

APLICAÇÃO DE FMEA-DEA AO SISTEMA DE AR CONDICIONADO DA SALA  
DE CONTROLE DE UMA USINA NUCLEAR

Gilberto Varanda Barbosa Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D. Sc.

---

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D. Sc.

---

Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2007

BARBOSA JUNIOR, GILBERTO VARANDA

Aplicação de FMEA-DEA ao Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle de uma Usina Nuclear [Rio de Janeiro] 2007

XII, 129 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Nuclear, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. FMEA-DEA
2. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)
3. Data Envelopment Analysis (DEA)
4. Ar Condicionado da sala de controle de uma usina nuclear

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

À minha família em Arcos, Minas Gerais que, sempre soube respeitar as minhas decisões, pelo exemplo de caráter, bom senso e amizade.

À minha noiva, administradora Michele Granja que, trilhando comigo o caminho do raciocínio analítico e do amor sincero e maduro, permitiu-me a realização desta dissertação.

Ao meu primeiro sobrinho, Rafael, que recém chegou a este mundo e que ainda terá muita história para contar e sonhos a realizar.

## AGRADECIMENTOS

Ao eng<sup>o</sup>. José Paulo e ao eng<sup>o</sup>. Reinaldo Marques, ambos da White Martins Gases Industriais Ltda., por terem me dado a oportunidade para a realização deste trabalho.

Ao prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, pela oportunidade, paciência, confiança, amizade e principalmente, por ter acreditado no meu potencial de trabalho e estudo.

Ao eng<sup>o</sup>. Rodolfo Belga e ao eng<sup>o</sup>. Marcos Guimarães, ambos da White Martins Gases Industriais Ltda., pelo apoio, incentivo, compreensão e exemplo profissional.

A Eletrobrás Termonuclear S. A., pelas informações gentilmente cedidas a mim para o desenvolvimento deste trabalho e em particular, ao coordenador de comunicação e segurança, Sr. José Manuel Diaz Francisco e ao eng<sup>o</sup>. Sidnei Barbosa, da usina nuclear Angra 1.

Ao Dr. Pauli A. de A. Garcia, pela sua estimada orientação na obtenção dos resultados da FMEA-DEA.

Aos eng<sup>os</sup>. Rodrigo Basso, Marden Ferreira, Adriano Coutinho e Romel Santana, pela estimada participação no desenvolvimento da FMEA.

Ao prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira e ao Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa, pela participação na banca examinadora.

A prof<sup>a</sup>. Myriam Cardoso Mello, pela sua estimada ajuda na correção ortográfica desta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## APLICAÇÃO DE FMEA-DEA AO SISTEMA DE AR CONDICIONADO DA SALA DE CONTROLE DE UMA USINA NUCLEAR

Gilberto Varanda Barbosa Junior

Março/2007

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

Esta dissertação demonstra a aplicação da análise FMEA-DEA ao sistema de ar condicionado da sala de controle de uma usina nuclear. Adquiridos os modos de falha, os índices associados à probabilidade de ocorrência, severidade dos efeitos e potencial de detecção, tem-se uma ordem de prioridade entre os modos de falha ou desvios. Este número consiste do produto dos três índices mencionados, que variam numa escala natural de 1 a 10, onde quanto maior for o índice, mais crítica será a situação. No presente trabalho, pretende-se utilizar um modelo baseado em análise envoltória de dados, DEA (“Data Envelopment Analysis”) em conjunto com a FMEA, para identificar qual é a eficiência atual do sistema e quais modos de falha ou desvios são considerados mais críticos, e por meio dos pesos atribuídos pela modelagem matemática, identificar quais índices estão contribuindo mais para estes desvios. A partir desta identificação, o responsável pelo setor, área ou equipamento pode direcionar melhorias, sejam de ordem administrativa, de investimento no sistema de segurança, em treinamento dos operadores, mantenedores e assim manter a segurança do processo e do trabalho, agregando valor ao seu produto final.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

FMEA-DEA APLICATION IN THE AIR-CONDITIONING SYSTEM OF CONTROL  
ROOM FROM NUCLEAR POWER PLANT

Gilberto Varanda Barbosa Junior

March/2007

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

This dissertation presents the FMEA-DEA analysis application to the air-conditioning system of the control room of a nuclear power plant. After obtaining the failure modes, the index associated to the occurrence probability, the severity of the effects and the potential of detention, a priority order is established for the failure modes or deviations. This number is obtained by multiplying the three mentioned index that vary in a natural scale from 1 to 10, where the higher the index, the more critical the situation will be. In this work, it is intended to use a model based on the data envelopment analysis, DEA jointly with the FMEA, to identify the current efficiency of the system and which failure modes or deviations are considered more critical, and by means of the weights attributed for the mathematical modeling to identify which index are contributing more for these deviations. From this identification, improvements can be set, which may consider administrative changes, operator training and so on, thus adding value to the final product.

## ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
1.1	Apresentação .....	1
1.1.1	Técnicas de identificação de perigos.....	1
1.1.2	FMEA – Análise de modos e efeitos de falhas.....	4
1.1.3	DEA – Análise envoltória de dados .....	6
1.2	Objetivos.....	8
1.3	Estrutura do trabalho .....	9
2.	FMEA – Análise de modos e efeitos de falhas.....	10
2.1	Histórico .....	10
2.2	FMEA: uma visão geral.....	12
2.3	FMEA: a análise .....	21
2.3.1	Passo a passo na análise da FMEA.....	27
2.3.2	Equipe recomendada .....	51
3.	DEA – Análise envoltória de dados .....	52
3.1	DEA: a análise .....	52
3.1.1	Implementação da DEA.....	54
3.1.2	Definição e seleção de DMUs .....	54
3.1.3	Seleção de variáveis .....	54
3.1.4	Aplicação do modelo.....	56
3.2	Modelos DEA .....	56
3.2.1	O modelo CCR .....	57
3.2.2	O modelo BCC .....	62
3.2.3	Formulações não arquimedianas para os modelos CCR e BCC.....	66
3.2.4	O modelo aditivo .....	70
4.	Sistema de ar condicionado da sala de controle de uma usina nuclear .....	74
4.1	Função .....	74
4.2	Bases de projeto.....	74
4.3	Descrição operacional.....	74
5.	Aplicação da FMEA de produto ao sistema de condicionado da sala de controle de uma usina nuclear .....	77
5.1	Constituição da equipe .....	77
5.2	Desenvolvimento da FMEA de produto .....	78

5.3	Resultados da FMEA de produto.....	102
6.	Aplicação da FMEA-DEA ao sistema de condicionado da sala de controle de uma usina nuclear.....	105
6.1	Seleção das DMUs.....	105
6.2	Determinação das variáveis.....	105
6.3	Modelagem matemática da análise FMEA-DEA.....	105
6.4	Aplicação da FMEA-DEA no ASC.....	107
6.5	Análise preliminar da FMEA-DEA no ASC.....	109
6.6	Comparação entre as técnicas FMEA de produto e FMEA-DEA.....	111
7.	Conclusões e recomendações.....	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
	APÊNDICE A GLOSSÁRIO.....	123
	APÊNDICE B SISTEMA ASC EM OPERAÇÃO NORMAL.....	128
	APÊNDICE C SISTEMA ASC EM OPERAÇÃO EMERGÊNCIA.....	129



