistema falha, o conjunto inteiro falha e suponha ainda que esse sistema está instalado em um avião comercial que viaja num tempo de 10 horas e que possui um fator de agressividade de 100. Quais as possíveis alternativas para o aumento da confiabilidade desse sistema?

Tabela I.5 – Taxas de falha dos componentes de um sistema hidráulico (LAFRAIA, 2001).

COMPONENTES	TAXAS DE FALHAS/h
Filtro	$\lambda_1 = 0,3 \times 10^{-6}$
Bomba	$\lambda_2 = 10 \times 10^{-6}$
Redutor	$\lambda_3 = 0,3 \times 10^{-6}$
Válvula de alívio	$\lambda_4 = 5,7 \times 10^{-6}$
Válvula	$\lambda_5 = 4,6 \times 10^{-6}$
Cilindro	$\lambda_6 = 0,2 \times 10^{-6}$

De acordo com as hipóteses do problema, o sistema apresenta seus componentes associados em série, isto é, conforme indicado na figura I.11.

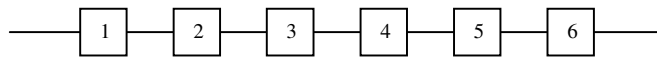


Figura I.11– Sistema hidráulico com seis componentes em série (LAFRAIA, 2001).

A confiabilidade do  $i$ -ésimo componente pode ser obtida por meio da fórmula definida em

$$R_i(t) = e^{-x\lambda_i t} \quad (I.37)$$

onde  $x$  é o fator de agressividade,  $\lambda_i$  é a taxa de falha do  $i$ -ésimo componente e  $t$  é o tempo, em horas, considerado. Logo:

$$\begin{aligned}
 R_1(t) &= e^{(-100) \cdot (0,3 \cdot 10^{-6}) \cdot (10)} = 0,9997 \\
 R_2(t) &= e^{(-100) \cdot (10 \cdot 10^{-6}) \cdot (10)} = 0,9900 \\
 R_3(t) &= e^{(-100) \cdot (0,3 \cdot 10^{-6}) \cdot (10)} = 0,9997 \\
 R_4(t) &= e^{(-100) \cdot (5,7 \cdot 10^{-6}) \cdot (10)} = 0,9943 \\
 R_5(t) &= e^{(-100) \cdot (4,6 \cdot 10^{-6}) \cdot (10)} = 0,9954 \\
 R_6(t) &= e^{(-100) \cdot (0,2 \cdot 10^{-6}) \cdot (10)} = 0,9998
 \end{aligned} \quad (I.38)$$

Sendo um sistema em série, a confiabilidade desse sistema é dada por:

$$R(t) = 0,9997 \cdot 0,9900 \cdot 0,9997 \cdot 0,9943 \cdot 0,9954 \cdot 0,9998 = 0,9790 \quad (I.39)$$

Admitindo que o avião possua seis sistemas, todos com a mesma confiabilidade, então a confiabilidade do avião,  $R(t)$ , é dada por

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-10^{-6} \cdot 10} = 0,999999 \quad (I.40)$$

onde  $\lambda$  corresponde à taxa média de falha, para acidentes que é da ordem de  $1 \times 10^{-6}$  /h. Sendo assim, a confiabilidade de cada sistema é dada por

$$R_i(t) = 0,999999^{\frac{1}{6}} = 0,9999984 \quad (I.41)$$

Mas, comparado I.39 com I.41 vê-se que o sistema considerado possui uma confiabilidade inferior ao mínimo desejado. Diante desse problema, surge a questão: o que fazer para aumentar a confiabilidade do sistema considerado?

Uma proposta é utilizar uma associação em série paralelo de componentes, conforme indicado na figura I.12:

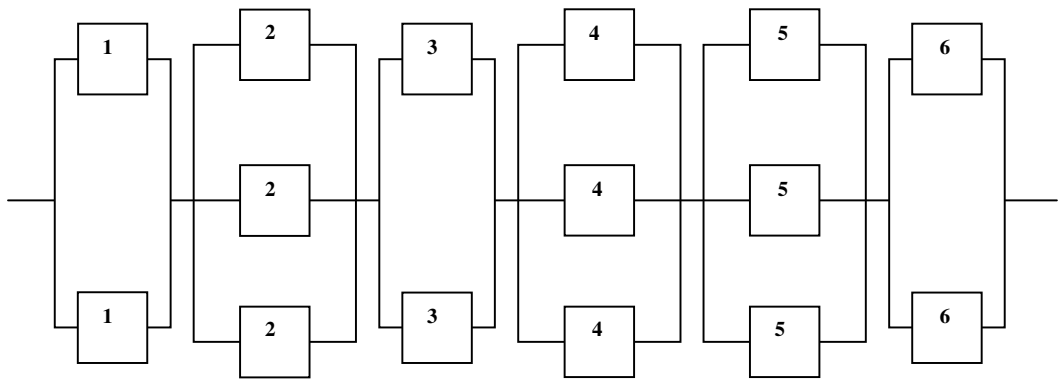


Figura I.12 – Sistema hidráulico com componentes dispostos em série paralelo (LAFRAIA, 2001).

Os componentes: bomba, válvula de alívio e válvula tem tripla redundância devido as suas taxas médias de falha. A partir dessa nova configuração calcula-se a confiabilidade do sistema, isto é, de um sistema em série com componentes em paralelo.

Para obter a confiabilidade do conjunto é possível utilizar a taxa de falha equivalente para a associação em paralelo, e isso pode ser feito por meio da fórmula I.42:

$$f(t) = n\lambda^n t^{n-1} \quad (I.42)$$



$$\begin{aligned}
 f_1(t) &= 2(0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 100)^2 \cdot 10 = 1,8 \cdot 10^{-8} \\
 f_2(t) &= 3(10 \cdot 10^{-6} \cdot 100)^2 \cdot 10^1 = 3,0 \cdot 10^{-7} \\
 f_3(t) &= 2(0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 100)^2 \cdot 10 = 1,8 \cdot 10^{-8} \\
 f_4(t) &= 3(5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 100)^2 \cdot 10^2 = 5,55 \cdot 10^{-8} \\
 f_5(t) &= 3(4,6 \cdot 10^{-6} \cdot 100)^2 \cdot 10 = 2,92 \cdot 10^{-8} \\
 f_6(t) &= 2(0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 100)^2 \cdot 10^2 = 8,0 \cdot 10^{-9}
 \end{aligned}
 \tag{I.43}$$

Logo, de I.43 segue que a taxa média de falhas,  $f'$ , é obtida fazendo-se:

$$f' = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 = 4,287 \cdot 10^{-7} \tag{I.44}$$

Portanto, a confiabilidade do sistema será dada por

$$R'(t) = e^{-4,287 \cdot 10^{-7} \cdot 10} = 0,9999957 \tag{I.45}$$

Mas, de I.41 e I.45 tem-se que

$$R(t) > R'(t) \tag{I.46}$$

ou seja, a confiabilidade do sistema hidráulico aumentou, só que não o suficiente, pois ainda encontra-se abaixo da confiabilidade mínima admissível, 0,9999984. Isto sugere um novo estudo, que deve ser feito a partir do aumento do número de componentes, analisando a taxa média de falhas de cada componente, obtida anteriormente, a fim de garantir a confiabilidade de 0,9999984. Analogamente, ao primeiro estudo, pode-se aumentar o número de componentes de forma a considerar a nova configuração, representada na figura I.13.

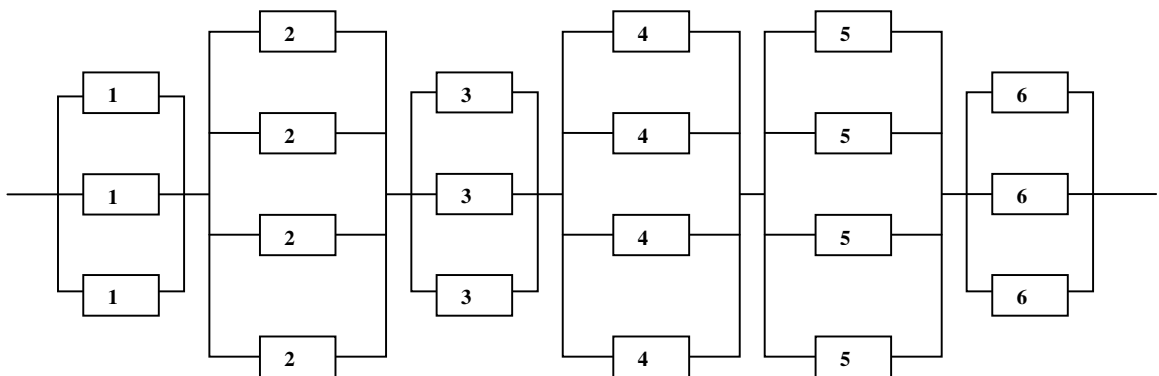


Figura I. 13 – Sistemas hidráulicos com estrutura aumentada (LAFRAIA, 2001).

Prosseguindo, analogamente ao modelo proposto anteriormente, obtém-se agora:

$$\begin{aligned}
 f'_1 &= 8,1 \cdot 10^{-12}; \\
 f'_2 &= 4,0 \cdot 10^{-9}; \\
 f'_3 &= 8,1 \cdot 10^{-12}; \\
 f'_4 &= 4,22 \cdot 10^{-10}; \\
 f'_5 &= 1,79 \cdot 10^{-10} \text{ e} \\
 f'_6 &= 2,4 \cdot 10^{-12}
 \end{aligned}
 \tag{1.47}$$

Logo, a taxa média de falha passa a ser:

$$f'' = 4,6196 \cdot 10^{-9} \tag{1.48}$$

e a confiabilidade do sistema será dada por

$$R''(t) = e^{-4,6196 \cdot 10^{-9} \cdot 10} = 0,99999995 \tag{1.49}$$

Portanto, de 1.41. e 1.49 segue que

$$R''(t) > R(t) \tag{1.50}$$

Assim, a confiabilidade do sistema fica acima da confiabilidade mínima admissível, podendo ser esta, a alternativa adotada. Existem outras possíveis alternativas, porém a situação tem como objetivo mostrar que a busca de soluções pode ser dada por meio de um processo de modelagem que utiliza como ferramenta teórica a teoria matemática da confiabilidade.

## 1.5 Tópicos de lógica *Fuzzy*

A lógica *Fuzzy* constitui-se de técnicas poderosas para a solução de problemas com uma vasta aplicabilidade, especialmente nas áreas de controle e tomada de decisão.

A lógica *Fuzzy* deriva da habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações nebulosas, vagas, ambíguas e qualitativamente incompleta e imprecisa. Assim, os sistemas de base *Fuzzy* têm habilidade de raciocinar de forma semelhante à dos humanos.

Seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção.

A lógica *Fuzzy* difere da lógica de Aristóteles (384-322 a.C.), filósofo grego fundador da ciência da lógica, que estabeleceu um conjunto de regras rígidas para que conclusões pudessem ser aceitas como logicamente válidas, isto é, linha de raciocínio baseada em premissas e conclusões. Desde então, a lógica ocidental utiliza como valores de “verdades” das afirmações, classificando-as como verdadeiras ou falsas.

A lógica *Fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy*. Esta teoria é uma generalização da teoria dos conjuntos Tradicionais para resolver os paradoxos gerados à partir da classificação “verdadeiro ou falso” da lógica Clássica. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na lógica *Fuzzy*, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Com a incorporação do conceito de “grau de verdade”, a teoria dos Conjuntos *Fuzzy* estende a teoria dos conjuntos Tradicionais. Os grupos são rotulados qualitativamente (usando termos lingüísticos, tais como: alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc.) e os elementos destes conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto). Por exemplo, um homem de 1,80 metro e um homem de 1,75 metro são membros do conjunto “alto”, embora o homem de 1,80 metro tenha um grau de pertinência maior neste conjunto.

Vários trabalhos em torno da lógica *Fuzzy* são desenvolvidos nas mais diferentes áreas de atuação. Como exemplo, os Ligados às áreas de automação industrial, iniciada por Zadeh, aos atuais como:

- O modelo proposto por MEZA et al., (2006) onde Utilização neuro-*Fuzzy* para a localização de defeitos em sistemas de potência.
- O modelo baseado em lógica *Fuzzy* por MEDINA e MORENO (2007) para avaliar o risco de mercado na negociação de energia elétrica.
- A proposta de YANG et al., (2007) de um modelo para avaliação de risco de ponte que usam condições lingüísticas como Certo, Muito Alto, Alto, Ligeiramente Alto, Médio, Ligeiramente Baixa, Baixa, Muito Baixo ou Nenhum em lugar de valores numéricos precisos, oferecendo um modo flexível, prático e efetivo de riscos.
- E o modelo simplificado para o cálculo da confiabilidade utilizando os indicadores de desempenho da manutenção de uma planta industrial proposto por KUMAR et al., (2004) onde utiliza Toolbox da lógica *Fuzzy* de *MATLAB 6.1*.

- Para as incertezas relacionadas com o indicador MTBF, assim como o MTTR, utiliza-se o *Expert Fuzzy force outage rate.*, como mostrado na fórmula:

$$(fz-FOR)=MTTR/(MTTR+MTBF) \quad (I.51)$$

### I.5.1 Histórico da Tecnologia *Fuzzy*

Os conjuntos *Fuzzy* lidam com conceitos inexatos. É uma metodologia de caracterização de classes que não define limites rígidos entre elas. A utilização do conjunto *Fuzzy* é indicada sempre que se lida com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos.

Dadas suas características intrínsecas, a lógica nebulosa é capaz de incorporar tanto o conhecimento objetivo (de dados numéricos) quanto o conhecimento subjetivo (de informações lingüísticas).

A lógica *Fuzzy* está relacionada à variável lingüística. Por exemplo, quando se diz “ela saiu de casa e voltou dizendo que a temperatura lá fora está agradável”. Nesse caso, não é possível descrever, exatamente, qual era a temperatura do ambiente externo (KOSKO, 1995). O termo *Fuzzy* possui caráter polissêmico: barroso, nebuloso, difuso, em graus ou em classes.

O conceito de conjunto *Fuzzy*, foi introduzido, em 1965, por Lotfi A. Zadeh (Universidade da Califórnia, Berkeley). Em vez de se basear em números exatos ele traduziu matematicamente a inexatidão da linguagem, pois, muitos conceitos são melhores definidos por palavras do que pela matemática.

Zadeh publicou trabalho exaltando as virtudes da imprecisão, lançando as bases da *Fuzzy logic* ou lógica difusa. O cientista mostrava que a vida está sujeita a imperfeições, mas estas não são, na verdade, imperfeições, e sim características de sistemas complexos para nossas cartesianas conclusões. Zadeh é personalidade marcante na ciência e tecnologia da nossa época, cujos trabalhos tiveram (e têm) impacto em muitas áreas científicas como controle, lógica, decisão, otimização, previsão e inteligência artificial (KOSKO, 1995).

A ele é atribuído o reconhecimento como grande colaborador do Controle Moderno. Em meados da década de 60 do século passado, Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na Lógica Booleana. Procurando solucionar esses problemas o Professor Zadeh, em 1965, então professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade da Califórnia em Berkeley, publicou um artigo sobre a teoria dos conjuntos *Fuzzy*. Ele propôs graduar a pertinência de elementos nos conjuntos, ou seja, um elemento pode ser, por exemplo, 30% de um conjunto A e 70% do conjunto A’.

A teoria *Fuzzy* constitui-se numa poderosa ferramenta com capacidade para modelar problemas reais onde incertezas e imprecisões estão presentes. Ela possibilita a representação de conceitos vagos e imprecisos (VANDERLEI FILHO, 2002).

Em 1974, o Prof. Mamdani, do Queen Mary College, Universidade de Londres, após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com tipos distintos de controladores, incluindo o PID, somente conseguiu fazê-lo através da aplicação do raciocínio *Fuzzy*.

Esse sucesso serviu de alavanca para muitas outras aplicações, como em 1980, no controle *Fuzzy* de operação de um forno de cimento. Vieram em seguida, várias outras aplicações, destacando-se, por exemplo, os controladores *Fuzzy* de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens (MENDEL, 1995) estimulados pelo desenvolvimento e pelas enormes possibilidades práticas de aplicações que se apresentaram, segundo EARL COX (1994). Os estudos sobre Sistemas *Fuzzy* e controle de processos avançam rapidamente, culminando com a criação em 1984, da Sociedade Internacional de Sistemas *Fuzzy* constituída, principalmente, por pesquisadores dos países mais avançados tecnologicamente.

Após mais de três décadas a idéia de teoria *Fuzzy* desponta com sucesso em várias outras áreas de aplicações, tais como: diagnóstico e análise de imagens médicas, processos de fabricação (manufatura), controle de robôs, reconhecimento de escrita, reconhecimento automático de alvo, engenharia de alimentos e sistemas especialistas (VANDERLEI FILHO, 2002).

### 1.5.2 Conjuntos *Fuzzy*

Os conjuntos clássicos, denominados conjuntos abruptos (*crisp sets*) são formados por elementos que são ditos pertinentes ao conjunto. Portanto, o grau de pertinência de um elemento assume apenas dois valores: zero, se pertencer 0% ao conjunto ou 1, se pertencer 100% ao conjunto, (ZADEH, 1965). Assim, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido.

Dado um conjunto  $A$  em um universo  $X$ , os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isto deve ser expresso pela função característica  $f_A$ :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1, x \in A \\ 0, x \notin A \end{cases} \quad (1.52)$$

Neste contexto, a função característica somente assume valores 0 ou 1, quando a condição de pertinência altera-se abruptamente.

A lógica *Fuzzy* é uma extensão da lógica clássica para tratar o conceito de verdade parcial. Esta parcialidade é verificada pela análise de “quanto” um dado elemento pertence a um conjunto. A classificação dos graus de pertinência ou grau de verdade de um elemento dentro do intervalo  $[0,1]$ . transforma-o em um conjunto *Fuzzy* (OLIVEIRA, 2002).

Zadeh propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo  $[0,1]$ . Um conjunto *Fuzzy*  $A$  em um universo  $X$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \subset R$  e representado por um conjunto de pares ordenados  $A = \{\mu_A(x)/x\} \quad x \in X$  onde  $\mu_A(x)$  indica o quanto  $x$  é compatível com o conjunto  $A$ . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto *Fuzzy*, com diferentes graus de pertinência.

Um subconjunto *Fuzzy*  $A$  de um conjunto  $X$  pode ser definido como um conjunto de pares ordenados, onde cada par tem como primeiro elemento um elemento de  $X$  e como segundo elemento um valor no intervalo  $[0,1]$ , com exatamente um par ordenado para cada elemento de  $X$ . Isto define um mapeamento entre os elementos do conjunto  $X$  e os pontos no intervalo  $[0,1]$ . O valor zero é usado para representar a completa não pertinência, o valor um é usado para representar a completa pertinência, e valores entre zero e um são usados para representar graus intermediários de pertinência. O conjunto  $X$  é chamado de universo de discurso para o subconjunto *Fuzzy*  $A$ . O universo de discurso também deve ser visto como a faixa de todos possíveis valores de entrada de um sistema *Fuzzy*. De forma freqüente, o mapeamento é descrito como uma função: a função de pertinência de  $A$ .