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – O caminho para a engenharia de produto e a FMEA .....	16
Figura 2.2 – Conexão entre a FMEA de processo, projeto e sistema.....	22
Figura 2.3 – Conexão entre o sistema, montagem e componente da FMEA .....	22
Figura 2.4 – Conexão do sistema, projeto e serviço FMEA.....	23
Figura 3.1 – Incrementos Proporcionais. Fronteira CRS.....	59
Figura 3.2 – Fronteira CRS. Orientação Input.....	60
Figura 3.3 – Fronteira CRS. Orientação Output.....	61
Figura 3.4 – Projeções das orientações Input e Output. ....	62
Figura 3.5 – Projeções das orientações na Fronteira VRS .....	63
Figura 3.6 – Hiperplanos na fronteira VRS.....	65
Figura 3.7 – Relações das fronteiras CRS e VRS .....	66
Figura 3.8 – Existência de DMUs Pareto ineficientes.....	66
Figura 3.9 – Projeção na fronteira no modelo aditivo .....	70
Figura 5.1 – Principais componentes do ASC.....	80
Figura 6.1 – Fronteira de eficiência orientada para o “output” .....	106

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Critérios para seleção da classificação .....	19
Tabela 2.2 – Planilha para a FMEA de produto .....	30
Tabela 2.3 – Quadro de trabalho de avaliação da função .....	33
Tabela 2.4 – Guia de severidade para a FMEA de produto.....	37
Tabela 2.5 – Guia de ocorrência para a FMEA de produto.....	42
Tabela 2.6 – Guia de detecção para a FMEA de produto.....	48
Tabela 5.1 – Desenvolvimento da FMEA no analisador de cloro.....	81
Tabela 5.2 – Desenvolvimento da FMEA no abafador de fluxo.....	82
Tabela 5.3 – Desenvolvimento da FMEA no evaporador ventilador .....	84
Tabela 5.4 – Desenvolvimento da FMEA no detector de fumaça.....	87
Tabela 5.5 – Desenvolvimento da FMEA no aquecedor elétrico.....	88
Tabela 5.6 – Desenvolvimento da FMEA no condensador a ar .....	88
Tabela 5.7 – Desenvolvimento da FMEA no compressor das unidades de resfriamento .....	92
Tabela 5.8 – Desenvolvimento da FMEA no ventilador de exaustão .....	95
Tabela 5.9 – Desenvolvimento da FMEA na válvula de controle de pressão PV-5963.....	96
Tabela 5.10 – Desenvolvimento da FMEA na válvula de controle de pressão PV-5957 A/B .....	97
Tabela 5.11 – Desenvolvimento da FMEA na unidade de filtragem .....	99
Tabela 5.12 – Desenvolvimento da FMEA nos ventiladores reforçadores .....	100
Tabela 5.13 – Desenvolvimento da FMEA na válvula de entrada do filtro HV-5955 .....	101
Tabela 5.14 – Ordenamento por RPN após a análise FMEA .....	102
Tabela 5.15 – Eventos para discussão após a aplicação da FMEA .....	104
Tabela 6.1 – Eficiência, variáveis alvo e percentuais de melhorias dos eventos .....	108
Tabela 6.2 – Variáveis para diminuir os perigos potenciais no ASC .....	110

## LISTA SÍMBOLOS

ASC .....	Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle
AIAG .....	“Automotive Industry Action Group”
APP .....	Análise Preliminar de Perigos
CRS.....	Constant Returns to Scale
ASQ .....	“American Society for Quality”
ASQC .....	“American Society for Quality Control”
CNEN .....	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNF .....	“Cumulative Number of Component Failure”
Colo. ....	Colorado
CTR .....	Centro de Tecnologia Rio
DEA .....	“Data Envelopment Analysis”
DFM .....	“Design for Manufacturability”
DMU.....	“Decision Making Unit”
DODISS.....	“Department of Defense Index of Specifications and Standards”
DOE .....	“Design of Experiments”
FMEA.....	“Failure Mode and Effects Analysis”
FMECA .....	“Failure Mode, Effects and Criticality Analysis”
FTA.....	“Fault Tree Analysis”
HAZOP.....	“Hazard and Operability Studies”
ISO.....	“International Organization for Standardization”
ISR.....	“Initial Sample Runs”
Mich.....	“Michigan”
MIL-P .....	“Military Procedure”
mmca .....	milímetro de coluna de água
NRC .....	“Nuclear Regulatory Commission”
OEM .....	“Original Equipment Manufacturers”
PHA .....	“Preliminary Hazard Analysis”
Ph.D. ....	“Philosophiae Doctor”
QFD .....	“Quality Function Deployment”
QRA.....	“Quantitative Risk Assessment”
{ $\Re$ } .....	Conjunto dos números reais
R&D .....	“Research and Development”

RPN ..... “Risk Priority Number”  
SAE..... “Society of Automotive Engineers”  
SSMA ..... Saúde Segurança e Meio Ambiente”  
SWFMEA..... “Software Failure Mode and Effects Analysis”  
TS ..... “Technical Specification”  
VRS ..... “Variable Returns to Scale”

## 1. Introdução

### 1.1 Apresentação

#### 1.1.1 Técnicas de identificação de perigos

Em uma análise para identificação de perigos, devem-se considerar todos os processos envolvidos, sejam eles em uma planta química, nuclear, de papel e celulose, siderúrgica, em um determinado equipamento, em um processo específico, no produto acabado ou no serviço prestado, e as perguntas abaixo devem ser formuladas: (CROWL e LOUVAR, 2002).

- Quais são os perigos?
- O que pode dar errado? E por quê?
- Quais são as chances de ocorrência?
- Quais são as conseqüências?

A primeira pergunta acima caracteriza a identificação de perigos. As demais, estão associadas à avaliação dos riscos. A avaliação dos riscos inclui a determinação dos eventos que podem produzir um acidente, a frequência, e as suas conseqüências. A terminologia empregada pode variar consideravelmente de uma técnica para outra.

A identificação de perigos e a avaliação dos riscos são algumas vezes combinadas em uma categoria mais geral denominada avaliação de perigos. Em alguns casos, a análise de riscos é denominada análise de perigos. (CROWL e LOUVAR, 2002)

Em uma Análise Quantitativa de Riscos, tem-se por objetivo a identificação de pontos críticos do processo ou equipamento e a avaliação das conseqüências associadas à ocorrência de um evento indesejado associado a estes pontos. De modo geral, os pontos críticos de um determinado processo ou equipamento são caracterizados por meio de modos de falha ou desvios de processo.

As conseqüências podem incluir ferimentos em pessoas ou mesmo fatalidades, danos ao meio ambiente ou perda de produção e de equipamentos.

Os estudos de identificação de perigos e de avaliação de riscos podem ser realizados em qualquer estágio podendo ser no início do projeto ou durante o seu desenvolvimento e na operação de um processo ou equipamento. O ideal é aplicar estas técnicas quando se inicia o projeto, pois os melhores resultados são obtidos quando são realizados desde o início do projeto. Quando são realizadas paralelamente, podem-se evitar desperdícios com instalações desnecessárias, possibilitando a incorporação de eventuais modificações no final do projeto.

Por exemplo, quedas de aviões e tornados representam perigos para uma planta química. Quais são as suas chances de ocorrência e o que se deve fazer a respeito? Para a maioria das instalações, a freqüência desses perigos é muito remota: não são necessárias ações para a sua prevenção. Da mesma forma, perigos com freqüência razoável, mas conseqüências mínimas, são muitas vezes desprezados.

Existem muitos métodos disponíveis para se proceder à identificação de perigos e à avaliação de riscos. Nenhum método em particular é necessariamente mais adequado para qualquer aplicação. A seleção do melhor método requer experiência profissional. A maior parte das empresas usa esses métodos ou adaptações de modo a se ajustarem às suas necessidades em particular. Os métodos mais comumente empregados para a identificação de perigos são apresentados a seguir:

- Lista de Verificação de Perigos em Processos — é uma lista de itens e possíveis problemas no processo, que devem ser verificados, a qual é freqüentemente utilizada antes da realização de uma análise mais detalhada. Pode ser relativa a aspectos gerais, processo ou equipamento e três respostas são possíveis para cada item: Requer estudo futuro, não aplicável e completo. Também alerta para falha segura dos componentes, como por exemplo, se uma válvula falhar, qual será a posição de falha segura: aberta ou fechada?
- Inspeção de Perigos — pode ser tão simples quanto um inventário de materiais perigosos, ou tão detalhado quanto o Índice de Incêndio e Explosão da “Dow

Chemical,” que é uma planilha que atribui penalidades aos perigos e créditos aos procedimentos e equipamentos de segurança.