O grau para o qual a declaração de que  $x$  está em  $A$  é verdadeira, é determinada encontrando-se o par ordenado onde o primeiro elemento é  $x$ . O grau de verdade da declaração é dado pelo segundo elemento do par ordenado (VANDERLEI FILHO, 2002).

Definição 1: Seja  $X$  um conjunto de objetos, com elementos  $x$ . Assim, temos  $X \{ x \}$ .

Definição 2: Um conjunto *Fuzzy*  $A$  em  $X$  é caracterizado por uma função de pertinência  $\mu_A(x)$  qual mapeia cada ponto em  $X$  para o intervalo real  $[0,1]$ . Ao passo que  $\mu_A(x)$  se aproxima de 1,0, o grau de pertinência de  $x$  em  $A$  aumenta. (VANDERLEI FILHO, 2002). Ou seja,  $\mu_A$ :

$\mu_A X \rightarrow [0,1]$ . Um conjunto *Fuzzy* deve ser exemplificado como segue:

$$A = \{ (a; 0,8), (d; 1), (f; 0,3) \}$$

ou

$$A = \{ (0,8/a), (1/d), (0,3/f) \}$$

O elemento “a” pertence ao conjunto A com um grau de 80% o elemento “d” pertence totalmente (100%) ao conjunto e o elemento “f” pertence somente 30% (OLIVEIRA, 2002).

Funções de pertinência podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer-se uso de funções de pertinência padrão, como, por exemplo, as de forma triangular, trapezoidal e Gaussiana. Em aplicações práticas as formas escolhidas inicialmente podem sofrer ajustes em função dos resultados observados.

Funções de pertinência contínuas podem ser definidas por intermédio de funções analíticas. Por exemplo, a seguinte função geral pode ser usada para definir as funções de pertinência associadas aos conjuntos *Fuzzy* correspondentes aos termos pequeno, médio e grande:

$$\mu_A(x) = (1 + (a(x-c))^b)^{-1} \quad (1.53)$$

A forma de  $\mu_A(x)$  pode ser modificada através da manipulação dos três parâmetros a, b e c.

$$\begin{aligned} \mu_{pequeno}(x) &= (1 + 9x^2)^{-1} \\ \mu_{médio}(x) &= (1 + 9(x-0,5)^2)^{-1} \\ \mu_{grande}(x) &= (1 + 9(x-2)^2)^{-1} \end{aligned} \quad (1.54)$$

### Operações *Fuzzy*

As operações clássicas de igualdade, união, interseção e complemento foram estendidos para o domínio dos conjuntos *Fuzzy*, apresentando diversas formas de implementação. A seguir, são apresentadas estas extensões, conforme proposto por (ZADEH, 1965).

Igualdade de conjuntos *Fuzzy*.

Dois conjuntos *Fuzzy* A e B são ditos iguais se, e somente se,  $A \cdot B$  e  $B \cdot A$  ou seja:

$$\begin{aligned} A = B \text{ se } \mu_A(x) = \mu_B(x) \text{ e } \mu_B(x) = \mu_A(x), x \in X \text{ ou} \\ A = B \text{ se } \mu_A(x) = \mu_B(x), x \in X \end{aligned} \quad (1.55)$$

### Complemento *Fuzzy*

O complemento de um conjunto *Fuzzy* A,  $cA$ , é obtido pela aplicação da seguinte função de pertinência:

$$\mu_{cA}(x) = 1 - \mu_A(x), x \in X \quad (1.56)$$

O valor  $\mu_{cA}(x)$  pode ser visto não apenas como o grau de pertinência pelo qual x pertence a  $cA$ , mas também como o grau pelo qual x não pertence ao conjunto *Fuzzy* A. Da mesma forma,  $\mu_{cA}$

$(x)$  pode ser considerado como o grau pelo qual  $x$  não pertence à  $cA$ . Para um conjunto *Fuzzy*  $A$ ,  $cA$  pode ser obtido através da aplicação da função  $c$  aos valores  $\mu_{cA}(x)$  :

$$\mu_{cA}(x) = c(\mu_A(x)), \dots X \quad (I.57)$$

#### Interseção *Fuzzy*

A interseção *Fuzzy* dos conjuntos *Fuzzy*  $A$  e  $A'$ , definida por  $\mu_{A \cap A'}$ , provoca o surgimento de outro conjunto *Fuzzy*, cuja função de pertinência é formada pelos mínimos das funções de pertinência dos conjuntos  $\tilde{A}$  e  $\tilde{A}'$ , assim representado:

$$(A \cap B) = \int [\mu_A(x) \cap \mu_B(x)]/x \quad (I.58)$$

A função *min* identifica o maior conjunto *Fuzzy* contido em ambos os conjuntos  $A$  e  $A'$ .

#### União *Fuzzy*

A união *Fuzzy* dos conjuntos *Fuzzy*  $A$  e  $A'$ , definida por  $\mu_{A \cup A'}$ , provoca o surgimento de outro conjunto *Fuzzy*, cuja função de pertinência é formada pelos máximos das funções de pertinência dos conjuntos  $\tilde{A}$  e  $\tilde{A}'$ , representando-se desta forma:

$$(A \cup B) = \int [\mu_A(x) \cup \mu_B(x)]/x \quad (I.59)$$

De forma semelhante, a função *max* identifica o menor conjunto *Fuzzy* que contenha os conjuntos  $A$  e  $A'$ .

#### Operações Algébricas com Conjuntos *Fuzzy*

Os conceitos básicos dos conjuntos *Fuzzy* também apresentam extensões para permitir operações algébricas. A seguir estão apresentadas as mais empregadas (LIMA E OLIVEIRA JR, 2002).

a) Soma Algébrica: a soma algébrica  $A' = A + B$  é definida da seguinte forma:

$$A + B = \{ (x, \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)) / x \cdot X \} \quad (I.60)$$

b) Produto algébrico: o produto algébrico de dois conjuntos *Fuzzy*  $A$  e  $B$  é definido da seguinte forma:



$$A.B = \{(x, \mu A(x) \cdot \mu B(x)) / x \in X\} \quad (1.61)$$

### Operações de Agregação

Em muitos casos, torna-se necessário combinarmos dois conceitos ou termos lingüísticos diferentes que, de alguma forma, se aplicam parcial ou simultaneamente a um mesmo atributo. Para isto é necessário unificar estes conjuntos em um novo conjunto.

Esta operação é chamada de agregação e é definida por uma função de transferência  $h$  que combina  $n$  conjuntos nebulosos em um único conjunto:

$$h: [0,1]^N \rightarrow [0,1]$$

Um conjunto agregado de  $n$  conjuntos nebulosos  $C = h(A1, A2, \dots, An)$ , é

$$C = \{(x, \mu C(x)) / \mu C(x) = h(\mu A1(x), \mu A2(x), \dots, \mu An(x))\} \quad (1.62)$$

### Relações Fuzzy

Representa o grau de associação, interação ou interconectividade entre elementos de dois ou mais conjuntos *Fuzzy*.

Exemplos:

$x$  é muito maior que  $y$

$y$  é bem próximo de  $x$

$z$  é muito mais alto que  $y$

Se  $x$  é grande Então  $y$  é pequeno

A relação Fuzzy  $R(X,Y)$  é um conjunto *Fuzzy* caracterizado pela função de pertinência  $\mu R(x,y)$

$$\text{onde } x \in X \text{ e } y \in Y, \text{ Logo } R(X,Y) = \{(x,y), \mu R(x,y)\} / (x,y) \in X \times Y \quad (1.63)$$

### 1.5.3 Definição de subconjuntos Fuzzy

Para definir o subconjunto gerado pelo resultado da ativação de uma regra, é preciso definir os métodos de interseção e implicação (EARL COX E OLIVEIRA JÚNIOR, 1994).

Os métodos de interseção mais comuns são os métodos de interseção mínimo e produto.

#### Método de Interseção Mínimo

O grau máximo de pertinência do conjunto de saída da regra ativada será obtido pelo mínimo grau de pertinência de seus antecedentes.

#### Método de Interseção Produto

O grau máximo de pertinência do conjunto de saída da regra ativada será obtido pelo produto do grau de pertinência de seus antecedentes.

Os métodos de implicação mais comuns são os métodos de implicação mínimo e produto.

#### Método de Implicação Mínimo

O subconjunto gerado será o valor mínimo do conjunto da variável de saída que foi ativado e o grau de pertinência gerado pelo método de interseção.

#### Método de Implicação Produto

O subconjunto gerado será o produto entre o conjunto da variável de saída que foi ativado e o grau de pertinência gerado pelo método de interseção.

A composição entre duas ou mais regras ativadas (relações nebulosas) é definida como o conjunto de saída formado pela união dos subconjuntos gerados por essas regras.

A operação de composição de relações nebulosas pode tomar diversas formas. As mais comuns destas formas são a composição *max-min* e a composição *max-produto*.

No *MATLAB* está sendo usada a composição *max-min* para formar a área de saída (Defuzzificação) que será calculada pelo centróide, este valor será o sinal de controle para o sistema controlado.

### 1.5.4 Características da lógica *Fuzzy*

- A lógica *Fuzzy* está baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores verdadeiros são expressos linguisticamente. Por exemplo: quente, muito frio, verdade, longe, perto, rápido, vagaroso, médio, etc.
- Possui vários modificadores de predicado como, por exemplo: muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio, etc.
- Possui também um amplo conjunto de quantificadores, como, por exemplo: poucos, vários, em torno de, usualmente.
- Faz uso das probabilidades lingüísticas, como por exemplo: provável, improvável, que são interpretados como números *Fuzzy* e manipulados pela sua aritmética.
- Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes, como um limite apenas.

### I.5.5 Exemplo de Processamento *Fuzzy*

1) Deseja-se um sistema *Fuzzy* para controle de temperatura através de condicionador de ar. Deseja-se que ele regule a temperatura, ou seja, se ela está alta, então o condicionador de ar terá que baixar a potência para esfriar o ambiente, se a temperatura está boa deve assim permanecer, esse está baixa deve subir.

Dado o problema, estabelecem-se as variáveis  $T$  para temperatura e  $P$  para potência do motor do condicionador de ar.

A seguir, definem-se as regras:

*se  $T = quente$  então  $P = esfriar$*

*se  $T = normal$  então  $P = zero$*

*se  $T = frio$  então  $P = esquentar$*

2) Para que se atenda adequadamente as regras desejadas, são definidos os conjuntos para cada variável. Cada conjunto possível para cada variável será definido como uma função trapezoidal, conforme apresentado a seguir.

A figura I.14 ilustra o gráfico da variável de temperatura (medida em graus Celsius) é descrito conforme as possibilidades definidas nas regras:

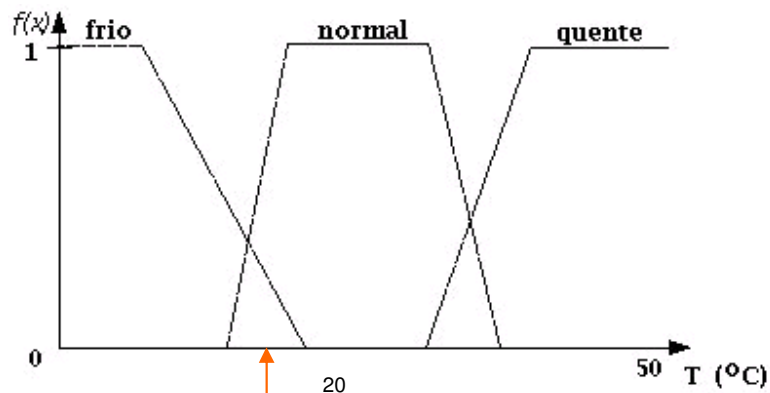


Figura I.14 – Gráfico de temperatura (SHAW E SIMÕES, 1999).

3) Uma vez definidas as variáveis e seus conjuntos, para dada temperatura  $x$  verificamos os pontos máximo e mínimo de intersecção no figura I.14.

Ponto máximo é o maior valor obtido com resultado de uma das funções, e o mínimo é o menor resultado. Por exemplo, para uma temperatura de 20 graus, o ponto máximo seria dado pela função trapezoidal do conjunto normal (um valor, digamos, de 0,6).

Já o ponto mínimo seria o resultado dado pela função do conjunto frio (suponhamos um valor de 0,25). Então, para uma temperatura de 20, teremos 0,6 como máximo e 0,25 como mínimo, que serão utilizados na próxima etapa.

4) De posse dos valores obtidos na etapa anterior, aplicam-se as regras: como o ponto máximo foi obtido no conjunto *normal* da temperatura, então será definida uma área abaixo de 0,6 no conjunto zero da potência; como o ponto mínimo veio do conjunto *frio*, então a área abaixo de 0,25 no conjunto esquentar da potência.

O somatório das áreas dará a quantidade de potência a ser somada ao motor para tender a potência a zero e, portanto, colocar a temperatura dentro do normal. Já a figura I.15 mostra o gráfico para a potência (em Watt).

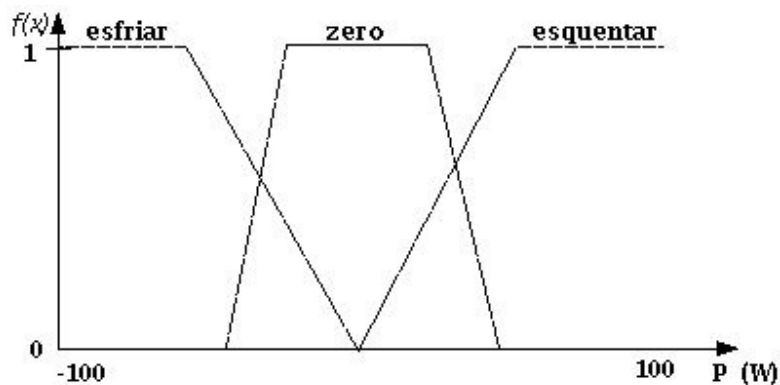


Figura I.15 – Gráfico de potência (SHAW E SIMÕES, 1999).

A figura I.16 a seguir ilustra o gráfico da área a ser obtida.

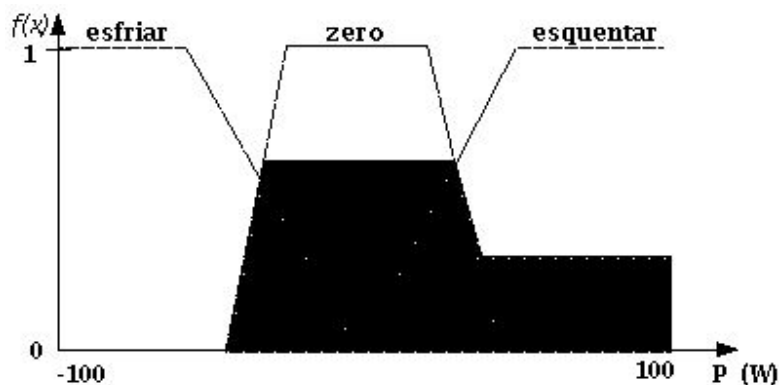


Figura I.16 – Gráfico da área (SHAW E SIMÕES, 1999).

### I.5.6 Fuzzificação e Defuzzificação Natural

A operação das atividades humanas requer uma aproximação de dados e Informações sensoriais através de termos vagos ou imprecisos. O cérebro humano codifica tais imprecisões naturais através de conjuntos e números *Fuzzy*. Uma pessoa que esteja numa função de operador de processos não precisa de um valor exato e definido para uma variável, como, por exemplo, velocidade. Tal operador consegue classificar a informação de velocidade em conjuntos, tipo BAIXA, MÉDIA, e ALTA. Esses conjuntos representam valores "Fuzzificados" dos valores exatos de velocidade. A seguir, o operador formula e executa uma estratégia de controle baseada na compreensão de cada variável de entrada e saída, o fluxo de dados no cérebro fica reduzido apenas ao que é necessário para se executar a tarefa requerida com a precisão e a resolução necessárias; assim o operador humano processa as quantidades *Fuzzy*, chegando a uma variável *Fuzzy* com sua ação de controle. O ser humano naturalmente trabalha com características incertas, mas as máquinas, equipamentos e controles industriais precisam de um número real que represente o valor de referência necessário.

Dessa maneira, é necessário um processo de conversão do valor *Fuzzy* - resultante da saída da inferência - para um número real, tal como acionar uma alavanca ou ajustar um botão para uma determinada posição; esse processo é chamado por Defuzzificação. Há diversos exemplos que mostram que o ser humano tem essa capacidade de Defuzzificação natural, na habilidade de decifrar caligrafia, em entender linguajar com sotaque, ou até na de reconhecer pessoas após um longo período de ausência, mesmo que tal pessoa tenha perdido peso, cortado a barba ou alterado seu cabelo!

Está demonstrada que a habilidade de se manipular conjuntos e números *Fuzzy* é uma das atividades mais importantes do cérebro humano. Uma vez que não há modelo matemático para se seguir, o processo de decisões *Fuzzy* tem um processamento computacional mínimo.

Provavelmente, essa habilidade humana desenvolveu-se através das gerações, já que o fato de se trocar precisão por velocidade é decisivo para a sobrevivência biológica em situações críticas, ou de perigos naturais. Além dos fatores descritos, há uma característica que em sistemas complexos a imprecisão matemática perde seu significado. Na obra "Princípio da Incompatibilidade", ZADEH (1997) afirma que "conforme a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade de fazer afirmações precisas significativas sobre seu comportamento diminui, até um limiar em que a precisão e relevância tornam-se praticamente características mutuamente exclusivas".

A figura I.17, mostra o sistema de inferência *Fuzzy*.

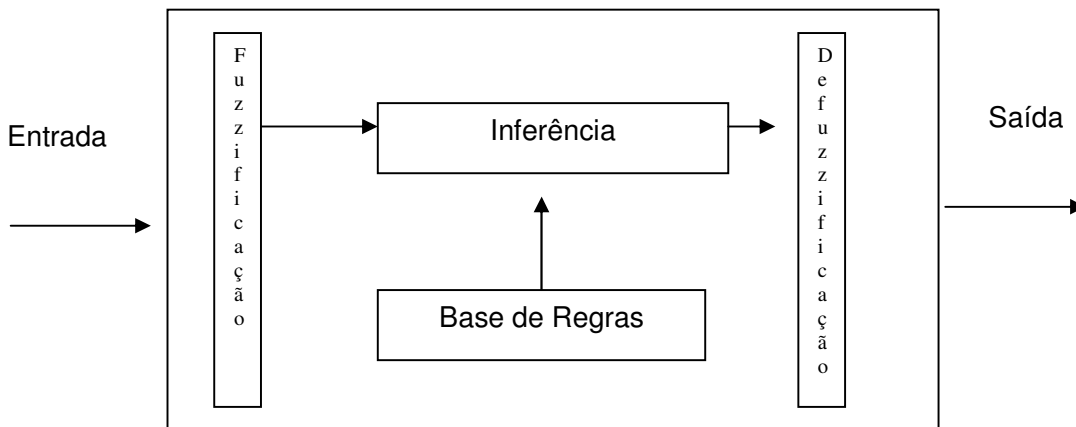


Figura I.17 – Sistema de inferência *Fuzzy* (TANSCHKEIT E VELLASCO, 2006).

Sendo as funções principais de cada módulo:

- Fuzzificação: transforma as medidas do processo em conjuntos nebulosos para representar as incertezas dos sensores;
- Inferência: calcula as ações de controle a serem empregadas, de acordo com as regras expressas na base de regras. O resultado é representado por um conjunto nebuloso de saída;
- Defuzzificação: calcula uma saída numérica a partir do conjunto nebuloso de saída calculado na inferência.

Alguns tipos de funções de pertinência.

- Triangular: a figura I.18 foi extraída de DALBEN ( 2004) e mostra o gráfico que é especificado por três parâmetros (a, b, c).

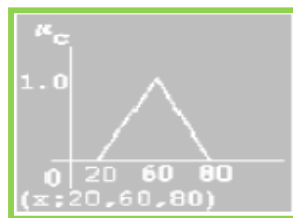


Figura I.18 – Gráfico Triangular.

$$\text{Triangular } (x; a, b, c) = \max(0, \min[(x - a) / (b - a), (c - x) / (c - b)]) \quad (I.64)$$

As figuras I.19 e I.20 foram extraídas de DALBEN ( 2004) e mostra seus respectivos parâmetros.

- Trapezoidal: A figura I.19, mostra o gráfico que é especificado por 4 parâmetros (a,b,c,d) .



Figura I.19 – Gráfico Trapezoidal.

$$\text{Trapézio } (x;a,b,c,d) = \max(0, \min[(x-a)/(b-a), 1, (d-x)/(d-c)]) \quad (\text{I.65})$$

- Gaussiana: A figura I.20 mostra o gráfico que é especificado por dois parâmetros (s, c)

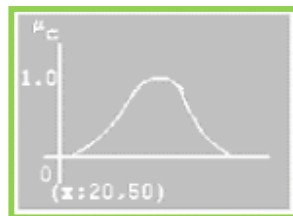


Figura I.20 – Gráfico Gaussiana.

$$\text{Gaussiana } (x;s,c) = \exp\{-(x-c)/s\}^2 \quad (\text{I.66})$$

Os conjuntos *Fuzzy* permitem que se definam operações binárias internas, tais como união, interseção e complemento, similarmente às existentes na teoria dos conjuntos booleanos (VANDERLEI FILHO, 2002).

### I.5.7 Fuzzificação

A Fuzzificação é o mapeamento do domínio de valores numéricos (VN) reais (como valores obtidos de um sensor) para valores *Fuzzy* (VF), definidos pelas funções de pertinência.

Como pode ser visto na Figura I.21, o valor *Fuzzy* para a variável  $X$  é dado por 0.3 para a função  $M$  e por 0.7 para  $L$ . (TOURINO, 2000).

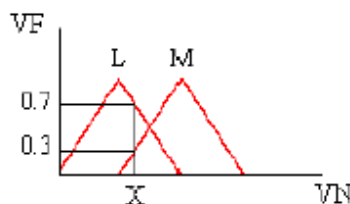


Figura I.21 – Exemplo de fuzzificação (TOURINO, 2000).

A Fuzzificação também representa que há atribuição de valores lingüísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. A Fuzzificação é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada. Reduzindo grandemente o número de valores a serem processados. Uma menor quantidade de valores processados significa que há uma computação mais veloz. A etapa de “Fuzzificação” mapeia a entrada (ou característica) entre valores de 0 a 1, através das funções de pertinência.

### 1.5.8 Defuzzificação

Na Defuzzificação, o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras *Fuzzy* será traduzido num valor discreto. O Objetivo é obter-se um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *Fuzzy* inferidos da variável lingüística de saída, ou seja, a distribuição de possibilidades. Assim, a Defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *Fuzzy* para o domínio discreto. Para selecionar o método apropriado para Defuzzificação, pode-se utilizar um enfoque baseado no centróide ou nos valores máximos que ocorrem da função de pertinência resultante. Os seguintes métodos são muito utilizados: (1) Centro-da-área (Co-A), (2) Centro-do-máximo (C-o-M), e (3) Média-do-máximo (M-o-M). (SHAW E SIMÕES, 1999).

#### Defuzzificação Centro-de-Área (C-o-A)

O método Centro-da-Área é freqüentemente chamado de método do Centro-de-Gravidade, pois ele calcula o centróide da área composta que representa o termo de saída *Fuzzy* ( $\mu_{OUT}$ ). Esse termo de saída *Fuzzy* é composto pela união de todas as contribuições de regras. O centróide é um ponto que divide a área de  $\mu_{OUT}$  em duas partes iguais.

A Figura 1.22, mostra as funções de pertinência de uma variável lingüística de saída Potência-do-Motor. Assumindo que existam cinco funções de pertinência, e que uma saída *Fuzzy* (ação ou conseqüência) em particular, a resultante das regras de inferência *Fuzzy* foi:

NB=0,0; NM=0,0; ZE=0,2; PM=0,8; PB=0,0; Ou, na forma de vetor de possibilidades: (0,0; 0,0; 0,2;0,8; 0,0).

Então, uma saída *Fuzzy* direta do vetor de possibilidades é ambígua, pois duas ações diferentes têm graus de pertinência não-nulos. Deve-se lembrar que conjuntos *Fuzzy* são combinados de acordo com regras da teoria de conjuntos.

A Figura 1.23, mostra as áreas de combinadas pelo operador de união, o que faz com que seu contorno seja a saída *Fuzzy* composta para a variável Potência-do-Motor.



O método de Defuzzificação Co-A calcula o centróide desta área. Segundo OLIVEIRA (1999) o mais comum é o Co-(A), que nos fornece um valor correspondente à abscissa do baricentro do gráfico da função de pertinência. O cálculo do centróide da área se dá da seguinte forma:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \cdot \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{out}(u_i)} \quad (1.67)$$

Onde  $\mu_{OUT}(\mu_i)$  é a área de uma função de pertinência (como, por exemplo, ZE ou PM modificada pelo resultado da inferência *Fuzzy* (como, por exemplo, 0,2 ou 0,8 respectivamente, e  $\mu_i$  é a área do centróide da função de pertinência individual - ZE ou PM respectivamente; tal equação calcula o centróide composto, para o qual contribuem as duas funções de pertinência indicadas).

O método de Defuzzificação C-o-A apresenta pequenos problemas, um deles ocorre quando as funções de pertinência não possuem sobreposição, onde o centro geométrico da figura, na realidade, não deveria ter significado físico, outro fator é que se mais de uma tiver regra à mesma saída *Fuzzy* há uma sobreposição de áreas que não é devidamente contabilizada. Além disso, a necessidade de integração numérica toma esforço computacional para cálculo. (SHAW E SIMÕES, 1999).

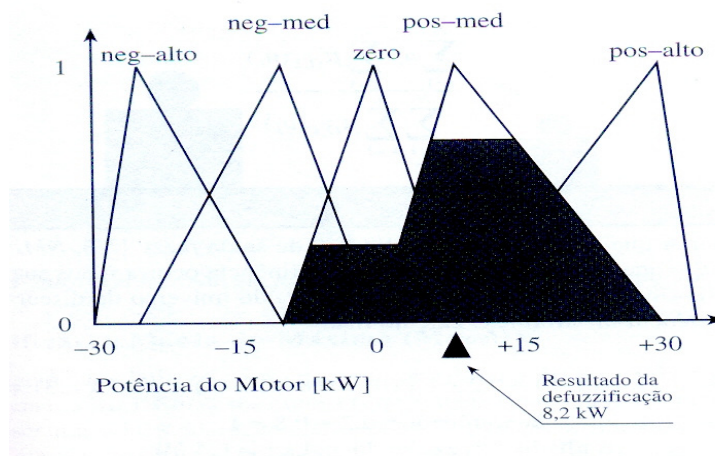


Figura I.22 – Funções de pertinência de uma variável linguística de saída Potência-do-Motor (SHAW E SIMÕES, 1999).

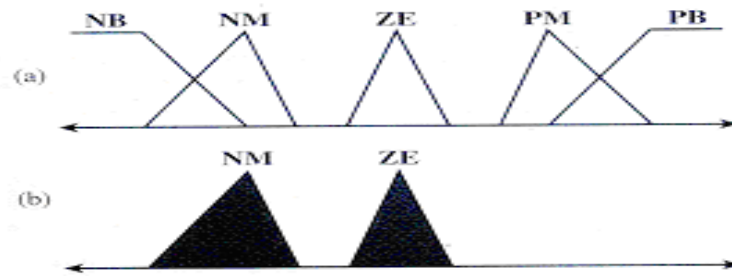


Figura I.23 – Áreas de ZE e PM combinadas pelo operador de união (SHAW E SIMÕES, 1999).

A entrada para o processo de Defuzzificação é um conjunto *Fuzzy* (agrega a saída do conjunto *Fuzzy*), e a saída é um número simples. Tão bem quanto ajuda de Fuzzificação, as regras calculam durante o passo intermediário, o final da saída desejado para cada variável é, geralmente, um número simples.

## CAPÍTULO II

### **PROPOSTA DE UM MODELO CONCEITUAL PARA AUMENTO DA CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO DE FILTROS DE CELULOSE USANDO A LÓGICA *FUZZY***

O desempenho humano, a falha humana ou o erro humano é cada vez mais e mais identificado com o mau funcionamento dos sistemas. Isto é devido parcialmente a alguns sistemas de interação homem – máquina que estão sendo desenhados com alta confiabilidade. Por outra parte o erro humano não é a causa de um evento, mas a consequência. Ele não ocorre acidentalmente, mas de várias formas e de forma inevitável.

A complexidade dos seres humanos, ou seja, a falha humana como descrita no capítulo I, resulta das interações homem-trabalho ou homem-ambiente que não atendam a determinados padrões esperados. Nesse conceito estão implícitos três elementos: uma ação humana variável, uma transformação do ambiente (ou máquina) que não atenda a determinados critérios e um julgamento da ação humana frente a esses critérios.

Se o homem tiver meios de identificar imediatamente as consequências provocadas pelos desvios naturais do seu comportamento, ele pode introduzir as ações corretivas diminuindo a ocorrência das falhas. Logo, as falhas dependem da facilidade de percepção das condições inaceitáveis e da reversibilidade do sistema. Essa reversibilidade depende da dinâmica e da linearidade do sistema. Isso quer dizer que, as falhas humanas não podem ser estudadas isoladamente das condições onde elas ocorrem.

A manutenção preditiva aproveita ao máximo a vida útil dos elementos da máquina, podendo-se programar a reforma e substituição somente das peças comprometidas. Requer acompanhamentos e inspeções periódicas através de instrumentos específicos de monitoração e requer profissionais especializados, sendo encarada como uma função estratégica direcionada ao suporte do gerenciamento e à solução dos problemas de máquinas e equipamentos.

As técnicas tradicionais de análise de sistemas de manutenção não são bem adaptadas para lidar com sistemas humanos porque elas falham em se adequar com a realidade da indefinição do pensamento e do comportamento humano. Assim, para lidar com tais sistemas de uma forma realista, necessita-se de abordagens que não coloquem acima de tudo o formalismo matemático preciso, rigoroso, e que empreguem, em vez disso, uma estrutura metodológica que seja tolerante com as imprecisões e verdades parciais.

Neste trabalho considera-se a hipótese de melhorar o processo decisório de manutenção para o estudo de caso de um sistema de tratamento de condensado da Central Termoelétrica de uma Refinaria de Petróleo, através da proposta de se utilizar a lógica *Fuzzy* para se determinar o melhor momento de realização da limpeza dos filtros de celulose.

## II.1- Metodologia do Trabalho

A metodologia de investigação adotada neste trabalho caracteriza-se por pesquisa bibliográfica das abordagens de manutenção, confiabilidade e Lógica *Fuzzy*. Uma pesquisa descritiva dos problemas decisórios para realização de manutenção e um estudo de caso da Central Termoelétrica de uma Refinaria de Petróleo, localizada no Município de Duque de Caxias – Rio de Janeiro – RJ.

Pesquisa descritiva tem como objetivo primordial a descrição de determinadas populações ou fenômenos. Uma de suas características está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como o questionário e a observação sistemática. (GIL, 2002).

Estudo de caso consiste no estudo profundo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento. Caracterizado por ser um estudo intensivo. É levada em consideração, principalmente, a compreensão, como um todo, do assunto investigado. Todos os aspectos do caso são investigados. Quando o estudo é intensivo podem até aparecer relações que de outra forma não seriam descobertas (FACHIN, 2001). Segundo YIN (2005), as pesquisas baseadas em estudos de caso podem se basear em seis fontes de evidências para que se obtenha um bom resultado: documentação, registro em arquivos, entrevistas, observações diretas, observações participantes, artefatos físicos.

A escolha das técnicas de pesquisa foi definida à partir da constatação, na pesquisa preliminar realizada nas instalações da Refinaria Duque de Caxias – REDUC da necessidade de melhoria da confiabilidade operacional do processo decisório para a realização da manutenção dos filtros de celulose da sua Central Termoelétrica.

A confiabilidade operacional nesse processo está relacionada diretamente a confiabilidade humana, conforme descrito no capítulo I.

A confiabilidade humana ( $R_H$ ) segundo PALLEROSI (2007) é uma seqüência lógica do estudo da Confiabilidade dos equipamentos, reconhece que o homem falha, e que estas falhas podem ser classificadas, quantificadas e matematicamente analisadas por meio de adequada distribuição estatística. Assim ela é descrita como a probabilidade de que uma pessoa não falhe no cumprimento de uma tarefa requerida, quando exigida. Seguindo as expressões I.1 e I.2. do capítulo I.

A definição mais empregada da Confiabilidade humana é segundo FILHO (1991) “a probabilidade de um desempenho bem sucedido de tarefa pelo homem em qualquer estágio no sistema operativo dentro de tempo mínimo especificado”.

O êxito ou não desse tipo de empreendimento depende de quanto acertadas são as decisões tomadas por seus especialistas. Para tal, é preciso que se tenha o problema bem formulado e as alternativas e seus respectivos cenários bem delineados.

Para SHAW e SIMÕES (1999) a técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle projetado para se comportar conforme o raciocínio dedutivo é a lógica *Fuzzy*. Esta técnica infere conclusões baseadas em informações que já conhecidas pelos especialistas, possibilitando aferição da relevância e confiabilidade.

A lógica *Fuzzy* representa um manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria das probabilidades. Ela provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos, abrindo portas para se converter à experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores possibilitando assim, a inclusão da experiência humana dos especialistas, os quais controlam os processos, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos.

## **II.2 Premissas do Sistema do Processo Decisório para Realizar a Manutenção**

Toda pesquisa sempre tem dois agentes envolvidos: um sujeito e um objeto. A partir da observação do objeto o sujeito consegue compreender o comportamento daquele objeto, separando-o em variáveis, e o realiza a partir de um método, ou seja, de um plano de pesquisa.

As premissas para a estruturação de um modelo para compreender o objeto deste trabalho, que é o estudo do caso do sistema contínuo de geração de vapor de uma central termoelétrica de refinaria de petróleo, parte da identificação das variáveis que podem ser isoladas e controladas de modo a minimizar o uso dos recursos naturais dentro do sistema. Estas variáveis são identificadas a partir de questionários e uma pesquisa de campo onde se utiliza as técnicas de entrevistas com especialistas da operação do Sistema Termoelétrico, apresentados no Apêndice I, aplicados aos grupos de trabalho de operação da Central Termoelétrica que teve como premissa a compreensão dos fenômenos ligados à decisão de realizar a manutenção dos filtros considerando as abordagens da confiabilidade.

Esta ação, cujo objetivo específico é a operação da estação de tratamento de condensado para que a produção de vapor se realize continuamente e os recursos naturais sejam adequadamente utilizados, é mostrada na figura II.1.

Assim, todo um arcabouço de conhecimento como informação, modelo mental e sistema de manutenção dão apoio à decisão do especialista neste processo decisório.

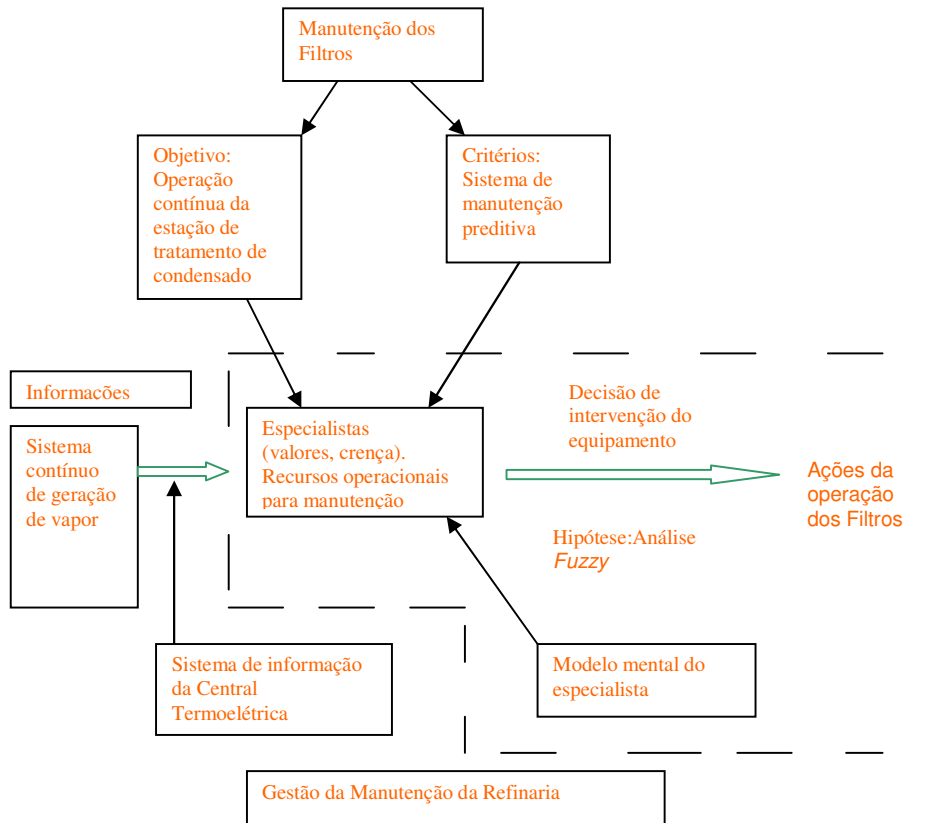


Figura II.1 – Modelo de gestão.