- Análise Preliminar de Perigos, APP — é um método para a identificação de perigos em um estágio inicial ainda na fase projeto. Deve ser usado nos estágios preliminares do desenvolvimento da planta, nos casos em que a experiência passada fornece pouca informação relevante no que toca aos perigos potenciais, como é o caso de um processo novo.
- Estudos de Perigos e Operabilidade, HAZOP — esta técnica faz uso de palavras chave relacionadas com variáveis de processo e objetiva analisar o efeito dos desvios de processo na operação da unidade industrial.
- Revisão de Segurança — é comumente utilizada para identificar problemas de segurança em laboratórios e em processos visando propor soluções. É um procedimento muito eficiente, entretanto menos formal que o HAZOP, sendo que os resultados são altamente dependentes da experiência e da sinergia do grupo revisor do processo. Existem dois tipos de revisão de segurança: informal e formal. A revisão informal de segurança é utilizada quando se consideram pequenas alterações em processos existentes ou em processos de laboratório. Já a revisão formal de segurança é utilizada em processos novos, alterações substanciais em processos existentes e em processos que necessitam de uma revisão atualizada, sendo que a revisão formal de segurança é um procedimento de três etapas: Preparação de um relatório formal e detalhado de revisão de segurança; Revisão do relatório e inspeção do processo por um comitê e Implementação das recomendações.
- Análise de Modos e Efeitos de Falhas, FMEA — identifica os modos de falha dos componentes de um sistema e analisa em que os seus efeitos podem afetar a operação do sistema, a segurança do processo, do trabalho, da comunidade e do meio ambiente.

- Análise de Modos, Efeitos e Criticalidade de Falhas, FMECA, — é uma ampliação da FMEA, em que uma análise de criticalidade das falhas é realizada.

Tradicionalmente, as principais técnicas conduzidas para identificação de pontos críticos são a FMEA e o HAZOP. (KUMAMOTO e HENLEY, 1996)

### 1.1.2 FMEA – Análise de modos e efeitos de falhas

Segundo STAMATIS (1994), a FMEA consiste em uma metodologia específica para avaliar um sistema, projeto, processo ou serviço para possíveis caminhos com os quais as falhas, problemas, erros, ou riscos podem ocorrer.

Para cada uma das falhas identificadas, conhecidas ou potenciais, uma estimativa é feita para a sua ocorrência, severidade e detecção. E neste ponto, uma avaliação é feita da ação necessária a ser tomada, planejada ou ignorada.

A análise pode ser qualitativa ou quantitativa. Em ambos os casos, o foco está no risco que se está disposto a assumir. Por definição, a FMEA tornou-se uma técnica sistemática que agrupa conhecimentos em engenharia, confiabilidade e técnicas de desenvolvimento organizacional, em outras palavras, uma equipe para otimizar o sistema, projeto, processo, produto ou serviço (STAMATIS, 1991).

Segundo JURAN e GRZYNA (1980), a complicação da aproximação da veracidade das informações sempre depende da complexidade do problema, conforme definido abaixo:

1. Segurança – O prejuízo é o mais sério de todos os efeitos de falha. De fato, em alguns casos isto é uma prioridade inquestionável. E neste ponto, o prejuízo deverá estar junto com a análise de perigos e/ou FMECA;

2. Efeitos do tempo de parada – Quais os problemas que estão afetando o campo? Como estes efeitos estão sendo monitorados? Que tipo de teste está disponível? É o teste apropriado? Como são feitos os reparos? Os reparos são apropriados? A manutenção preventiva faz parte do planejamento de qualidade? Os reparos podem ser



executados com o equipamento em operação ou ele devem estar fora de operação? A ação corretiva é desempenhada ativamente?

3. Planejamento de reparos – Tempo de reparo; manutenibilidade; custo do reparo; ferramentas para o reparo; recomendações para mudanças da especificação do ajuste, forma e função. A aproximação de “Shingo” conhecida pelo nome de “Poka-yoke”, projeto de ensaios, DOE ou desenhos de fabricação, DFM podem ser abordados por este problema. (DANIELS et al., 2002);

4. Acesso – Que componente deverá ser removido para termos acesso ao componente que falhou? Esta área será de grande importância em conjunto com as leis ambientais e regulamentações que serão introduzidas e/ou mudadas para refletir as condições globais para desmontagem, remoção e descarte.

Para absorver essa metodologia e tirar conclusões próprias existem pelo menos 4 pré-requisitos que deverão ser entendidos e seguidos:

1. Os problemas não são iguais e nem todos os problemas são igualmente importantes. Isto talvez seja o conceito fundamental mais importante na análise FMEA;

2. O Cliente deverá ser conhecido. Antes de comprometer-se com a responsabilidade de conduzir uma FMEA é obrigatório que o cliente seja definido. Tradicionalmente, o cliente é o usuário final. Naturalmente esta definição pode não ser aplicada ao problema. O cliente também pode ser visto como uma operação subsequente ou a jusante como uma operação de serviço. Em alguns casos, o cliente pode ser a própria operação (FORD, 1992);

Isto é importante porque quando utilizamos o termo cliente em uma visão panorâmica da FMEA, a definição torna-se a principal regra na consideração dos problemas e nas suas soluções.

3. A função deve ser conhecida. É obrigatório que a função, proposta e objetivo quando for executada, seja conhecida. De outra maneira o resultado será uma perda de tempo, e um esforço desnecessário será utilizado para redefinir o problema

baseado nas situações. Se for preciso, um tempo maior com a equipe será necessário para garantir que todos os participantes entendam a função, proposta e o objetivo, para que o trabalho seja finalizado;

4. O cliente deverá ser orientado. A FMEA será conduzida não apenas para satisfazer o cliente e/ou exigências de mercado, ou somente para preenchimento de formulários. É importante orientar o cliente, que o resultado final da FMEA, lhe fornecerá um importante documento para tomada de decisão sobre a segurança dos seus funcionários e/ou a eficiência do seu processo. Infelizmente, este é um problema comum na implementação de uma análise FMEA. (STAMATIS, 1995).

A requisição do cliente terá forte influência na motivação e performance da FMEA. Por exemplo, as maiores indústrias automobilísticas, em seus procedimentos para certificação de fornecedores, requerem um programa de FMEA (CHRYLSER, 1986, FORD, 1992, GENERAL MOTORS, 1988). Através da confiabilidade do produto, as grandes empresas também podem exigir a comprovação de alguns requisitos como, por exemplo, o nível de confiabilidade do produto e/ou serviço (BASS, 1986).

A FMEA, a partir de sua equipe de trabalho, identifica quais ações preventivas deverão ser realizadas para que os modos de falhas potenciais sejam minimizados. (PETERS, 1992).

### 1.1.3 DEA – Análise envoltória de dados

De acordo com CHARNES et al. (1994), a história da DEA se iniciou com a tese para a obtenção de grau de Ph.D. de Edward Rhodes sob a orientação de W.W. Cooper, publicada em 1978 (CHARNES et al., 1978).

A abordagem analítica rigorosa aplicada à medida da eficiência na produção teve origem com o trabalho de Pareto-Koopmans, segundo DEBREU (1951). A definição de Pareto-Koopmans para a eficiência técnica é que um vetor “input-output” é tecnicamente eficiente se e somente se:

a. Nenhum dos “outputs” podem ser aumentados sem que algum outro “output” seja reduzido ou algum “input” necessite ser aumentado;

b. Nenhum dos “inputs” possa ser reduzido sem que algum outro “input” seja aumentado ou algum “output” seja reduzido.