O Modelo de Gestão é dividido em Pessoal e Hardware, cada um com suas respectivas ações. Os pilares: Pessoal e Hardware estão submetidos às mesmas auditorias de confiabilidade, onde utiliza-se a TPM como gestão de manutenção, conforme descrito no capítulo I.

### II.2.1 Confiabilidade Humana das Ações de Operação dos Filtros

A tomada de decisão é uma das atividades intelectuais mais comuns dos seres humanos. Diariamente tomam-se centenas de decisões, desde quando se acorda até o momento em que se dorme.

O especialista ao tomar decisão usa um alto nível de racionalização, utilizando um modelo mental estabelecido para avaliação dos problemas como mostra a figura II.2.

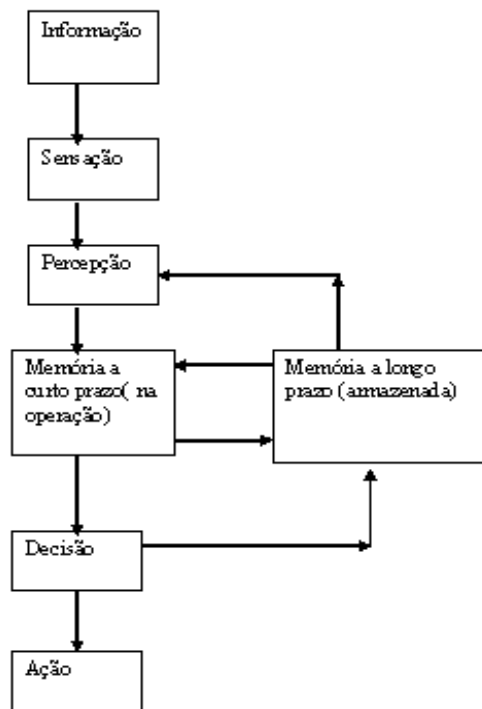


Figura II.2 – Modelo mental do processo decisório (HARRIS, 1992).

#### Análise dos elementos do Modelo Mental do Processo de Decisório.

- Informação: são dados trabalhados a serem utilizados nos processos decisórios.
- Sensação: segundo WITTIG (1981) é o processo através do qual os estímulos são detectados, identificados e medidos. Ele transporta as informações percebidas pelos sentidos.
- Percepção: atenção a eventos que são novidades inesperadas ou mutantes. Esses estilos perceptivos têm importante valor para a sobrevivência, pois nos ajuda a responder a perigos súbitos pela interpretação da informação.
- Memória: WITTIG (1981) Introduziu o conceito de memória como a de Retenção e a de Esquecimento. Para o Autor, o conceito de Retenção corresponde ao armazenamento da aprendizagem durante certo período de tempo que se chama intervalo de retenção. Assim, a memória tanto inclui a retenção como a recuperação. A recuperação corresponde à retirada de resposta do armazenamento. Logo, se o individuo for incapaz de produzir a resposta ao término do intervalo de retenção, ocorre então o esquecimento que vem a ser a incapacidade de recuperar uma informação.

- Segundo LIDA (1998) “a capacidade total da memória humana é estimada em cerca de cem milhões de bits, embora alguns autores dêem cifras que chegam a 43 bilhões de bits”.

Sobre o armazenamento, WITTIG (1981) propõe três tipos: armazenamento sensorial, armazenamento a curto prazo e armazenamento a longo prazo.

- Armazenamento sensorial: dura somente um curto período de tempo. Os itens são mantidos em uma forma sensorial antes de serem categorizados ou interpretados. Esta retenção memorial pode variar de centésimos de segundos até diversos segundos. A teoria propõe que as informações ou são processados a partir do armazenamento sensoriais em armazenamentos a curto ou a longo prazo, ou então são perdidos ou descartados.
- Armazenamento de curto prazo: dura de 1 a 30 segundos depois da exposição a um item de estímulo. É um passo além do armazenamento sensorial não processado, mas se não ocorrer o processamento anterior, o material será perdido ou descartado. Segundo LIDA (1990) “a capacidade média de retenção é de 7 itens não relacionados entre si..
- Armazenamento de longo prazo: ocorre quando os materiais no armazenamento sensorial, ou a curto prazo, são processados, ensaiados ou codificados ou de algum modo tratados para retenção durante um período de mais de 30 segundos. Os sistemas a curto e a longo prazo comunicam-se continuamente entre si.
- Decisão: os processos de tomada de decisões estão no nosso dia-a-dia. Desde que acordamos até ao adormecermos estamos em constantes processos decisórios. A responsabilidade por decisões específicas determina a natureza dos cargos, a estrutura de poder e a hierarquia, as relações com os colegas, chefes e subordinados, a influência de uma pessoa sobre a outra. Assim, há um grande modelo que possibilita as pessoas e grupos a serem mais eficientes em suas tomadas de decisão.
- Ação: atuação humana.



## II.2.2 Fluxo do Processo Decisório da Ação de Intervenção no Equipamento

O Especialista mesmo submetido às tensões internas ou externas ao seu ambiente procura obter através do seu conhecimento, o momento ideal para realizar a manutenção dos filtros. O processo decisório para realização da Manutenção dos filtros segue o modo apresentado na figura II. 3.

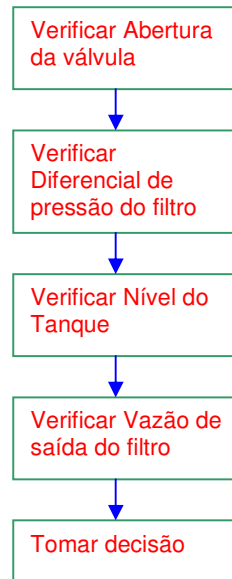


Figura II.3 – Fluxo do processo.

Neste trabalho a avaliação do nível de importância das variáveis operacionais (abertura da válvula, diferencial de pressão do filtro, nível do tanque e vazão de saída) é realizada segundo um estudo estatístico, pelo método de Pareto, onde se identifica a existência de elementos críticos. A eles deve-se reservar total atenção.

Usa-se assim um modelo gráfico que os classifica em ordem decrescente de importância, a partir da esquerda (BUSSAB E MORETTIN, 1993).

Entretanto, quando se trata de uma decisão que envolve um nível de confiabilidade maior, citados no capítulo I, onde o especialista depende unicamente do seu conhecimento tácito, há necessidade de apoiar-se em estruturas que representem o problema segundo um determinado foco e de acordo com as informações operacionais disponíveis e/ou coletadas, como mostra a figura II.4.

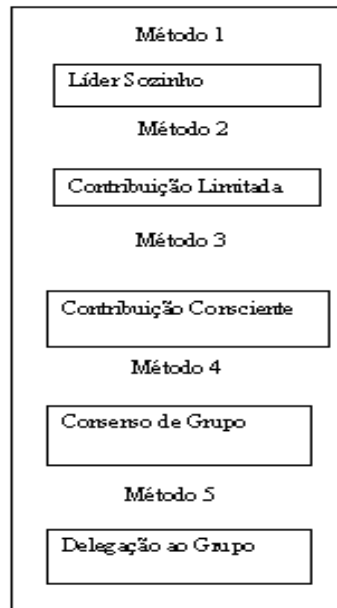


Figura II.4 – Modelo de tomada de decisão com cinco pontos de Tannenbaum e Schmidt (RYAN, D.K & OESTREICH, D.K , 1993).

Neste modelo há cinco pontos ou métodos pelos quais as pessoas ou líderes são responsáveis por assegurar que as decisões possam ser tomadas.

- Método 1: o líder toma as decisões sozinho.
- Método 2: o líder toma as decisões com contribuições limitadas, sendo estas informais e não planejadas.
- Método 3: o líder toma as decisões com contribuições conscientes projetadas e neste caso ele montará um plano reunindo várias opiniões de especialistas, valores e experiências
- Método 4: o líder e o grupo tomam as decisões colaborativas e desta forma, o grupo opera a partir de um modelo de consenso, no qual os membros trabalham juntos para que as decisões sejam aceitas para todos.
- Método 5: o líder delega poderes para que outros da sua equipe tomem as decisões.

A tomada de decisão para realizar a manutenção dos filtros, mostrado na figura II.5, está submetida a tensões geradas por emergências operacionais, fadigas, problemas relacionados a identidade e comportamento, citados no capítulo I, o que representa perdas ao processo decisório da manutenção dos filtros.

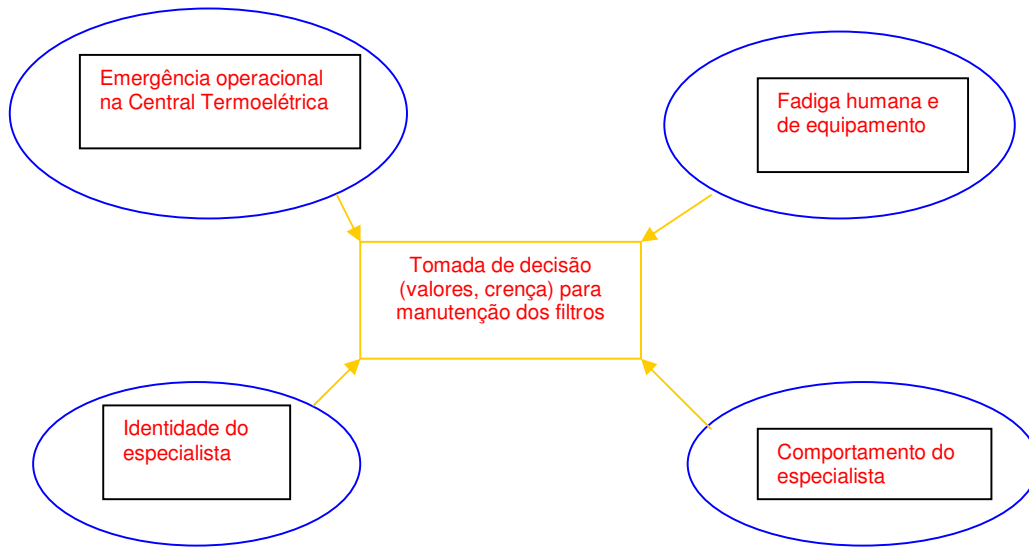


Figura II.5 – Tomada de decisão para manutenção dos filtros de celulose.

### II.3 Modelo Conceitual do Processo Decisório de Manutenção *Fuzzy*

A hipótese considerada para a busca da confiabilidade operacional baseia-se nos conceitos da Manutenção Preditiva, o que leva em grande consideração o aspecto econômico da parada de uma máquina ou equipamento para executar serviços de manutenção preventiva, quando o mesmo ainda apresenta condições boas de operação. O que é um procedimento contra-producente e não deveria ser efetuado. Assim como, também deve ser evitado esperar que a máquina falhe para então repará-la, o que é prejudicial a confiabilidade do sistema.

Neste trabalho propõe-se o uso da lógica *Fuzzy* com objetivo preditivo da manutenção dos filtros de celulose em uma Refinaria de Petróleo, conforme demonstrado na figura II.8.

Consiste em utilizar o modelo mental decisório descrito na figura II.2, onde a informação é armazenada nas formas de memória de curta duração ou de longa duração, até a ação, passando pela decisão, formulação do problema e delineamento do cenário, mostrado na figura II.1, ampliando o módulo decisório segundo o modelo modificado de Tannenbaum e Schimidt mostrado na figura III.4 e no que se refere ao método 3 (Contribuição Consciente) para utilizar a lógica *Fuzzy* conforme a hipótese considerada, pois trata de informações de especialista. Com isso tem-se um processo decisório dinâmico apoiado na teoria dos conjuntos *Fuzzy* que preconiza a ação de uma agente racional com boa interação Homem-máquina, atenuando os fatores que diariamente geram tensões conflitantes nos especialistas, tornando mais confiável o processo de manutenção dos filtros.

Em geral um sistema *Fuzzy* faz corresponder a cada entrada *Fuzzy* uma saída *Fuzzy*. No entanto, espera-se que a cada entrada crisp (um número real, ou par de números reais, ou n-upla de números reais) faça corresponder uma saída crisp. Neste caso, um sistema *Fuzzy* é uma função de  $R^n$  em  $R$  construída de alguma maneira específica. Os módulos que seguem indicam a metodologia para a construção desta função:

- a) Módulo de *Fuzzificação*: é o que modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos *Fuzzy*. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos lingüísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo lingüístico, deve ser associado um conjunto *Fuzzy* por uma função de pertinência, que será detalhada no capítulo III.

A função de pertinência usada no estudo de caso é a Trapezoidal, seguindo o modelo da figura II.6.

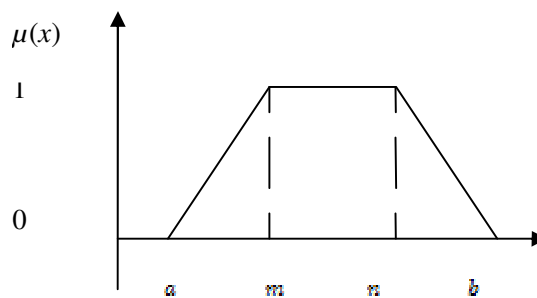


Figura II.6 – Função Trapezoidal.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{Se } x < a \\ (x-a)/(m-a), & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ (b-x)/(b-n), & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

b) Módulo da base de regras: é o que constitui o núcleo do sistema. É neste módulo onde “se guardam” as variáveis e suas classificações lingüísticas.

Base de regras na entrada (Fuzzyficador)

$$R A \cap B \cap C \cap D = \mu A(x) \cap \mu B(x) \cap \mu C(x) \cap \mu D(x) = \min \mu_i(x) \quad (II.2)$$

c) Módulo de inferência: é onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *Fuzzy* que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema *Fuzzy*, já que ele fornecerá a saída (controle) *Fuzzy* a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada *Fuzzy*.

Regras de inferência *Fuzzy*

Foram utilizadas as inferências pelo antecedente conforme apresentado na Tabela III.6 – Regras de Inferência *Fuzzy*, do capítulo III.

Módulo de Defuzzificação

Módulo de Defuzzificação: traduz o estado da variável de saída *Fuzzy* para um valor numérico.

O modo de Defuzzificação default é através do Método do CENTRÓIDE, o que foi utilizado para este sistema.

Interpretação dos resultados

Os valores da Variável de Saída proporcionarão um número preciso que indicará ao Operador do processo as seguintes ações de Manutenção:

- F = pouco sujo → não realize manutenção no processo, isto é, não faça solução de celulose;
- F= limpo → realize manutenção preditiva no processo, isto é, não faça solução de celulose, mas tome uma medida antecipativa, como cada unidade, fazer uma inspeção mais criteriosa no seu processo;
- F= muito sujo → realize manutenção corretiva no processo, isto é, faça solução de celulose.

Utilizou-se o Método de Mamdani na etapa de inferência devido à simplicidade e eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana (AMENDOLA, 2005).

O método Mandani, combina graus de pertinência referentes a cada um dos valores de entrada através do operador mínimo e agrega as regras através do operador máximo. Formalmente a relação *Fuzzy M* é o subconjunto *Fuzzy X ∈ U* cuja função de pertinência é dada por:

$$\varphi M(x, U) = \max_{1 \leq j \leq n} \{ \min [ \varphi A_j(x), \varphi B_j(U) ] \} \quad (II.3)$$

O Método do centro de gravidade (*centroid*) foi utilizado na etapa de Defuzzificação.

O Método de interseção Mínimo, ou seja, o grau de pertinência do conjunto de saída da regra ativada será obtido pelo mínimo grau de pertinência de seus antecedentes.

O conectivo “e” *será* usado, pois se trabalha com variáveis em diferentes universos enquanto que o conectivo “ou” conecta valores lingüísticos de uma mesma variável.

O operador “se... então” é também conhecido como declaração condicional *Fuzzy* e descreve a dependência do valor de uma variável lingüística em relação ao *valor* de outra.

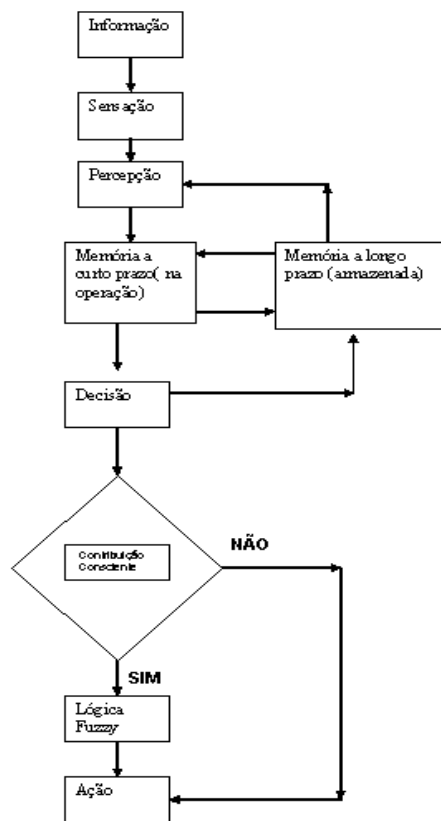


Figura II.7 – Modelo mental do processo decisório modificado (HARRIS, 1992).

#### II.4 Simulação Computacional do Plano de Ação de Intervenção no Equipamento

A proposta de ação para utilização do modelo conceitual usando a teoria *Fuzzy* para o aumento da confiabilidade no processo decisório de manutenção dos filtros de celulose referida

neste capítulo deve ser implementada seguindo um plano de ação de intervenção nos equipamentos.

Foi utilizado o simulador do *MATLAB 6.5*. O *MATLAB* é um ambiente de computação científica que permite a interação com o usuário através de uma janela, denotada por Janela de Comando, onde os comandos devem ser fornecidos pelos usuários para que os cálculos e resultados realizados através da linguagem *FORTRAN* sejam exibidos. O usuário pode criar sistemas usando ferramentas gráficas ou funções de comando-linha, ou gerá-los automaticamente usando também agrupamento ou técnicas adaptáveis de neuro-*Fuzzy*. Se o usuário tiver acesso ao Simulink, ambiente de simulação do *MATLAB* poderá testar seu sistema *Fuzzy* facilmente em um diagrama de bloco.

A caixa de ferramentas também o deixa executar seu próprio programa C diretamente sem a necessidade para o Simulink. Isto é tornado possível por permanecer só a máquina de inferência *Fuzzy* que lê os sistemas *Fuzzy* economizado de uma sessão de *MATLAB*.

Pode-se personalizar a máquina somente para construir inferência *Fuzzy* em seu próprio código. Todo código provido é o ANSI complacente Figura II.8

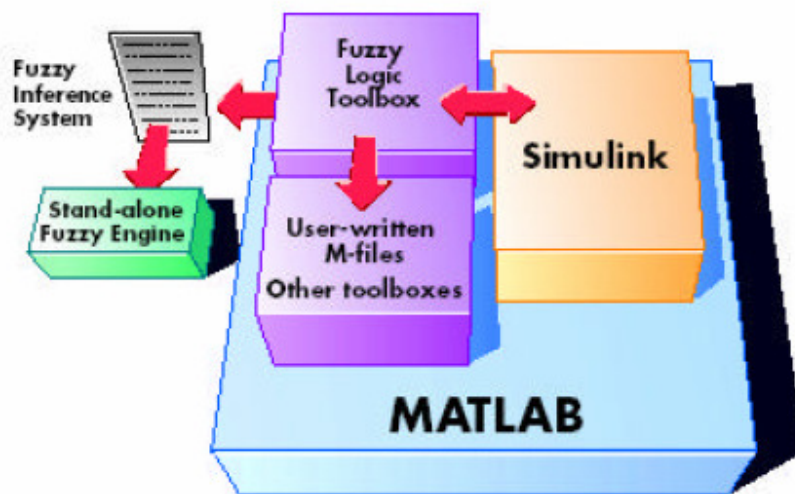


Figura II.8 – Ferramenta Computacional de Simulação *Fuzzy logic Toolbox for use with MATLAB* (1995).

### CAPÍTULO III

#### ESTUDO DE CASO NA REFINARIA DUQUE DE CAXIAS

### III.1 Descrição do Cenário

O fenômeno ocorre na central termoeletrica da REDUC. A Refinaria Duque de Caxias é uma Unidade de Negócio da Petrobrás. A Petrobras possui 14 unidades de negócios em território nacional, como mostra na figura III. 1.

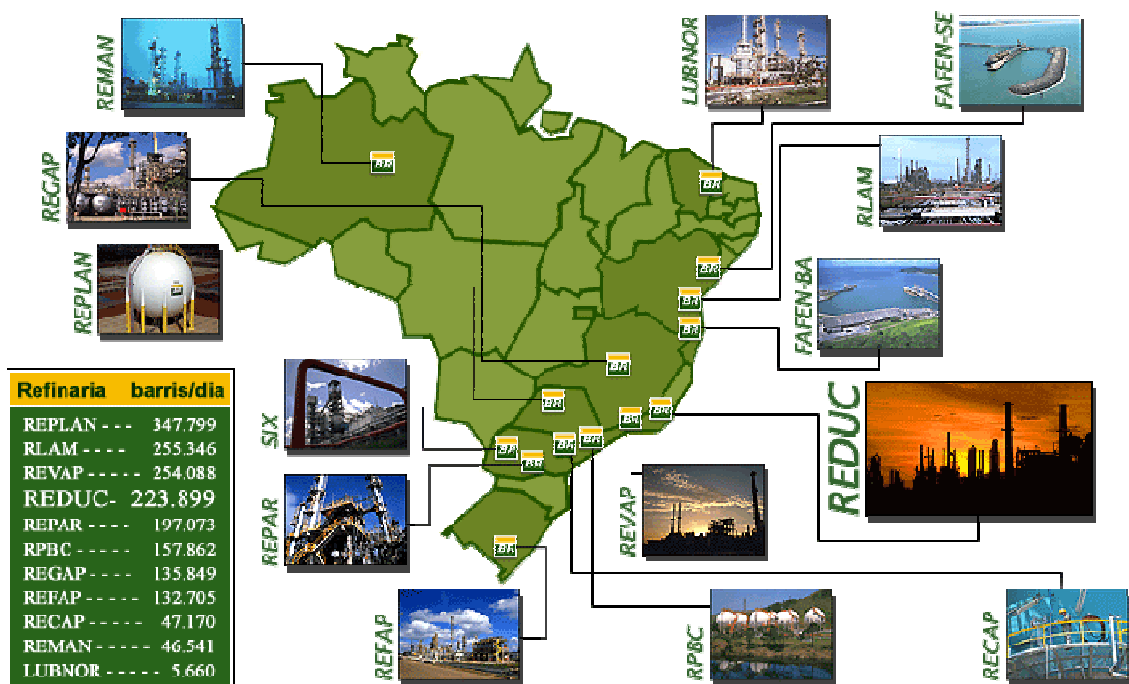


Figura III.1 – Distribuição das unidades de negócios pelo território nacional (REDUC, 2005).

A REDUC possui as seguintes características:

- 35 unidades de processamento, nas quais são produzidos mais de 55 produtos;
- Duas centrais termoeletricas com capacidade instalada de 1180 t/h de vapor e 62,5 MW;
- Demanda típica: 930 t/h de vapor e 67 MW num sistema elétrico configurado em ilhas.

A figura III.2 mostra o organograma da REDUC.



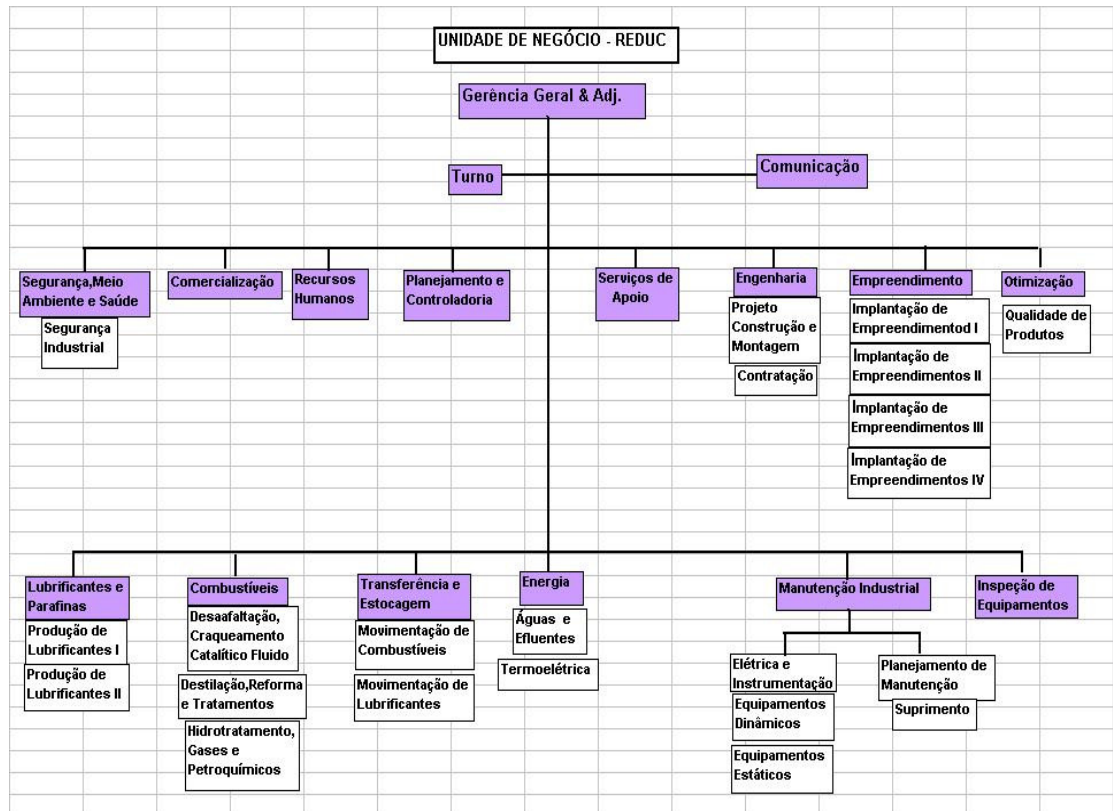


Figura III.2 – Organograma da REDUC (REDUC, 2005).

#### Modelo de Gestão de Confiabilidade da REDUC.

- O Modelo de Gestão é dividido em: Pessoal e Hardware, cada um com suas respectivas ações. Os pilares: Pessoal e Hardware estão submetidos às mesmas auditorias de confiabilidade. A gestão de manutenção TPM está inserida nos dois pilares, contribuindo assim com o aumento da confiabilidade. A figura III. 3 mostra o modelo de gestão da confiabilidade.

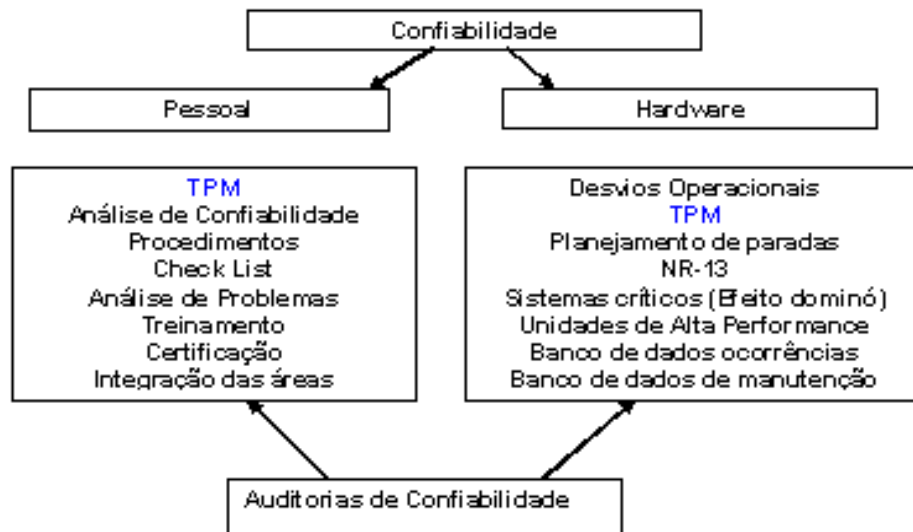


Figura III.3 – Modelo de gestão da confiabilidade (REDUC, 2005).

#### A Central Termoelétrica

Dentre os processos produtivos da REDUC, destaca-se a Central de Geração e Distribuição Termoelétrica, do qual depende todo o processo produtivo e por isso, especial atenção deve ser dada a este setor para manter seu bom funcionamento.

O processo de geração de vapor atua na: mão de obra, máquinas e métodos.

- Na mão de obras preconiza que os especialistas devem ser capacitados e periodicamente avaliados nas atividades críticas.
- Nas máquinas, atua nos equipamentos, acessórios e instrumentos críticos onde devem ter controlado seus planos de manutenção e o estoque de seus principais componentes.
- No método as atividades críticas devem ser realizadas com uso de procedimentos e utilizar a Verificação de Conformidade dos Procedimentos – VCP

O processo de geração de vapor tem como objetivo uma visão holística baseada em princípios como:

- Preservação da SMS (Saúde, Meio Ambiente e Segurança).
- Confiabilidade.
- Qualidade do Produto.
- Otimização da Energia Utilizada.
- Responsabilidade Social.

Este setor é responsável pela geração de vapor e energia elétrica que abastece toda a refinaria. Para a geração de vapor, as caldeiras utilizam água captada da Barragem de Saracuruna, que é previamente tratada já na refinaria.

Na Central termoelétrica, o vapor gerado é distribuído aos processos de produção, que aproveitam a sua capacidade térmica e sua energia cinética para a produção dos derivados de petróleo. Como nada é perfeito, as perdas que ocorrem no vapor depois que realizou o trabalho requerido incorre na perda de parte de sua energia, o que o transforma novamente em água e que agora passa a ser chamado de Condensado.

Para diminuir o uso dos recursos naturais neste processo, o condensado volta ao circuito de água de alimentação das caldeiras, mas para isso, deve estar livre de impurezas perigosas ao processo de geração de vapor. A figura III.4 Exemplifica o modelo do sistema de geração de vapor.

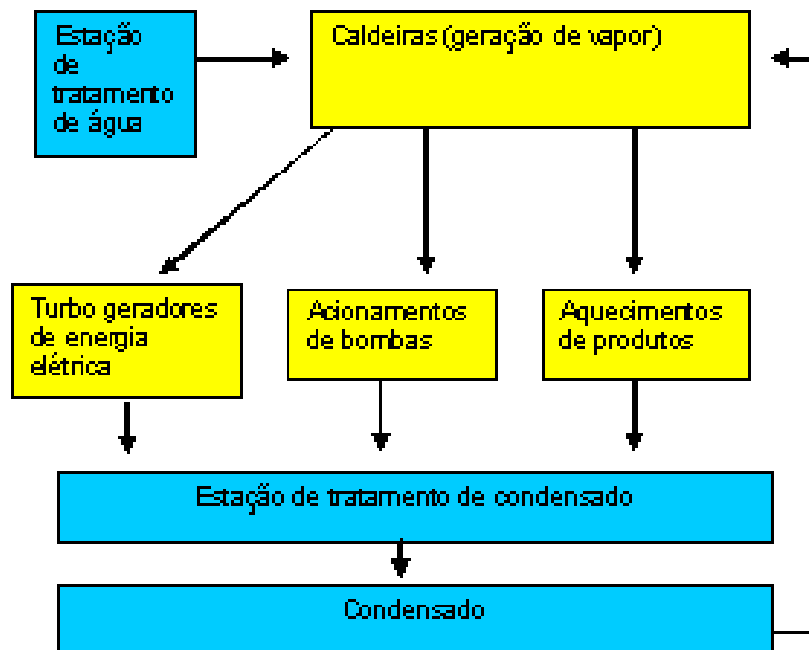


Figura III.4 – Modelo do sistema de geração de vapor.

### III.2 Objetivo e Local de Estudo

Na Unidade Operacional U-1320, da Central Termoelétrica da REDUC existe um processo, denominado Estação de Tratamento de Condensado – ETC, que realiza o tratamento de todo o condensado descrito.

Como o vapor realizou trabalho em equipamentos como trocadores de calor, turbinas e aquecedores, o condensado produzido chega à ETC contaminado por impurezas como óleo, graxa e partículas sólidas, o que o torna impróprio para ser reutilizado nas caldeiras.

Na ETC, o condensado é acumulado no vaso D1240 e succionado pela bomba de condensado P 1244 para deslocá-lo até o filtro D 1239. Uma válvula reguladora controla a vazão do fluxo de condensado ao filtro e faz o controle de nível do vaso D1240.

O filtro D1239 é um vaso composto de células metálicas recobertas com celulose, como mostrada a figura explicativa III.5.

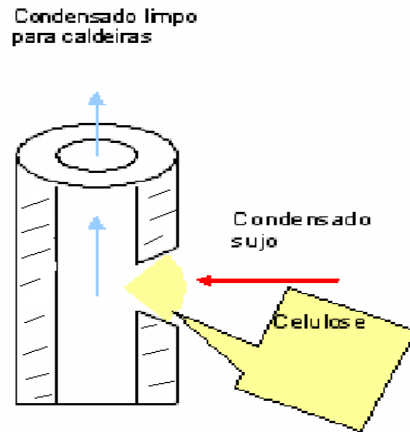


Figura III.5 – Filtro D 1239.

A celulose constitui efetivamente o material filtrante onde as impurezas contidas no condensado ficam agregadas e permite que o condensado saia limpo para ser reutilizado na caldeira, melhorando o ciclo térmico e contribuindo para o reuso do recurso natural.

Em determinado momento as impurezas saturam a celulose e esta deve ser trocada.

O processo de troca consiste em:

- isolar o D 1239, drenar o condensado contaminado e retirar a celulose impregnada;
- preparar uma solução de água e material de celulose floculada num tanque conectado em paralelo com o filtro;
- injetar a solução de celulose no filtro D1239 para recompor o material filtrante nas peças metálicas.

Este processo leva uma média de 40min a 60min e, para a decisão de realizar a troca da celulose, o especialista leva em consideração algumas restrições como: o nível do D1240, a abertura da válvula reguladora, o diferencial de pressão entre a entrada e a saída de condensado no filtro e a vazão de saída do condensado limpo. A figura III.6 exemplifica o Modelo do Processo da Filtração.

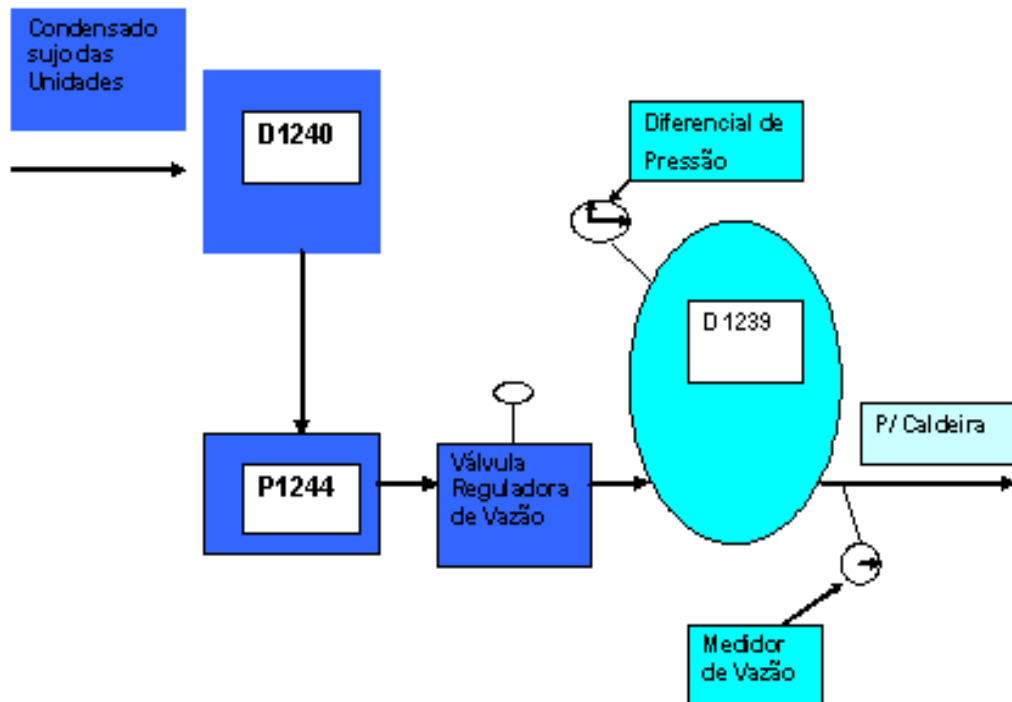


Figura III.6 – Modelo do processo da filtração.

### III.3 Análise Estatística Para Seleção das Variáveis do Processo de Filtragem

Iniciamos o estudo de caso, com análise estatística dos componentes do sistema de filtragem do condensado. Esta análise tem como foco o estudo dos elementos principais do sistema, a fim de conhecer intrinsecamente cada elemento, verificar sua correlação e propor uma estratégia de manutenção otimizada.

Para Análise do Sistema de Filtragem, foi feita uma pesquisa, com 10 operadores do sistema. Foi perguntado qual elemento do sistema, neste caso, a estação de tratamento de condensado, tinha maior importância para um futuro estudo a fim de aumentar a Confiabilidade. Os resultados constam na tabela III.1

Tabela III.1 – Resultados da análise do sistema de filtragem.

COMPONENTES	PERCENTUAIS
Filtro( F)	40%
Tanque(T)	30%
Bomba(B)	10%
Válvula controladora (VC)	10%
Sistema de retorno de condensado (SRC)	10%

Neste trabalho adotou-se o Diagrama de Pareto como ferramenta estatística para a análise e tratamentos dos dados. O diagrama consiste em gráficos de barras verticais que permitem classificar e priorizar problemas em duas categorias: “Pouco vitais” e “Muito triviais”.