Segundo CHARNES et al. (1985), temos que lembrar de tratar esta definição com um conceito relativo: a eficiência de 100% é atingida por uma variável quando comparações com outras variáveis relevantes não provêm evidência de ineficiência no uso de qualquer “input” ou “output”. Esse conceito nos permite diferenciar entre estados de produção eficientes e ineficientes, mas não permite medir o grau de ineficiência de um vetor ou identificar um vetor ou uma combinação de vetores eficientes com os quais comparar um vetor ineficiente.

Esse mesmo tema foi abordado por DEBREU (1951), que introduziu uma medida radial de eficiência técnica: o coeficiente de utilização de recursos, com a qual, pode-se buscar a máxima redução equi-proporcional de todos os “inputs” ou a máxima expansão equi-proporcional de todos os outputs. A vantagem do uso deste coeficiente é que ele independe da unidade de medida de cada variável. Entretanto, a desvantagem é que um vetor “input-output” eficiente com base na medida radial de Debreu pode não ser eficiente com base na definição de Patero-Koopmans.

Segundo CHARNES et al. (1994), a formulação de problemas de medidas de eficiência como problemas de programação linear foi realizada pela primeira vez por Boles, Bressler, Seitz e Sitorus em 1966. Entretanto, foi com o empenho de Charnes e Cooper que os modelos DEA ganharam maior penetração, a partir do modelo original CCR, sigla para Charnes, Cooper e Rhodes. (CHARNES et al., 1978).

Destacam-se as seguintes características da análise DEA:

1. Difere dos métodos baseados em avaliação puramente econômica, que necessitam converter todos os “inputs” e “outputs” em unidades monetárias;

2. Os índices de eficiência são baseados em dados reais, e não em fórmulas teóricas;
3. Generaliza o método de Farrel, construindo um único “output” virtual e um único “input” virtual;
4. É uma alternativa e um complemento aos métodos de análise da tendência central e análise custo benefício;
5. Considera a possibilidade de que os “outliers” não representem apenas desvios em relação ao comportamento médio, mas possíveis “benchmarks” a serem estudados pelas demais DMUs.
6. Ao contrário das abordagens paramétricas tradicionais, a DEA otimiza cada observação individual com o objetivo de determinar uma fronteira linear por partes, que compreende o conjunto de DMUs Pareto-Eficiente.

Essas características conferem ao método uma potencialidade de resgatar a natureza essencialmente aplicada que estava presente nas origens da Pesquisa Operacional.

Segundo SEIFORD (1997), os enfoques e interesses na DEA são diversificados. Os estatísticos consideram esta técnica como um exercício em análise exploratória de dados e os engenheiros encontram na DEA uma ferramenta para melhoria da produtividade.

## 1.2 Objetivos

No presente trabalho pretende-se utilizar a FMEA de produto e com os seus resultados, obtidos a partir do Número de Prioridade de Risco, RPN, ou seja, do produto da ocorrência, severidade e detecção e aplicar um modelo baseado em DEA (GARCIA, 2001), para identificar pontos de melhoria e reduzir os níveis de risco de um sistema. Estes pontos estarão envoltos por uma fronteira de eficiência formada pelos pontos relativamente mais eficientes. Estes últimos serão considerados alvos para os pontos

críticos, ou seja, os alvos servem para auxiliar a identificar em que os pontos críticos devem melhorar para alcançarem a fronteira da eficiência. Esta técnica está sendo chamada de FMEA-DEA.

Para ilustrar essa metodologia que está sendo proposta, será apresentado um estudo de caso referente ao sistema de ar condicionado da sala de controle, ASC de uma usina nuclear.

### 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido como segue: no Capítulo 2 será apresentado o histórico da FMEA, desde a sua origem para uso militar passando pela sua trajetória até atingir a aplicação industrial e nuclear.

No Capítulo 3, serão apresentadas a análise DEA, os modelos mais importantes e o modelo para aplicação da FMEA-DEA.

No Capítulo 4, será apresentado o sistema de ar condicionado da sala de controle, ASC de uma usina nuclear: qual a sua função, quais as bases de projeto e a sua descrição operacional contendo os principais equipamentos que compõem o sistema.

No Capítulo 5, será apresentada a aplicação da FMEA no ASC de uma usina nuclear.

No Capítulo 6, será apresentada a aplicação da FMEA-DEA no ASC de uma usina nuclear: tratamos da implementação, que inclui a descrição da base de dados utilizada e do modelo DEA a ser aplicado.

No Capítulo 7, baseado nos resultados obtidos a partir da FMEA e da FMEA-DEA, serão apresentados os resultados com as respectivas conclusões e recomendações sugeridas.

## 2. FMEA – Análise de modos e efeitos de falhas

### 2.1 Histórico

A análise FMEA foi originalmente desenvolvida pelos militares do governo dos Estados Unidos da América, através do procedimento MIL-P-1629, intitulado Procedimento de Análise de Modos, Efeitos e Criticalidade de Falhas, FMECA, com data de 9 de novembro de 1949. O método foi utilizado como uma técnica de avaliação de confiabilidade para determinar como as conseqüências da falha em um componente afetam o sistema e de que forma essas as falhas podem ser evitadas. As falhas eram classificadas de acordo com o sucesso ou fracasso das missões militares e na segurança dos soldados ou dos equipamentos. (MORANO, 2003).

A idéia de que pessoas e equipamentos são substituíveis não é aplicável, por exemplo, no contexto de uma moderna linha de produção de bens de consumo. O homem está em diferentes áreas das indústrias que estabeleceram novos conjuntos de prioridades, diretrizes e padrões de si próprios. No entanto, o procedimento militar MIL-P-1629 funcionou como um modelo para amadurecer as normas militares MIL-STD-1629 e MIL-STD-1629A, que ilustram os procedimentos mais amplamente utilizados pela FMEA.

Segundo COUTINHO (1964), fora da área militar, a aplicação formal da FMEA, foi primeiramente adotada na indústria aeroespacial, onde a FMEA já estava sendo utilizada pela NASA durante o programa Apolo nos anos 60. A discussão acadêmica sobre a FMEA originou-se nos anos 60, quando estudos de falhas nos componentes foram ampliados englobando os efeitos das falhas dos componentes nos sistemas dos quais eles faziam parte. Uma das primeiras descrições de uma aproximação formal para realizar uma FMEA foi dada pela “New York Academy of Sciences.”

Em 1975, a norma IEEE 352 foi utilizada como guia dos princípios gerais da análise de confiabilidade do sistema de proteção de uma usina nuclear. Esta norma define que os objetivos de uma FMEA são de orientar aos engenheiros responsáveis pelo projeto e fabricação a utilizarem recursos que apresentem alta confiabilidade, alto

potencial de segurança e garantir que todas as modalidades possíveis de falhas e os seus efeitos estariam sendo consideradas para o sucesso operacional do sistema. A FMEA, também irá fornecer uma base de dados para análises quantitativas de confiabilidade, de disponibilidade e um histórico para servir como referência para uma futura na análise de falhas ou para eventuais mudanças do projeto (MORANO, 2003).

Conforme REIFER (1979), no final dos anos 60 e início dos anos 70, várias associações profissionais publicaram procedimentos formais para realizar as análises. A natureza genérica do método, junto com a rápida divulgação da FMEA para as diferentes áreas de aplicação e as várias práticas, fundamentalmente utilizando o mesmo método de análise, difundiram a FMEA rapidamente pela indústria.

Juntamente com a revolução digital, a FMEA foi aplicada em análises de “softwares” baseados em sistema e um dos primeiros artigos relativos da FMEA em “software,” SWFMEA é o de REIFER (1979).

Segundo RABBITT (1998), no início dos anos 80, as indústrias automotivas americanas começaram a incorporar formalmente a FMEA no desenvolvimento de seus novos produtos e processos. Uma equipe de trabalho representando a “Chrysler Corporation”, a “Ford Motor Company” e a “General Motors” desenvolveu a norma QS-9000 em uma tentativa de padronizar seus fornecedores em sistemas da qualidade.

Conforme DANIELS et al. (2002), a norma para gerenciamento de qualidade QS-9000, correntemente está sendo substituída pela Especificação Técnica, TS 16949, conhecida também por ISO/TS 16949: a ISO, sendo um sistema internacional de gerenciamento da qualidade para especificações técnicas, inclui também a exigência para a utilização da ISO 9001:2000 para a indústria automotiva. A ISO/TS 16949 está em sua segunda edição. A norma TS 16949 especifica a FMEA como um dos documentos necessários para um fornecedor submeter uma peça/produto à aprovação da montadora.

Segundo Carlson, W. D., da “Chrysler Corp.,” McCullen, L. R., da “General Motors Corp.” and Miller, G. H., da “Ford Motor Co.,” (CARLSON et al., 1995), no início de 1993, os fornecedores de peças para a “Big Three,” também conhecidos por Fabricantes

de Equipamentos Originais, OEMs, foram solicitados a relatar os resultados de suas análises de FMEA em diferentes formas para cada representante da “Big Three.” Isto resultava em adição de custo desnecessário. Reconhecendo isto, os fornecedores e OEMs da “Big Three” decidiram que seria um benefício para todos adotarem um formato de relatório de FMEA, definições e classificações de tabelas comuns a todos. Os esforços comuns iniciados com a criação do Manual FMEA “Big Three” foram desenvolvidos pela “Chrysler, Ford e General Motors,” sob os auspícios da Sociedade Americana para Controle de Qualidade, ASQC e o Grupo de Ação da Indústria Automotiva, AIAG. Os OEMs revisaram os seus documentos internos, incluindo material de referência para a FMEA, sendo que o manual de referência da “Ford” de 1988 foi selecionado com base para a coordenação do Manual da FMEA adotado pelo “Big Three.” O primeiro documento deste trabalho em conjunto, incluindo os representantes de trabalho de três OEMs e três fornecedores representativos, “Bosch, Goodyear e Kelsey-Hayes,” foi publicado em 1993 e era mencionado como Manual de Referência 1993 FMEA.

Em 1994, o “Big Three” desenvolveu desde o início os esforços para atualizar a tabela de classificação e esclarecer algumas definições. Os resultados destes esforços foram transmitidos no manual de referência SAE J1739 - Análise de Modos e Efeitos de Falhas Potenciais em Projeto - FMEA de produto - e Análise de Modos e Efeitos de Falhas Potenciais no processo de fabricação e montagem - FMEA de Processo. O início da publicação do Procedimento SAE J1739 deu-se através do SAE para servir à indústria automotiva global, para reconhecer e ser responsável pela distribuição. (CARLSON et al., 1995).

## 2.2 FMEA: uma visão geral

A FMEA é uma técnica de engenharia utilizada para definir, identificar e eliminar as falhas conhecidas e/ou potenciais, problemas, erros no sistema, projeto, processo e/ou serviço antes que estes alcancem o cliente (OMDAHL, 1988, ASQC, 1983).

Segundo STAMATIS (1989, 1991a, 1992), as análises desta avaliação podem tomar dois cursos de ação. O primeiro utilizando dados históricos, que também podem



ser analisados de dados, produtos e/ou serviços similares, dados de garantia, reclamação de clientes e qualquer outra informação apropriada disponível para definir falhas. O segundo, utilizando inferência estatística, modelagem matemática, simulação, um grupo de engenharia e engenharia de confiabilidade podem ser utilizados para identificar e definir as falhas. Usando um destes caminhos, não significa que um seja melhor do que o outro, ou que um seja mais exato do que o outro. Os dois podem ser eficientes, exatos, corretos se feitos e aplicados apropriadamente.

Segundo KECECIOGLU (1991), qualquer FMEA conduzida apropriadamente irá fornecer aos profissionais informações úteis que podem reduzir os riscos, sobrecarga no sistema, projeto, processo e serviço. Isso porque a FMEA é uma análise de falhas potenciais progressiva e lógica que permite que as etapas sejam desenvolvidas efetivamente. A FMEA é uma das mais importantes ações preventivas no sistema, projeto, processo ou serviço com o qual poderá prevenir falhas e erros atendendo à expectativa do cliente.

Esta garantia e técnica preventiva fornece ao projetista um caminho metódico para estudar as causas e efeitos antes do sistema, projeto, processo ou serviço ser finalizado. Em essência, a FMEA fornece um método sistêmico, examinando todos os caminhos pelos quais a falha pode ocorrer. Para cada falha, uma estimativa é feita do seu efeito no sistema total, projeto, processo ou serviço, da sua severidade, da sua ocorrência – frequência – e da sua detecção.

A prioridade dos perigos é articulada via RPN. Este número é o produto da ocorrência, severidade e detecção. Este valor, por si só, deverá ser utilizado somente para ordenar a classificação de perigos ao sistema, projeto, processo ou serviço. Os RPNs não tem outro valor ou significado. (FORD, 1992).

A FMEA irá identificar as ações corretivas requeridas para prevenir que as falhas atinjam o cliente, dessa forma, garantindo maior durabilidade, qualidade e possível confiabilidade no produto ou serviço.

Uma boa FMEA:

1. Identifica modos de falha potenciais;
2. Identifica as causas e os efeitos de cada modo de falha;
3. Prioriza os modos de falha identificados de acordo com o RPN;
4. Fornece ações corretivas e um acompanhamento do problema.

Segundo STAMATIS (1995), para obter a satisfação do cliente, a qualidade dos produtos de serviços deve ter prioridade número um. A sua missão é a de melhorar a satisfação do cliente através do melhoramento contínuo – eliminar, reduzir falhas, erros, custos, erro humano e assim por diante – em qualidade. Estas medidas, às vezes chamadas de indicadores, características significativas ou críticas, são numerosas e em alguns casos não amplamente conhecidas.

Quando começa a FMEA? Conforme citado acima, a FMEA é uma metodologia para maximizar a satisfação do cliente eliminando ou reduzindo as falhas conhecidas ou potenciais. Para isto, a FMEA deverá começar o quanto antes, mesmo que todos os fatos e informações não sejam conhecidos ainda e deverá ser focado no lema:

“Faça o melhor que você possa, com o que você tem.” (STAMATIS, 1995, p.29)

Existe realmente uma melhor hora para começar? Sim. A FMEA deve começar tão logo quanto as informações sobre o projeto sejam conhecidas, normalmente através da Preparação da Prática da Qualidade, QFD. Os profissionais não devem esperar por todas as informações. Se eles o fizerem, nunca realizarão uma FMEA porque eles nunca terão todos os dados ou informações. Certamente, com as informações preliminares, alguns sistemas inacabados ou definições de projeto, já é possível iniciar uma FMEA. (STAMATIS, 1995).

Especificamente, a FMEA deverá começar:

1. Quando novos sistemas, projetos, produtos ou serviços são iniciados;
2. Quando existirem sistemas, projetos, produtos, processos ou serviços que são submetidos à mudança sem consideração da causa;

3. Quando novas aplicações são encontradas para as condições existentes dos sistemas, projetos, produtos, processos ou serviços;
4. Quando aperfeiçoamentos são considerados para os sistemas, projetos, produtos, processos ou serviços já existentes.

STAMATIS (1995), também escreveu que, lembrando que o desfecho da FMEA é para ajudar a traçar o caminho para um melhoramento contínuo, como tal, a FMEA pode ser iniciada em qualquer momento entre a concepção do sistema, fabricação ou fornecimento de serviço, conforme mostrado na Figura 2.1.