O princípio de Pareto, também conhecido como “Lei 20/80” pode ser detalhado nas mais variadas formas. Dentre elas, podem ser citadas:

“20%do tempo gasto com itens importantes é responsável por 80%dos resultados”;

“20% dos defeitos são responsáveis por 80% das reclamações”; e ainda,

“20% das causas de não-conformidades são responsáveis por 80% do volume de retrabalhos”.

Resumidamente, pode-se dizer que se os sistemas ou causas de problemas ou de algum outro efeito são identificados e registrados, é possível determinar que porcentagem pode ser atribuída a cada uma das causas. Em linhas gerais, o que o Diagrama de Pareto sugere é que existem elementos críticos e a eles deve-se prestar total atenção. Usa-se, assim, um modelo gráfico que os classifica em ordem decrescente de importância, a partir da esquerda (BUSSAB e MORETTIN, 1993)

Assim, analisaremos o filtro e o tanque usando Pareto, utilizando a seqüência do maior percentual para o menor, como mostra a figura III.7.

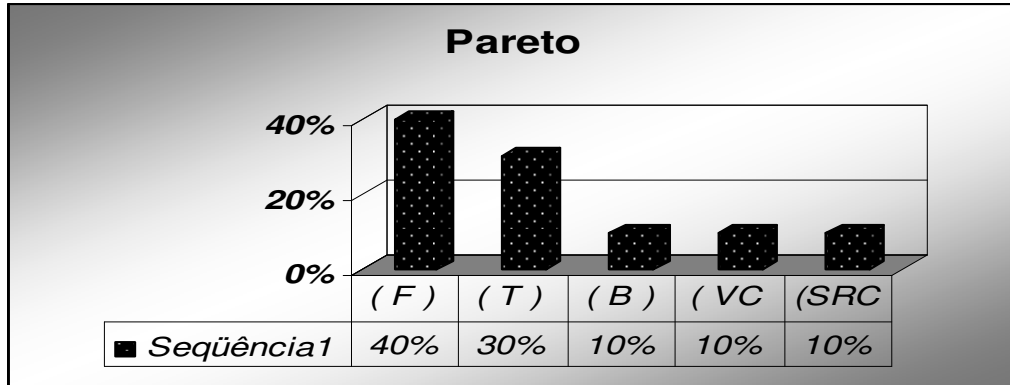


Figura III.7– Gráfico de Pareto do sistema de filtragem.

Diante do resultado obtido, procurou-se analisar estatisticamente a vazão e o nível. Assim, por 8 dias foram colhidas amostras da vazão do filtro e nível do tanque. Essas amostras foram tiradas do mesmo ponto a cada hora. Esses dados foram fornecidos pelo *Plant Information(PI)* Um sistema de coleta de dados on line.

Ao todo foram 193 amostras. As tabelas III.2 e III.3, mostram respectivamente os resultados das amostragens das vazões do condensado do filtro D1239.

Tabela III.2 – Vazão de condensado.

Soma das amostras	10640
Média	55,13
Desvio Padrão	6,8
Amplitude	39
Números de classes K	9
Quantidade de classes	5

Tabela III.3 – Classes e freqüências.

CLASSES	F. abs	F. Ac. Ab	F. Ac. Ac
38 ─ 42	2	2	193
42 ─ 46	7	9	191
46 ─ 50	38	47	184
50 ─ 54	38	85	146
54 ─ 58	31	116	108
58 ─ 62	47	163	77
62 ─ 66	19	182	30
66 ─ 70	7	189	11
70 ─ 77	4	193	4
Total	193		

O Coeficiente de Variação foi 12,30%, a Moda foi 60m<sup>3</sup>(Gzube) e a Mediana 55,8m<sup>3</sup>

Histograma da vazão de condensado conforme mostrado na figura III.8.

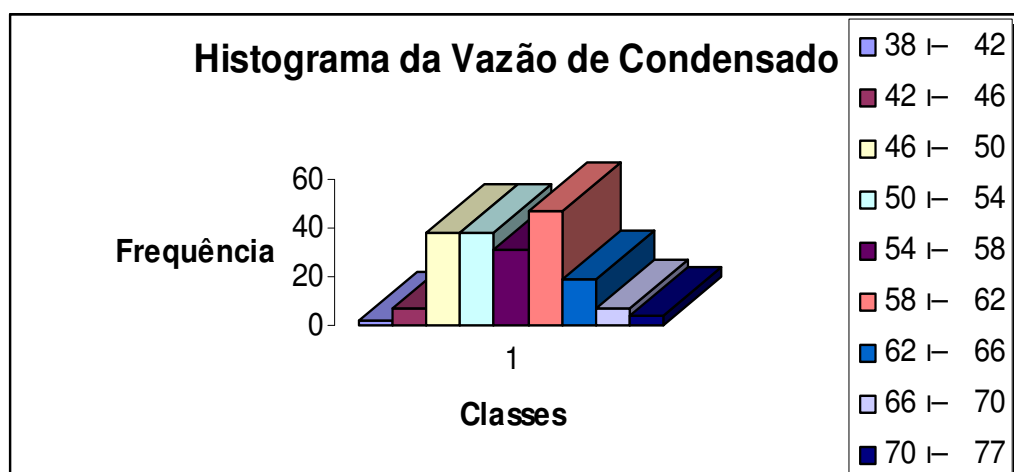


Figura III.8 – Histograma da vazão de condensado.

As tabelas III.4 e III.5, mostram respectivamente os resultados das amostragens dos níveis do tanque D 1240.

Tabela III.4 – Nível do tanque.

Soma das amostras	12076
Média	62,6
Desvio Padrão	17
Amplitude	65
Números de classes K	9
Quantidade de classes	8

Tabela III.5 – Classes e freqüências.

Classes	F. abs	F. Ac. Ab	F. Ac. Ac
30  – 38	8	8	193
38  – 46	16	24	185
46  – 54	43	67	169
54  – 62	42	109	126
62  – 70	28	137	84
70  – 78	14	151	56
78  – 86	14	165	42
86  – 95	28	193	28
Total	193		

O Coeficiente de Variação foi 27,15% a Moda foi 57,7m<sup>3</sup>(Czube) e a Mediana 59.6m<sup>3</sup>.

Histograma do nível do tanque conforme mostrado na figura III.9.

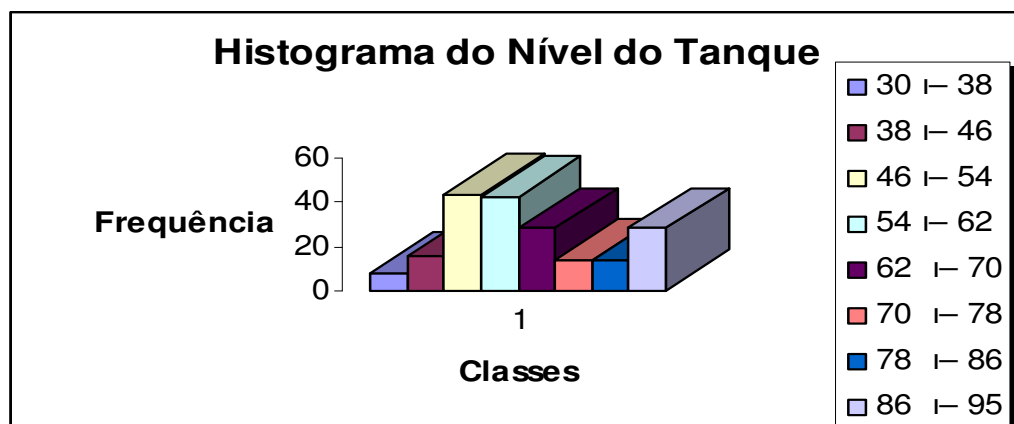


Figura III.9 – Histograma do nível do tanque.



A tabela III.6, mostra às variáveis relacionadas ao cálculo do coeficiente de correlação e o resultado obtido.

Tabela III.6 – Resultados dos cálculos.

VARIÁVEIS	VALORES
XY	669990
X <sup>2</sup>	809758
Y <sup>2</sup>	595658
Sxy	4204,037997
Syy	9005,808866
Sxx	54163,3057
R	19%

### Resultados

Análise dos Filtros: apesar de está em funcionamento à mais de 40 anos, ainda apresenta uma boa confiabilidade. Com uma dispersão de 12%, continua trabalhando com boa vazão, atendendo ao sistema com 2 sigmas ou 95%. Como sugestão para aumentar a média, seria ou inovar com um sistema mais eficiente, ou otimizar as intervenções de manutenção.

Análise do Nível; com um coeficiente de variação de 27%, e uma média de 62%, o nível normal de operação está trabalhando com apenas 1 sigma. Este nível sofre influencia de perda de carga nos filtros devido a sujidade do mesmo e correntes de condensado das outras unidades de processo. Não existe correlação entre as variáveis estudadas, pois o coeficiente entre as variáveis está na faixa de 19%. Assim, podemos concentrar os esforços para melhorar o processo decisório para ser realizar a manutenção dos filtros, pois este processo leva em consideração o conhecimento tácito de cada operador. Nisto o uso da lógica *Fuzzy* torna-se uma ferramenta de grande utilidade para o aumento da confiabilidade. Uma sinergia com as outras unidades de processo e o acompanhamento de paradas por vazamento, seria também uma boa estratégia, para aumentar a média do nível de trabalho dos tanques e com isso a vazão de condensado tornando o processo mais eficiente e produtivo.

### **III.4 Aplicação da Lógica *Fuzzy* Para Aumento da Confiabilidade nas Ações de Manutenção dos Filtros**

Este trabalho visa melhorar o processo decisório de manutenção corretiva num sistema de tratamento de condensado da Unidade de Geração de Energia da Refinaria Duque de Caxias, através da proposta de se utilizar a lógica *Fuzzy* para se determinar o melhor momento de realização da limpeza dos filtros que são utilizados para retirar as impurezas contidas nos condensados resultantes dos trabalhos realizados pelo vapor produzido nas caldeiras da central termoeletrica. Com o uso desta ferramenta, pretende-se promover uma melhor interação homem-máquina.

No procedimento atual, o operador deste processo realiza a manutenção e, a escolha do melhor momento é baseada na sua própria experiência profissional, aliada aos dados do fabricante e ao conhecimento dos especialistas de manutenção.

Com esta proposta, espera-se determinar faixas ideais em torno de valores ideais de determinadas variáveis, para se decidir sobre o momento de manutenção, relacionando-se outras variáveis deste processo que são fatores importantes na decisão final. Aumentando a confiabilidade operacional.

#### **III.4.1 Plano de Ação**

A técnica consiste em buscar através de entrevistas com os operadores e especialistas, dados para a determinação dos conjuntos *Fuzzy*, seus valores, suporte, domínio e formação dos conjuntos de grau de pertinência para se montar a lógica proposicional e construir o sistema *Fuzzy* que terá como saída um valor numérico que será interpretado de acordo com o seu valor *Fuzzy* de saída, o qual constituirá o melhor momento para a limpeza do filtro, pois o processo físico ou *hard*, atual para tomada de decisão gera tensões ao especialista, pois o cenário em que convive é composto por variáveis que ao longo do processo geram erros, assim, há uma busca árdua pelo especialista em manter as variáveis sob controle. Além das tensões físicas, existem as tensões internas, inerentes a: identidade, ao comportamento ao omoral do especialista, o qual contribui sensivelmente na tomada de decisão. O somatório dessas tensões tem contribuído para que o mesmo trabalhe em um ambiente hostil, levando a erros de avaliação, acidentes e falta de concentração.

Todo o sistema é experimentalmente simulado no *Fuzzy tool box* do *MATLAB 6.5* onde se permite inserir as regras de lógica *Fuzzy* a qual criamos para cada sistema acima.

No *MATLAB* utiliza-se o *Simulink* para se elaborar o diagrama em blocos de cada sistema, onde estes diagramas nos darão as formas de ondas desejadas. Estes gráficos serão geradas a partir das regras criadas.

Esta proposta é perfeitamente exeqüível, pois este sistema é de uma dinâmica lenta e os dados de entrada podem ser acompanhados *on line* através de software específico e alimentar os conjuntos de entrada para o sistema *Fuzzy*. Caberia a gerencia do setor, investir na conclusão da automação deste processo e num *software* de utilização de lógica *Fuzzy* que faça comunicação com o software de automação para aquisição dos dados de entrada, além de manter um sistema supervisorio de controle para o operador.

Embora já exista um valor numérico ideal de cada variável sugerido pelo fabricante para se realizar esta troca, os especialistas indicam o melhor tempo dentro de uma faixa em torno deste valor e cada um deles age considerando mais ou menos cada uma das restrições acima. Nem sempre o sucesso é alcançado e algumas vezes, embora tenha havido sucesso, gera-se a dúvida se aquele foi realmente o melhor momento para a troca da celulose.

Assim, nota-se neste processo decisório algumas incertezas inerentes a cada especialista. Tais incertezas podem ser agrupadas e aplicadas a lógica *Fuzzy*, para que seja determinada uma situação mais precisa, de forma a maximizar o processo de filtragem e minimizar a utilização da celulose.

### III.4.2 Projeto do Sistema de Diagnóstico de Manutenção *Fuzzy* para o Processo de Tratamento de Condensado

#### a) Conjuntos Nebulosos

##### a.1) Variáveis de entrada :

Abertura da Válvula (A);

$\mu A(x) \rightarrow$  Tem domínio de 0 a 100%.

Diferencial de Pressão (B);

$\mu B(x) \rightarrow$  Tem domínio de 0 a  $2,4 \text{kgf/cm}^2$ .

Nível do Tanque (C);

$\mu C(x) \rightarrow$  Tem domínio de 0 a 100%.

Vazão de Saída do Filtro (D);

$\mu D(x) \rightarrow$  Tem domínio de 0 a 100%.

##### a.1.1 Valores das Variáveis de Entrada:

- A = {pouco aberta, normal, muito aberta}.
- B = {pequeno, normal, grande}.

- $C = \{\text{baixo, normal, alto}\}$ .
- $D = \{\text{baixa, normal, alta}\}$ .

a.2) Variável de Saída:

Condições do Filtro (F);

$\mu_R(x) \rightarrow$  Tem domínio de 0 a 100%.

a.2.1) Valores das Variáveis de Saída;

- $F = \{\text{pouco sujo, normal ou aceitável, muito sujo}\}$ .

b) Relações *Fuzzy* na Entrada (Fuzzificador):

$$RA \cap B \cap C \cap D = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) \cap \mu_C(x) \cap \mu_D(x) = \min \mu_i(x) \quad (\text{III.1})$$

c) Formato dos Conjuntos

Para todas as variáveis (entrada e saída) foram escolhidos formato trapezoidal.

Para os conjuntos *Fuzzy*, no formato trapezoidal os especialistas consideram uma faixa bem definida em que todos concordam que tenha grau de pertinência 1 e nas proximidades do primeiro e último valor ocorre uma faixa de incerteza na atuação do processo. As figuras: III.10, III.11, III.12 e III.13, mostram respectivamente as entradas: abertura da válvula, diferencial de pressão, nível do tanque e vazão de saída do filtro. A figura III.14, mostra a variável de saída: condições do filtro.

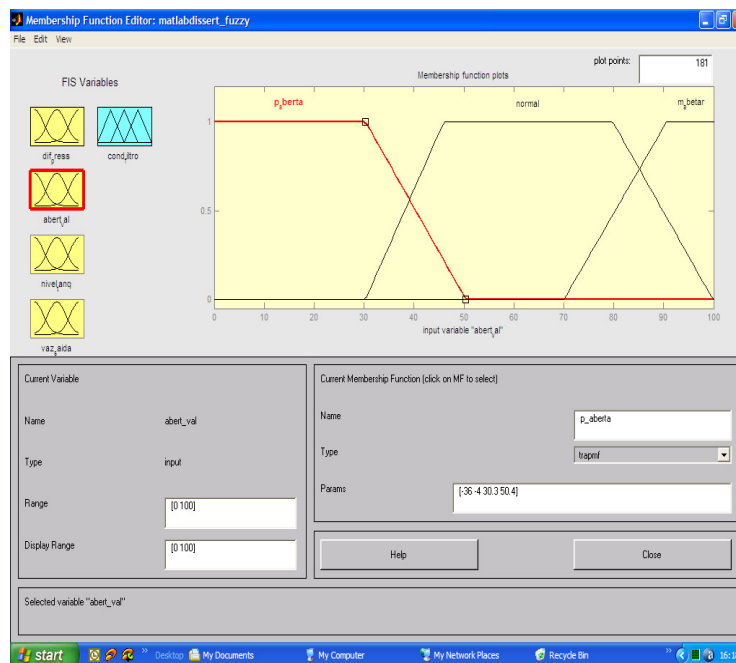


Figura III.10 – Abertura da válvula.

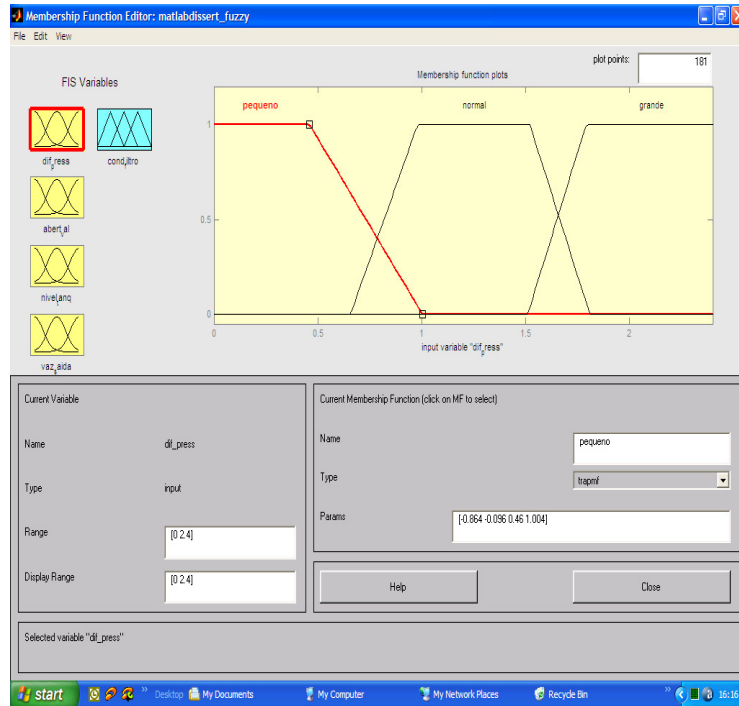


Figura III.11 – Diferencial de pressão.