Depois de iniciada a FMEA, ela torna-se um documento vivo e nunca estará realmente finalizado. Esta é uma ferramenta dinâmica de aperfeiçoamento e melhoria contínua, porque, relembrando a fase inicial, todas estas informações serão utilizadas para aperfeiçoar o sistema, projeto, produto, processo ou serviço. Ele é atualizado continuamente tão frequentemente quanto necessário for. (STAMATIS, 1995).

Quando a FMEA é considerada como concluída? Especificamente, a FMEA pode ser considerada finalizada quando todas as ferramentas estiverem definidas e o projeto for declarado finalizado, quando a liberação da data para a produção for marcada, ou quando todas as operações forem identificadas, avaliadas e todas as características críticas e significativas forem consideradas no plano de controle. É importante notar que embora a FMEA seja declarada como finalizada ou concluída, a qualquer momento ela pode ser revisada, avaliada e/ou consultada para aperfeiçoamento do sistema, projeto, produto, processo ou serviço, enquanto estes estiverem em andamento. (STAMATIS, 1995).

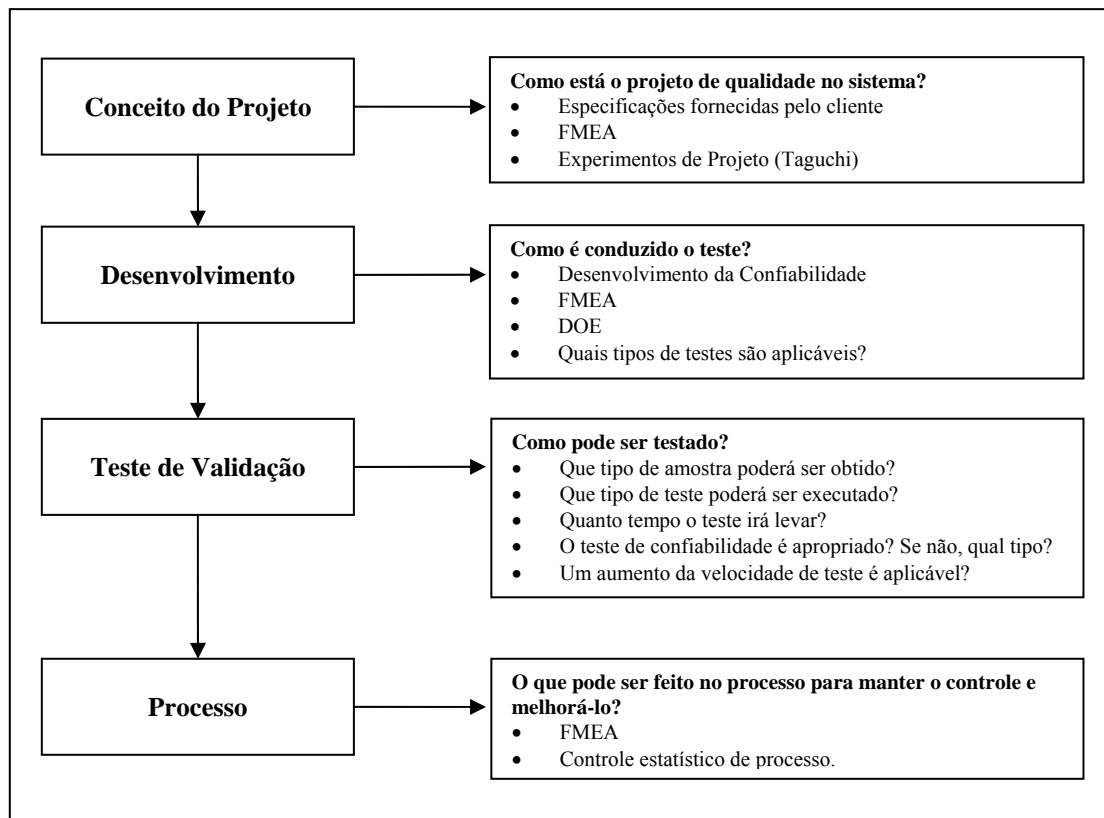


Figura 2.1 – O caminho para a engenharia de produto e a FMEA. (STAMATIS, 1995)

Pode a FMEA ser descartada? Em caso afirmativo, como? Quando? A resposta é sim, dependendo das relações entre a organização e o cliente ou fornecedor, entretanto, existem diferentes diretrizes a serem seguidas, que também não são universais ou já definidas, a não ser que uma indústria ou órgão responsável já tenha definido as suas próprias regras. Por exemplo, na indústria nuclear, o histórico deverá ser mantido durante toda a vida útil da usina mas em algumas diretrizes da indústria automotiva a FMEA deve ser mantida enquanto o produto está em fase de produção. Como regra geral, a FMEA deverá estar disponível durante toda a vida útil do produto. (STAMATIS, 1995).

Segundo STAMATIS (1991b), quem deve conduzir a FMEA deverá ser uma equipe funcional e não somente um indivíduo. A equipe deverá ser definida apropriadamente para um projeto específico e não pode servir como uma equipe FMEA universal ou da companhia. O conhecimento que é requerido para o problema específico é único para aquele problema. Portanto, a distribuição da equipe deverá ser multifuncional e multidisciplinar para cada FMEA.

Segundo STAMATIS (1995), na interpretação da FMEA, a sua essência é identificar e impedir que problemas conhecidos ou potenciais cheguem ao cliente. Para tal, é necessário fazer algumas suposições, com as quais os problemas têm diferentes prioridades, e então, a metodologia irá auxiliar a descobrir qual é a prioridade mais importante e o seu impacto. Existem 3 (três) indicadores que ajudam a definir a prioridade dos eventos com falhas potenciais:

- Ocorrência;
- Severidade;
- Detecção.

Ocorrência é a frequência da falha, Severidade é a gravidade, ou os efeitos da falha e a Detecção é a capacidade de detectar a falha antes que ela alcance o cliente. Existem muitos caminhos para identificar os valores destes indicadores. O caminho usual é o de utilizar escalas numéricas, chamadas de linhas guia do critério de risco, sendo que estas linhas-guia podem ser qualitativas ou quantitativas.

Se a linha-guia for qualitativa, deverá seguir a teoria esperada de funcionamento do componente. Por exemplo, no caso da ocorrência, o funcionamento esperado é a normalidade, porque as frequências acima do tempo agem em um modo normal. Desta forma, a linha guia deveria seguir a distribuição normal. No caso da severidade, o funcionamento esperado é lognormal, porque as falhas que deveriam ocorrer são da categoria das indesejadas, críticas ou catastróficas. Dessa forma a linha guia deveria seguir uma distribuição que inclinasse para a direita – positivamente inclinada. Já no caso da detecção, o funcionamento esperado é o da distribuição discreta, porque existe um interesse maior se a falha for encontrada pelo cliente, ao contrário de encontrar a falha dentro da organização. Por essa razão, existe um resultado discreto – organização interna x cliente – na detecção. Desta forma, a linha guia deverá seguir a distribuição com os limites dentre os valores encontrados.

Se a linha guia for quantitativa, este deverá ser especificada seguindo os dados atuais, dados de controle estatístico de processo, dados históricos, dados substitutos ou similares para a avaliação. A linha guia não tem que seguir um funcionamento teórico,

ou seja, se seguir, é estritamente uma coincidência. A Tabela 2.1 demonstra algumas formas de selecionar as linhas guia.

A ordenação para o critério pode ter qualquer valor, pois não existe um padrão para cada valor, entretanto, existem duas classificações muito comuns utilizadas em todas as indústrias nos dias atuais. Uma das ordenações é baseada numa escala de 1 a 5 e a segunda baseada numa escala de 1 a 10. A ordenação de 1 a 5 é limitada naturalmente, mas oferece a vantagem de ser de fácil interpretação. Ela não fornece uma sensibilidade, uma precisão específica de quantificação, porque reflete uma distribuição uniforme. A ordenação de 1 a 10 é mais amplamente utilizada, e de fato, é recomendada porque é de fácil interpretação e é de maior precisão na quantificação da ordenação. As ordenações maiores do que uma escala de 1 a 10, não são recomendadas porque são de difícil interpretação e acabam perdendo a sua eficiência.