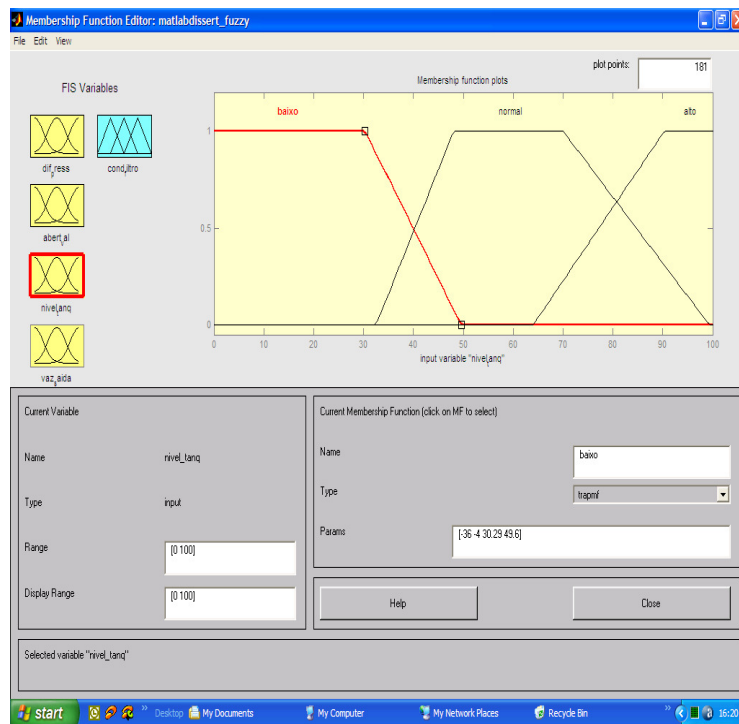


Figura III.12 – Nível do tanque.

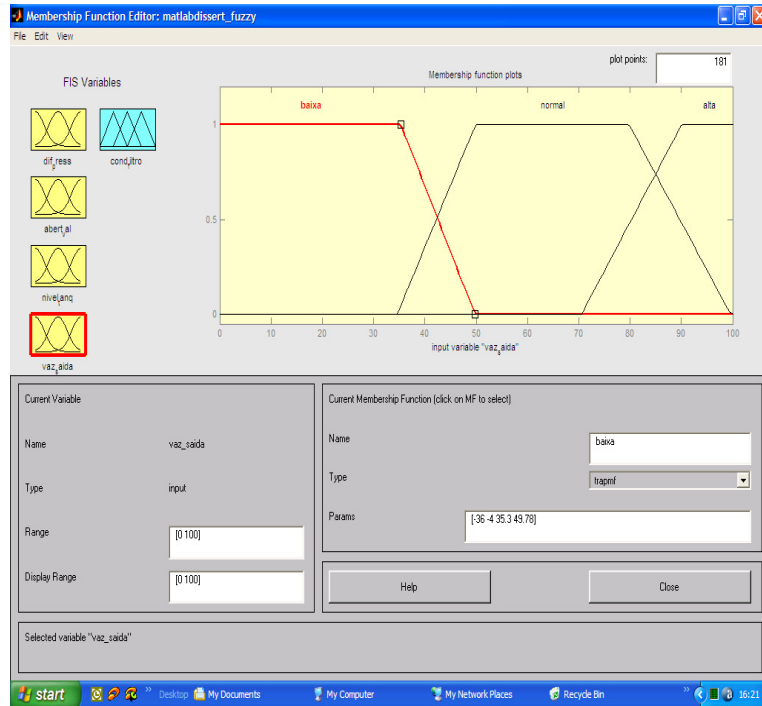


Figura III.13 – Vazão de saída do filtro.

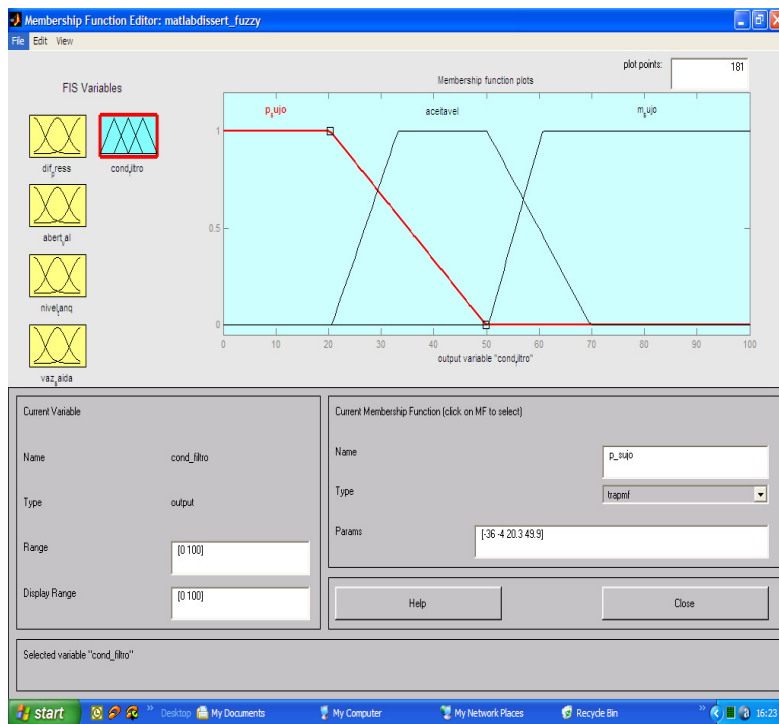


Figura III.14 – Condições do filtro.

### III.5 Regras de Inferência *Fuzzy*

#### Inferência pelo Antecedente

As regras que tornam o sistema eficiente e preciso são as seguintes:

- 1 – Se vz é alta então condições do filtro é pouco sujo;
- 2 – Se vz é normal então condições do filtro é normal;
- 3 – Se df é pequeno então condições do filtro é pouco sujo;
- 4 – Se df é normal então condições do filtro é normal;
- 5 – Se vz é baixa e df é alta e ntq é baixo então condições do filtro é normal;
- 6 – Se vz é baixa e df é alto e ntq é normal e av é pouco aberta então condições do filtro é normal;
- 7 – Se vz é baixa e df é alto e ntq é normal e av é normal então condições do filtro é Muito sujo;
- 8 – Se vz é baixa e df é alto e ntq é normal e av é muito aberta então condições do filtro é Muito sujo;
- 9 – Se vz é baixa e df é alto e ntq é muito alta e av é pouco aberta então condições do filtro é normal;
- 10 – Se vz é baixa e df é alto e ntq é muito alto e av é normal então condições do filtro é Muito sujo;
- 11 – Se vz é baixa e df é alto e ntq é muito alto e av é muito aberta então condições do filtro é Muito sujo.

onde,

av (entrada A)= abertura da válvula.

df (entrada B)= diferencial de pressão

ntq (entrada C)= nível do tanque

vz (entrada D) = vazão

Tabela III.7 – Regras de Inferência *Fuzzy*.

Regra	Entrada A	Entrada B	Entrada C	Entrada D	Saída F
1				Alta	Pouco sujo
2				Normal	Limpo
3		Pequeno			Pouco sujo
4		Normal			Normal
5		Alto	Baixo	Baixa	Normal
6	Pouco aberta	Alto	Normal	Baixa	Normal
7	Normal	Alto	Normal	Baixa	Muito sujo
8	Muito aberta	Alto	Normal	Baixa	Muito sujo
9	Pouco aberta	Alto	Muito alto	Baixa	Normal
10	Normal	Alto	Muito alto	Baixa	Muito sujo
11	Muito aberta	Alto	Muito alto	Baixa	Muito sujo

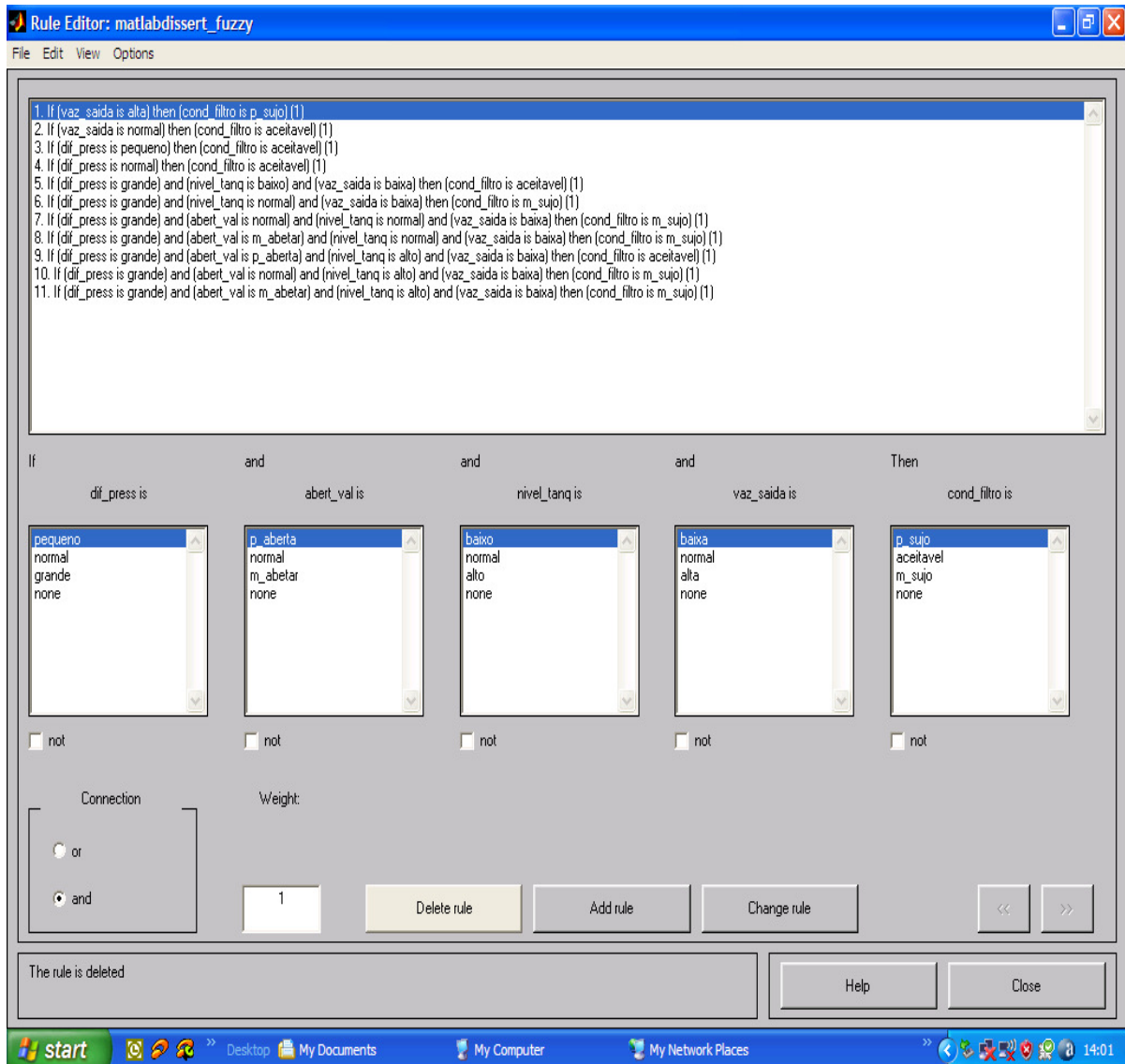


Figura III.15 – Regras de inferência no *MATLAB*.

### Inferência pelo Conseqüente

A composição dos dados de entrada para formar o conjunto nebuloso de saída é formada pela união de todas as regras com grau de ativação diferente de zero.



### III.6 Defuzzificação

Para se chegar ao resultado mostrado na figura III.16, gráfico de saída, utilizou-se o software *MATLAB 6.5*.

O modo de Defuzzificação default é através do Método do CENTRÓIDE, o que foi utilizado para este sistema.

Os valores da Variável de Saída, condição do filtro, mostrada na figura III.16, proporcionarão um número preciso que indicará ao operador ou especialista do processo as seguintes ações de Manutenção:

- F = pouco sujo → não realize manutenção no processo, isto é, não faça solução de celulose nos filtros.
- F= limpo → realize manutenção preditiva no processo, isto é, não faça solução de celulose, mas tome uma medida antecipativa como: cada unidade, fazer uma inspeção mais criteriosa no seu processo.
- F= muito sujo → realize manutenção corretiva no processo, isto é, faça solução de celulose.

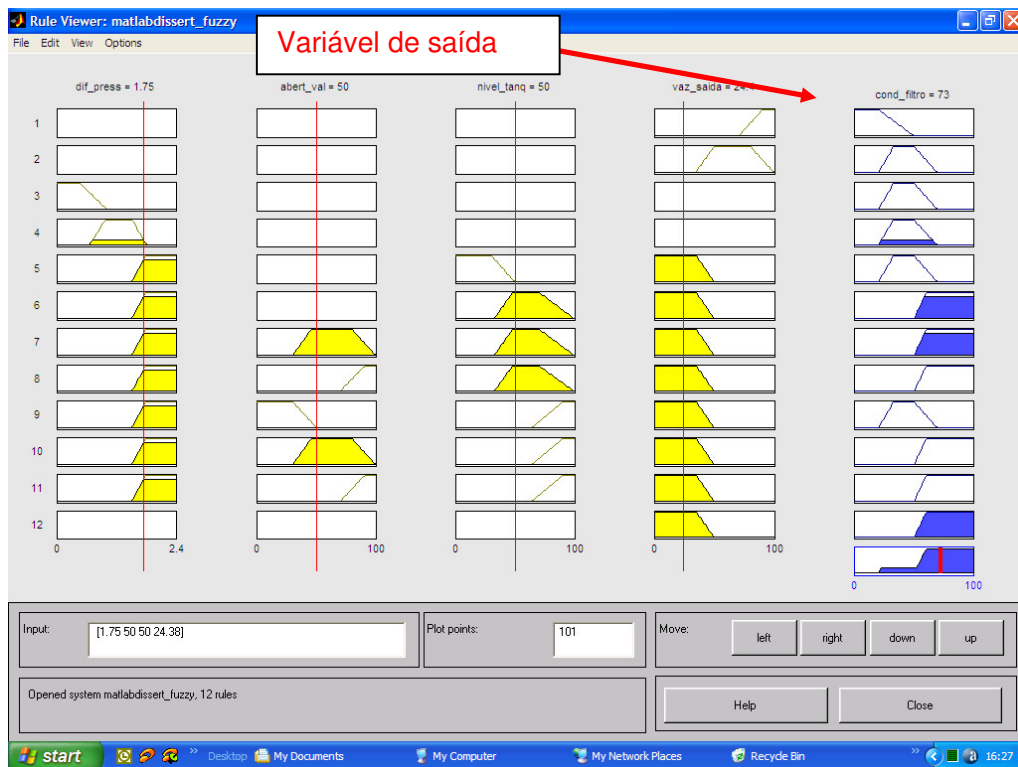


Figura III.16 – Defuzzificação.

### Aplicação

A figura III.16 apresenta uma visão espacial dos resultados sob o ponto de vista das variáveis de entrada do sistema. Esta facilidade permite ao especialista realizar avaliações através de diferentes cruzamentos de pares de variáveis a sua escolha, podendo identificar as variáveis de entrada mais significativas e que mais influenciam nos resultados do sistema. Essa facilidade é mais um subsídio que pode ser utilizado para diminuir as incertezas acerca do problema e, conseqüentemente, nortear a decisão sobre a identificação da abordagem administrativa que melhor represente os objetivos organizacionais. No exemplo, pode ser visto a influência dos pares das variáveis especificadas na determinação do valor da variável de saída, que identifica a abordagem de manutenção.

### Software

Os controladores *Fuzzy* baseados em regras são os mais práticos e efetivamente aplicados em processos industriais. Tais controladores podem ser implementados tanto em software quanto em hardware. Há diversos graus de liberdade em um projeto de um sistema *Fuzzy* que requerem muita flexibilidade para facilitar o processo de tentativa e erro. Atualmente, os sistemas de desenvolvimento *Fuzzy* baseados em software podem ser rodados em diversas plataformas de hardware.

Um controlador *Fuzzy* baseado em regras, segundo SHAW E SIMÕES (1999), pode ser desenvolvido e codificado em qualquer linguagem de computador, de alto ou de baixo nível, por exemplo, C++ ou assembler de microprocessador.

O *Fuzzy tech* é um software comercialmente disponível, ele permite a geração de código de máquina, para circuitos microcontroladores, como por exemplo: Motorola, Intel, Microchip. Assim, o controlador *Fuzzy* pode ser integrado a placas especializadas em controle de processo, onde tais placas possibilitariam que controladores *Fuzzy* pudessem implementar algumas funções do controle de processo.

Alguns módulos específicos disponíveis no sistema de desenvolvimento permitem a utilização de diversos controladores lógicos programáveis (CLP), utilizados em automação industrial. Diversos fabricantes adotaram a solução de controladores *Fuzzy* em seus PLC's, como: *Siemens*, *OMRON*, *Foxboro*, assim, como muitos outros. Atualmente esses produtos estão sendo produzidos de forma a respeitar as normas *ISO 9000* (concentração de normas que formam um modelo de gestão da qualidade para organizações) e *IEC 1131* (norma internacional que padroniza as linguagens de programação para controladores programáveis na área de automação industrial).

A proposta do uso da lógica *Fuzzy* é perfeitamente exequível, pois o sistema estudado é de uma dinâmica lenta e os dados de entrada podem ser acompanhados *on line* através de software específico, no caso o *Plant Informatios*, e alimentar os conjuntos de entrada para o sistema *Fuzzy*.

Basicamente, o PI é um *software* que contém um repositório, onde são concentradas todas as informações relevantes das células de produção, diretamente ligadas aos sistemas de supervisão e controle.

O PI coleta informações dos sistemas de supervisão, CLPs, SDCDs (sistema digital de controle distribuído) e os armazena em uma base de dados *real time*. Tal base tem características não encontradas nos bancos de dados convencionais, como: grande capacidade de compactação (tipicamente de 10:1) e alta velocidade de resposta a consulta em sua base histórica. Devido a isto, é capaz de armazenar um grande volume de dados com recursos mínimos, se comparado às soluções convencionais.

A informação armazenada na base de dados do PI pode ser consultada de várias formas. Geralmente os fabricantes de PI disponibilizam uma ferramenta gráfica, bem simples de ser usada, para que os usuários possam efetuar a pesquisa on-line, para saber o que ocorre no processo. Além disto, informações colhidas em dias e horários diferentes, podem ser exibidas em um mesmo gráfico e comparadas. Pode-se também consultar as variáveis on-line ou históricas.

As informações contidas dentro da base de dados do PI também podem ser acessadas com as ferramentas de análise de dados mais comuns do mercado, tais como Excel e Access. Isto é possível devido a disponibilização das informações através de *Add-Ins* (Excel), o que permite consulta *real time* à base de dados, através de comandos SQL.

Caberia a gerencia, investir na conclusão da automação deste processo e num *software* de utilização de lógica *Fuzzy* que faça comunicação com o software de automação para aquisição dos dados de entrada, além de manter um sistema supervisor de controle para o especialista.