Tabela 2.1 – Critérios para seleção da classificação. (STAMATIS, 1995).

<b>Se</b>	<b>Então use</b>	<b>Selecione</b>
<p>O sistema é similar a outros ou os dados históricos existem</p> <p>Histórico de falhas do sistema em si está disponível, tem similar, ou substituto</p> <p>O sistema é novo e/ou não tem nenhum dado disponível ou determinado</p>	<p>Dados estatísticos do histórico ou sistema substituto: Dados de confiabilidade, distribuição atual, modelagem matemática, simulação</p> <p>Dados históricos baseados na confiabilidade, sistema, distribuição atual, modelagem matemática, simulação, dados cumulativos</p> <p>Julgamento da equipe</p>	<p>Dados atuais e/ou Cpk</p> <p>Dados atuais e/ou números de falhas acumulados</p> <p>Critério subjetivo. A equipe alcança um consenso conservativo</p>
<p>O projeto é similar a outros ou os dados históricos existem</p> <p>Histórico de falhas do projeto em si está disponível, tem similar, ou substituto</p> <p>O projeto é novo e/ou não tem nenhum dado disponível ou determinado</p>	<p>Dados estatísticos do histórico ou sistema substituto: Dados de confiabilidade, distribuição atual, modelagem matemática, simulação</p> <p>Dados históricos baseados na confiabilidade, sistema, distribuição atual, modelagem matemática, simulação, dados cumulativos</p> <p>Julgamento da equipe</p>	<p>Dados atuais e/ou Cpk</p> <p>Dados atuais e/ou números de falhas acumulados</p> <p>Critério subjetivo. A equipe alcança um consenso conservativo</p>

Tabela 2.1 – Continuação.

<b>Se</b>	<b>Então use</b>	<b>Selecione</b>
<p>O serviço está sob o Controle Estatístico de Processo</p> <p>O serviço é similar a outros ou os dados históricos existem</p> <p>Histórico de falhas do serviço em si está disponível, tem similar, ou substituto</p> <p>O serviço é novo e/ou não tem nenhum dado disponível ou determinado</p>	<p>Dados estatísticos: simulação</p> <p>Dados estatísticos do histórico ou sistema substituto: Dados de confiabilidade, capacidade do processo, distribuição atual, modelagem matemática, simulação</p> <p>Dados históricos baseados na confiabilidade, processo, distribuição atual, modelagem matemática, simulação, dados cumulativos</p> <p>Julgamento da equipe</p>	<p>Dados atuais e/ou Cpk</p> <p>Dados atuais e/ou Cpk</p> <p>Dados atuais e/ou números de falhas acumulados</p> <p>Critério subjetivo. A equipe alcança um consenso conservativo</p>
<p>O processo está sob o Controle Estatístico de Processo</p> <p>O processo é similar a outros ou os dados históricos existem</p> <p>Histórico de falhas do processo em si está disponível, tem similar, ou substituto</p> <p>O processo é novo e/ou não tem nenhum dado disponível ou determinado</p>	<p>Dados estatísticos: Dados de confiabilidade, capacidade do processo, distribuição atual, modelagem matemática</p> <p>Dados estatísticos do histórico ou sistema substituto: Dados de confiabilidade, distribuição atual, modelagem matemática, simulação</p> <p>Dados históricos baseados na confiabilidade, sistema, distribuição atual, modelagem matemática, simulação, dados cumulativos</p> <p>Julgamento da equipe</p>	<p>Dados atuais e/ou Cpk</p> <p>Dados atuais e/ou Cpk</p> <p>Dados atuais e/ou números de falhas acumulados</p> <p>Critério subjetivo. A equipe alcança um consenso conservativo</p>



### 2.3 FMEA: a análise

Segundo STAMATIS (1995), a FMEA é uma análise disciplinada de identificação de modos de falha conhecidos ou potenciais fornecendo o acompanhamento e ações corretivas antes de ocorrer a primeira corrida da produção. A primeira corrida de produção é assistida como a corrida que gera um produto ou serviço para um cliente específico. Esta definição para a primeira corrida é muito importante porque ela exclui a Corrida de Amostra Inicial, ISR, que é uma corrida de teste, uma corrida protótipo e assim por diante. O começo da primeira corrida de produção é importante porque acerta o ponto modificando e/ou alterando o projeto sem maiores problemas. Depois desta etapa, entretanto, o cliente torna-se envolvido através das cartas de desvio, o respectivo documento de mudança ou alguma outra notificação formal.

A FMEA de produto ou projeto normalmente é acompanhada através de uma série de etapas incluindo componentes, sistemas, subsistemas e montagem. É também, um processo evolucionário, dinâmico, envolvendo a aplicação de várias tecnologias e métodos. Este resultado será utilizado como uma entrada para um processo ou montagem, e/ou a FMEA de serviço, conforme demonstrado nas Figuras 2.2, 2.3 e 2.4.

As seleções das tecnologias apropriadas podem incluir a utilização de sistema(s) existente(s), aproximações padronizadas correntemente conhecidas ou propostas, resultados de pesquisa direcionada, resultados de uma análise FMEA, ou uma combinação de todos estes fatores.

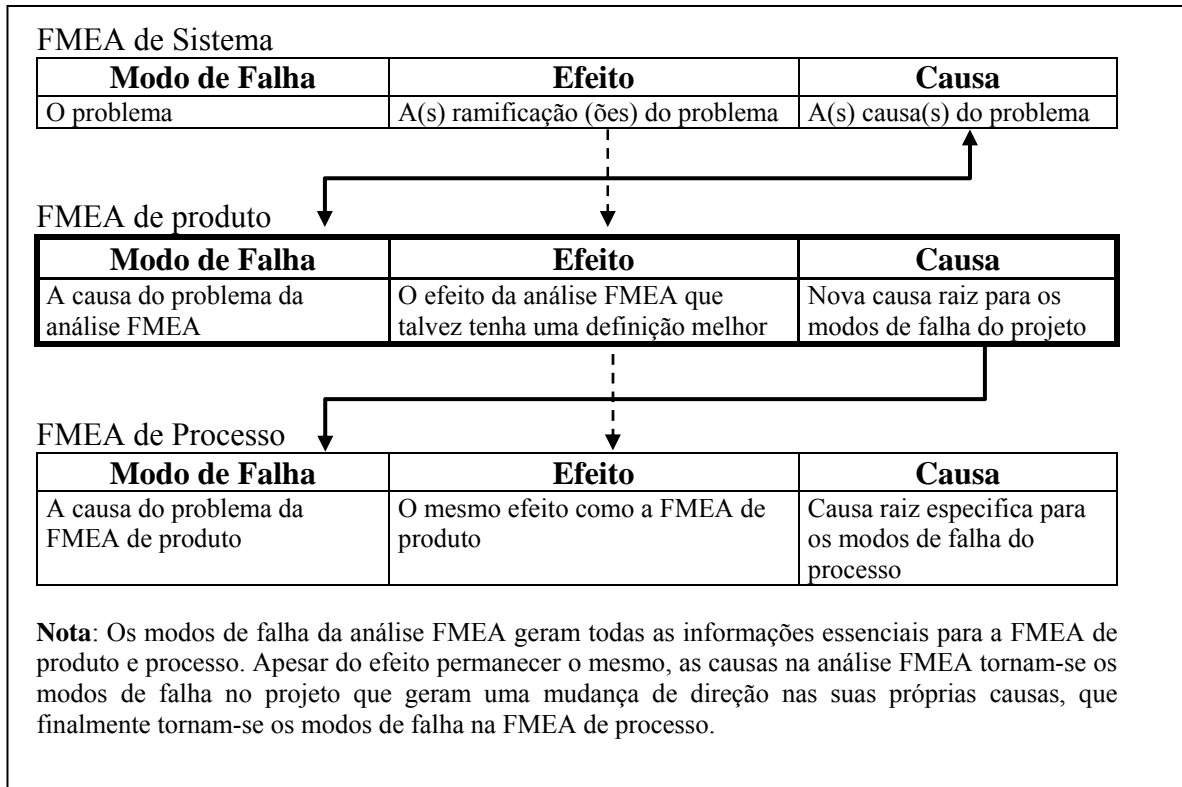


Figura 2.2 - Conexão entre a FMEA de processo, projeto e sistema. (STAMATIS, 1995, p.102).