## CONCLUSÃO

A dissertação teve como motivação à busca de um Agente racional para se escolher o melhor momento para realizar a manutenção dos filtros de celulose da REDUC, conseguindo demonstrar que foi possível utilizar a lógica *Fuzzy*, um sistema bastante amigável, que permite trabalhar com valores que estabelecem uma relação muito próxima da realidade.

A proposta do uso da lógica *Fuzzy* no processo decisório para fazer a manutenção no filtro de condensado e aumento da confiabilidade do Setor Termoelétrico da REDUC mostrou-se muito interessante, pois, com as informações obtidas dos especialistas, tem-se como variável de saída, um resultado preciso que, numa visão holística, pode ser utilizado como sendo o melhor momento para realizar a manutenção nos filtros de condensado. A simulação realizada no do *Fuzzy tools* do *MATLAB 6.5* comprovou estes resultados.

O Modelo proposto de apoio à decisão para o aumento da confiabilidade no processo de manutenção dos filtros de celulose da REDUC mostrou-se eficiente no que tange a modelagem semântica, obtida através de um questionário, dos especialistas que trabalham na Central Termoelétrica. Este modelo constitui uma excelente ferramenta de conversão do conhecimento tácito em explícito, como mostrado na Defuzzificação.

Com estes dados precisos haverá uma padronização quanto ao momento da manutenção, independente da experiência profissional do especialista. Os recursos naturais terão seus usos otimizados, mantendo de forma contínua a geração de vapor.

O processo decisório se fará num cenário menos conflitante. Assim, com o uso da lógica *Fuzzy*, teremos uma melhor interação Homem-Máquina. A lógica *Fuzzy* interage amigavelmente com o homem, aliviando seu fardo, de cargas relativas à: comportamento, emergências operacionais, fadiga. Fatores que interfere no processo decisório.

A confiabilidade dos equipamentos e a confiabilidade humana que resulta das interações Homem - Trabalho ou Homem - Ambiente, (dentro do sistema sócio-técnico em que ele atua) que não atendam a determinados padrões esperados, são afetadas por vários motivos, como é o caso do ambiente no qual estes equipamentos são acondicionados para inspeção, as condições ambientais da inspeção, os esgotamentos psicológicos dos especialistas.

Na análise de confiabilidade convencional a taxa de falha humana é ajustada por especialistas baseadas em critérios de julgamento de forma a considerar o efeito de muitos fatores sobre confiabilidade.

Uma das maiores percepções de ZADEH (1987), foi que a matemática pode ser utilizada para fazer uma ligação entre a linguagem e a inteligência humanas).

Muitos conceitos, de fato, podem ser muito mais bem definidos por palavras do que pela matemática, e a lógica *Fuzzy* e sua expressão nos conjuntos *Fuzzy* proporcionam uma disciplina que melhor pode construir modelos do mundo real.

Dessa forma, à utilização da lógica *Fuzzy*, além de ser um instrumento amplamente utilizado com sucesso em aplicações de controle na área da engenharia, terá o seu potencial empregado na construção de soluções para suporte à tomada de decisão, como ferramenta da confiabilidade.

Recomenda-se como continuação desse trabalho, o aprofundamento da forma de extração do conhecimento dos especialistas, a partir das técnicas de entrevista mais modernas. Recomenda-se também, estudos na técnica de Redes neurais, uma ferramenta muito poderosa em controle inteligente, pois emulam as funções biológicas de baixo nível em nosso cérebro para resolver tarefas de controle.

As redes neurais através de algoritmos adequados são estruturas computacionais que possibilitam o treinamento, ou aprendizado, de relações entre dados de entrada e saída, reconhecimento de padrões e correlações entre outras aplicações em engenharia. A união de sistema *Fuzzy* com redes neurais ocorre através de sistemas *neurofuzzy*, os quais aumentam a capacidade de aprendizado através de interface com dados numéricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHILES, H.; **Aspectos referentes AP ensino de matemática com aplicações de modelos característicos à teoria da confiabilidade.** Dissertação mestrado Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2006.

AGUIAR, M. A. F.; Psicologia **Aplicada à administração uma abordagem interdisciplinar.** Editora Saraiva, 2006.

AMENDOLA, M.; **Manual do Uso da Teoria dos Conjuntos Fuzzy no MatLab 6.5.** Disponível em: [http://www.ime.unicamp.br/~laeciocb/MANUAL\\_2005.pdf](http://www.ime.unicamp.br/~laeciocb/MANUAL_2005.pdf).

BUSSAB, W.O; MORETTIN, P. A.; **Estatística Básica**, 4ª ed. São Paulo: Atual, 1993.

COSTA, W. V.; FERNANDES, J. L.; BROCHADO, M. R.; **O Uso da Lógica Fuzzy como Ferramenta de Processo Decisório no Processo de Manutenção dos Filtros de Celulose da Reduc.** 62nd ABM *International Annual Congress*, 2007, Vitoria. v 1. p. 1850-1858.

COSTA, W. V.; FERNANDES, J. L.; BROCHADO, M. R.; **Proposta do Uso de Confiabilidade por meio da Lógica Fuzzy no Processo de Avaliação dos Alunos do Curso de Engenharia de Produção do Cefet-RJ .** XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2007, Curitiba. v. 1. p. 1-10.

COSTA, W. V.; IN, CASTANHEIRAS E PEREIRA (ORGS.). **Entre Homens e Máquinas.** Rio de Janeiro: Publit soluções editoriais, 2006.

COSTA, W. V.; MARTINS, C. A. O.; FERNANDES, J. L.; BROCHADO, M. R.; **Manutenção Autônoma: A Interface Produtiva entre a Manutenção e a Operação.** 21º Congresso Brasileiro de Manutenção (ABRAMAN), 2006, Aracajú-SE, 2006. v. 1.

DALBEN, P.; **Modelos Fuzzy – Sistemas de Inferência.** 2004. Disponível em: [http://geocities.yahoo.com.br/pablo\\_dalbem/lf4.htm](http://geocities.yahoo.com.br/pablo_dalbem/lf4.htm). Acessado em: 17 ago. 2004.

DOWNING, D. & CLARK, J.; **Estatística Aplicada.** São Paulo, SP: Saraiva, 2000.

DUSMANTA. K. M.; PRADIP. K. S.; CHAKRABARTI, R.; ***Fuzzy reliability evaluation of captive power plant maintenance scheduling incorporating uncertain forced outage rate and load representation*** *Electrical Engineering Department*, Jadavpur University, Kolkata 700032, India 2004.

EARL COX.; ***The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems***, AP Professional, 1994.

EBELING, C. E.; ***An introduction to reliability and maintainability engineering***. New Delhi: Mc Graw-Hill, 2000.

FACHIN, O.; ***Fundamentos de metodologia***, 3. ed. São Paulo, Saraiva, 2001.

FERNEDA. C.; ***Conception d'un Agent rationnel et examen de son raisonnement en géométrie***. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc – Montpellier II, France, 1992.

FLEMING, P. V.; ***Implementando a MCC em um Ambiente TPM***. In: **Anais do III. Seminário Brasileiro de Confiabilidade na Manutenção**. São Paulo, SP, 2000.

FLEMING, P. V.; ***Propagação de incertezas na análise probabilística de segurança de centrais nucleares***. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1981.

FONSECA, R. A.; ***Estudo da Análise da Confiabilidade Humana em um Sistema Operacional de Uma Planta Nuclear Tipo PWR***: Rio de Janeiro. 2004. Tese- Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

FREITAS, H. et al.; ***Informação e decisão: sistemas de apoio e seu impacto***. Porto Alegre: Ortiz, 1997.

FUJITA, Y., “ ***Human Reliability Analysis: A Human Point of View***”, ***Reliability Engineering and System Safety***, Ed. Elsevier Applied Science, v.. 38, 1992.

***FUZZY LOGIC TOOLBOX for use with MATLAB*** (1995).

GHINATO, P.; **Sistema Toyota de Produção**: mais do que simplesmente just-in-time. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 1996.

GIL, A. C.; **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

HABERMAS, J.; **Teoría de la acción comunicativa. Madrid**, Taurus, vol. II, 1988. *Racionalidade e comunicação*. Lisboa: Edições 70, 1996.

HARRIS, D., **Effect of Decision Making on Ultrasonic Examination Performance**, TR-100412, EPRI, 1992.

HIMONAS, A. H. A.; **Cálculo: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

HOLLNAGEL, E.; **Cognitive Engineering in Complex Dynamic Worlds**. London: Academic Press, 1988.

KARDEC. A.; NASCIF, J.; **Manutenção Função Estratégica**, 2 ed. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2003.

KOSKO, B.; **Pensamento Borroso. La nueva ciencia de la logica borrosa**. Trad. Juan Pedro Campos. Barcelona: Grijalbo Mondadori, 1995.

KUHN, T.; **As estruturas das revoluções científicas**. 3ª ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 1994.

LAFRAIA, J. R. B.; **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro. Petrobras, 2001.

LEWIS, E. E.; **Introduction to reliability engineering**. New York: John Wiley, 1996.

LIDA, I.; **Ergonomia, Projeto e Produção**, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1998.

MATA FILHO, J. N., MIRANDA, C. F.; LIMA, C. E.; **Manutenção Baseada em Confiabilidade e Controle de Custos de Manutenção** – Um Time de Sucesso na Indústria Aeronáutica. TT040, In: Anais CD-Rom do XIII Congresso Brasileiro de Manutenção. Salvador, BA, 1998.



MENDEL, J. M.; **Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial, Proc. of the IEEE**, vol 83, No.3, March 95.

MEZA, E. B. M. et al.; **Utilização de um modelo neuro-fuzzy para a localização de defeitos em sistemas de potência**. *Sba Controle& Automação*, jan./mar. 2006, vol.17, no. 1. ISSN 0103-1759.

MIRSHAWKA ,V.; OLMEDO, N. L.; **TPM À Moda Brasileira**. São Paulo: Makron Books, 1994.

MORIN, E.; **Introdução ao pensamento complexo**. 2ª ed. Lisboa: Instituto Piaget, 1990.

MOUBRAY, J.; **Reliability-Centered Maintenance**. 2nd ed - Woodbine, NJ Industrial Press Inc., 1997.

NAKAJIMA,S.; **Introdução ao TPM – Total Productive Maintenance**. Tradução Mário Nishimura. São Paulo : IMC Internacional Sistemas Educativos, 1989.

NETO, F. L.; MAZUCHELI, J. ; ACHCAR, J. A.; **Análise de sobrevivência e confiabilidade**. Col. Monografias Del IMCA. Lima: IMCA Pontifícia Universidad Católica del Peru, 2002.

OLIVEIRA JÚNIOR, H. A.; **Lógica Difusa: Aspectos práticos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1999.

OLIVEIRA, K. R.; **AdeQuaS: Ferramenta Fuzzy para Avaliação da Qualidade de Software**. Junho de 2002. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciência da Computação, Universidade de Fortaleza, Fortaleza.

PALLAROSI, C. A.; **Confiabilidade: a quarta dimensão da qualidade**, São Paulo, ReliaSoft, 2006 - 2007.

PALMEIRA, J.N.; TENÓRIO, F. G.; **Flexibilização Organizacional: Aplicação de um Modelo de Produtividade Total**, Rio de Janeiro, Fundação Getulio Vargas, 2002.

PINHO, M. de O.; **Sobre a aplicação de sistemas de equações diferenciais parciais e ordinárias de primeira ordem à confiabilidade de sistemas de segurança sob envelhecimento**, Tese de D. Sc., COPPE/PEN, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

RASSMUSSEN, J.; ***Learning from experience? How? Some research issues in industrial risk management***, Ed. Octares/Enterprises, Marseille, 1990.

REASON, J.; Human **Error**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

REDUC/PETROBRAS. **Cadernos Petrobras**. Agosto/2005, n° 3.

HARRIS, D.; ***Effect of Decision Making on Ultrasonic Examination Performance***, TR-100412, EPRI, 1992.

REZENDE, J. F.; ***Balanced scorecard e a gestão do capital intelectual***. Rio de Janeiro, Campus, 2003.

RYAN, D. K. ; OESTREICH, D. K. ; **O Medo no Ambiente de Trabalho**, Makron Books do Brasil Editora, São Paulo, 1993.

RICOEUR, P.; **O si-mesmo como um outro**. Campinas: Papyrus, 1991.

SALEH, J. H.; MARAIS, K.; "Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering". In\_: ***Reliability engineering & system safety*** XX, 2005.

SALTORATO, P.; CINTRA, C. T.; **Implantação de Um Programa de Manutenção Produtiva Total em Uma Indústria Calçadista de Franca**. Trabalho publicado no 19º Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, 1999. Anais Enegep 99.

SHAW, I.; SIMÕES, M. G.; **Controle e Modelagem. Fuzzy**. FAPESP, 1999.

SANTIAGO, M.; JULIÁN, M.; ***Energy Economics***. Kidlington: 2007. Vol. 29, Iss. 5.

SEMINÁRIO DE CONFIABILIDADE DA PETROBRAS: Rio de Janeiro. 2003

SIQUEIRA, I. P.; **Manutenção Centrada em Confiabilidade-Manual de Implementação**. Rio de Janeiro. Qualitymark.Petrobras. 2001.

SKINNER, B.F.; **Ciência e Comportamento Humano**. São Paulo:Martins Fontes.1967.

RASSMUSSEN, J.; ***Learning from experience? How? Some research issues in industrial risk management***, Ed. Octares/Enterprises, Marseille, 1990.

ROBERTS, J.; **“A Manutenção Produtiva Total – sua Definição e História”**. (on line) 2001. Disponível na Web: <http://www.tpmonline.com/articles>.

RUSSEL, S.; NORVING. P.; ***Artificial Intelligence – A Modern Approach***. New Jersey, Prentice-Hall, 1995.

SWAIN, A.D.; GUTTMAN, B. E.; ***Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications***. NUREG 1278, US Nuclear Regulatory Commission, 1983.

TAKAHASHI, Y. O. T.; **Manutenção Produtiva Total**. São Paulo: Instituto IMAN, 1993.

TANSCHUIT, R.; VELLASCO, M.; Notas de Aula sobre Lógica *Fuzzy*, 2006. Disponível em: <http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos/index.asp>.

TOURINO, S. R. G.; **Guiagem do Robô Móvel XR4000 para Inspeção via Internet de Tubulações Industriais Soldadas**. Relatório de Projeto de Graduação. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2000. Disponível em: <http://www.graco.unb.br>. Acessado em: 17 ago, 2004.

VANDERLEI FILHO, D.; **Uma Proposta *Fuzzy* na Avaliação de Desempenho de Bibliotecas Universitárias Brasileiras**. 2002. Disponível em: [www.sibi.ufrj.br/snbu/snbu2002/gen1.htm](http://www.sibi.ufrj.br/snbu/snbu2002/gen1.htm). Acesso em: 24/11/2004.

VIZZONI, E.; **Manutenção Centrada em Confiabilidade – Avaliação de sua Aplicabilidade e Adaptação a Subestações de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

XAVIER, J. N.; 2001. **Indicadores na manutenção – parte VI**. <http://www.manter.com.br/Artigos/>, (disponível em 10/12/2001).

YING, M. W.; T, M. S. E.; **Computers & Industrial Engineering**. New York: Aug 2007. Vol. 53, Iss. 1;

WILLMOTT, P.; **TPM – The Western Way**. (on line) 08/01/2001. Disponível na Web: [http://www.sqjbrasil.br/SQL-RCM2-ttec\\_integracaombrcmtpm.html](http://www.sqjbrasil.br/SQL-RCM2-ttec_integracaombrcmtpm.html).

WITTIG, A.; **Psicologia Geral**, Ed. McGraw – Hill, São Paulo, 1981.

ZADEH, L. A.; **A Computational Theory of Dispositions Int. J. Intelligent Systems**, Volume 2, 1987.

ZADEH, L. A.; **Fuzzy Logic Toolbox User's Guide**. Berkeley, CA, 1995.

YIN, R. K.; **Estudo de Caso: planejamento e método**, 1 ed. Porto Alegre, Bookman, 2005

## APÊNDICE

### Apêndice 1

Prezado Especialista:

O seguinte questionário forma parte de uma pesquisa a fim de saber como cada um trabalha com as variáveis em questão. Esta pesquisa não tem finalidade administrativa e sim científica. A qualidade da pesquisa depende do nível de transparência das opiniões fornecidas pelos operadores, neste caso, especialistas na operação da estação de tratamento de condensado. Para isso peço que suas opiniões sejam transparentes. Diante do resultado, será usada a lógica *Fuzzy*, criando um modelo matemático para as proposições.

Nome	
Idade	
Tempo na Empresa	
Escolaridade	
Valores de trabalho p/ Abertura da válvula	Pouco aberta: Normal : Muito aberta:
Valores de trabalho p/ Diferencial de Pressão	Pequeno: Normal : Grande:
Valores de trabalho p/ Nível do Tanque	Baixo: Normal : Alto:
Valores de trabalho p/ Vazão de Saída do Filtro	Baixa: Normal : Alta:
Valores de trabalho p/ Condição do filtro	Pouco sujo: Aceitável ou normal : Muito sujo:

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
COORDENADORIA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO

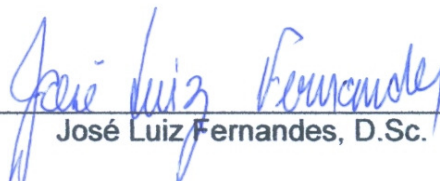
**O USO DA LÓGICA FUZZY COMO FERRAMENTA DE PROCESSO DECISÓRIO PARA  
O AUMENTO DA CONFIABILIDADE NO PROCESSO DE MANUTENÇÃO DOS  
FILTROS DE CELULOSE DA REDUC**

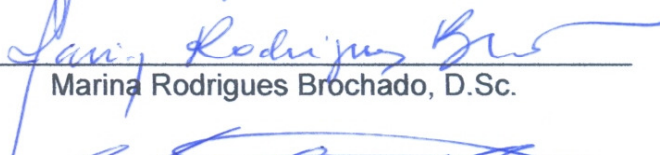
Waldo Vieira Costa

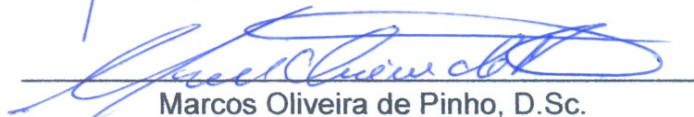
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA.

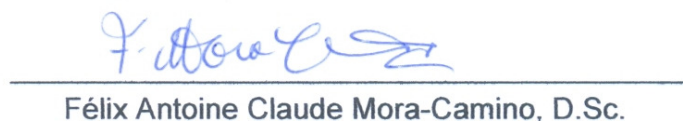
Data da defesa: 27/12/2007

Aprovação:

  
\_\_\_\_\_  
José Luiz Fernandes, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Marina Rodrigues Brochado, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Marcos Oliveira de Pinho, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Félix Antoine Claude Mora-Camino, D.Sc.

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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