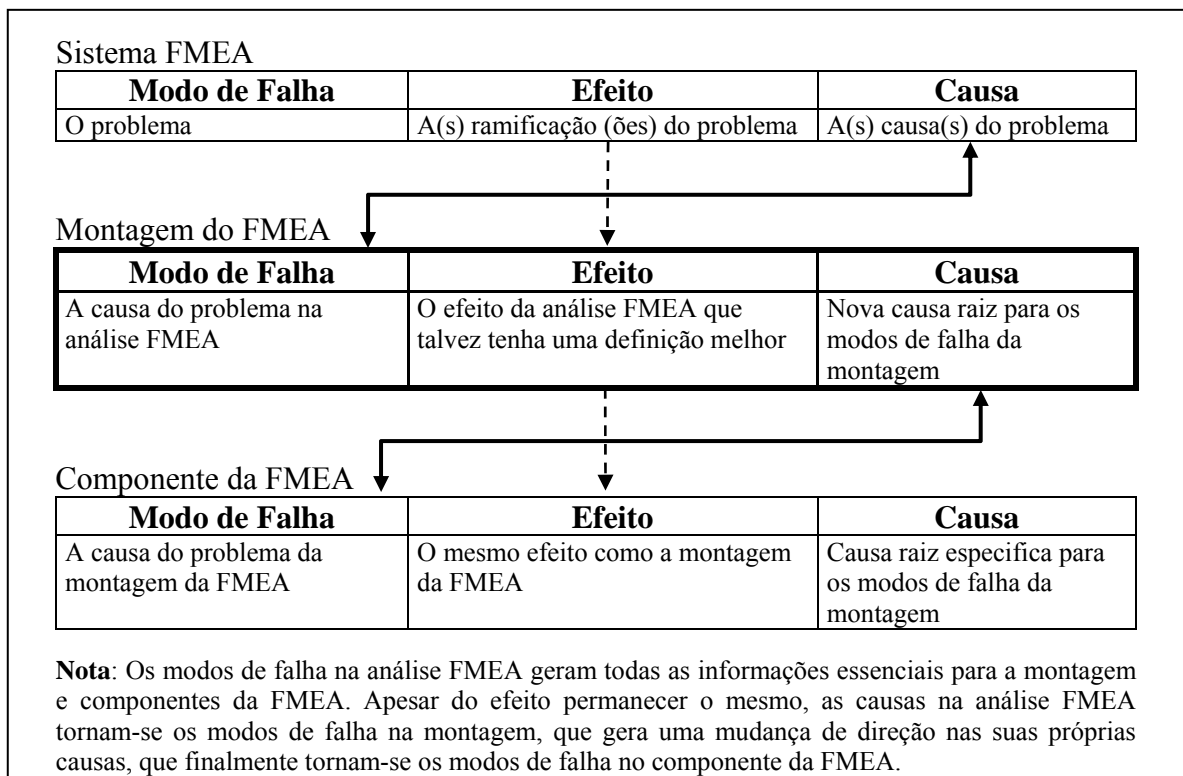


Figura 2.3 - Conexão entre o sistema, montagem e componente da FMEA. (STAMATIS, 1995, p.103).

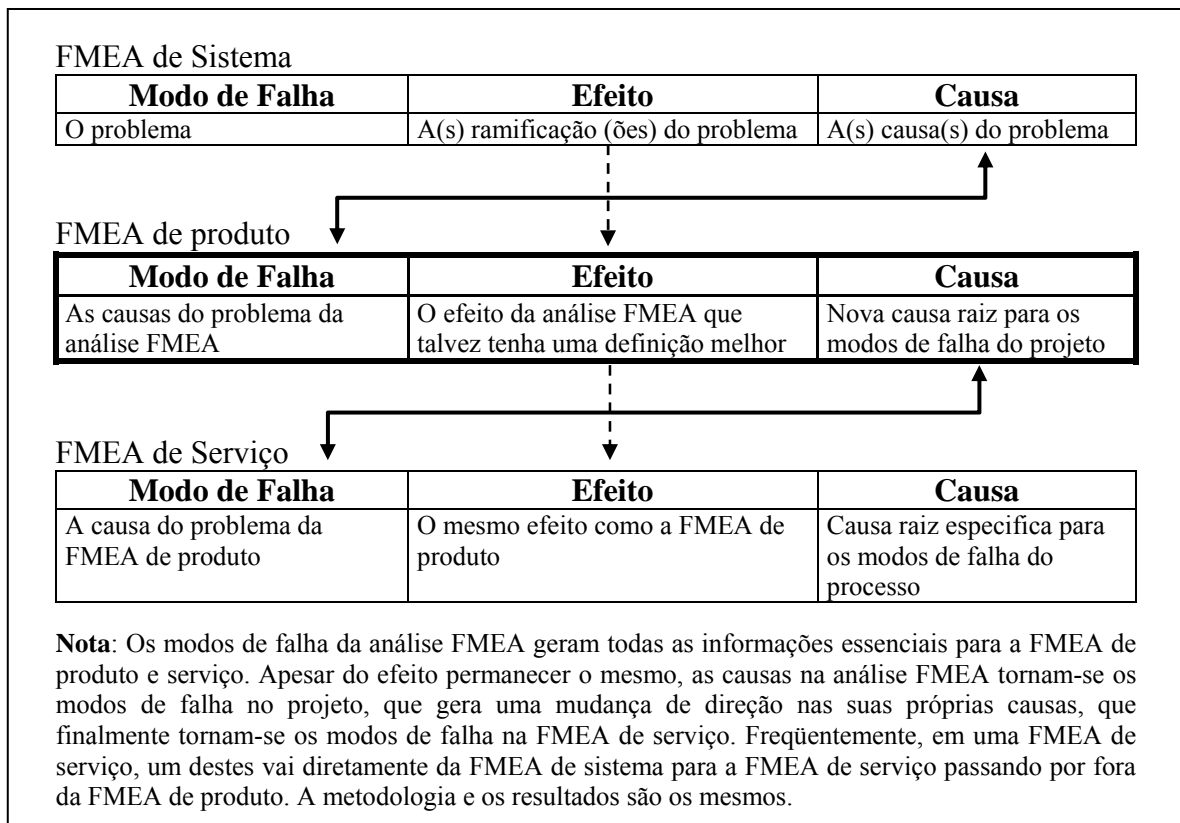


Figura 2.4 - Conexão do sistema, projeto e serviço FMEA. (STAMATIS, 1995, p.104).

Segundo BLANCHARD (1986), o resultado esperado da FMEA de produto é basicamente alcançado através de sistemas de engenharia de processo, desenvolvimento de produto, pesquisa e desenvolvimento, “marketing,” fabricação ou a combinação de todos estes itens. O foco neste estágio é minimizar os efeitos da falha nos sistemas, lembrando em qual nível a FMEA está sendo realizada.

Isto pode ser executado através das definições de especificações de projeto, com os quais, podem incluir:

- i. Escopo do projeto;
- ii. Documentos aplicáveis:
  - a. Procedimentos;
  - b. Documentos de garantia e segurança;

c. Documentos dos produtos principais ou similares.

iii. Informações gerais:

- a. Funções do produto;
- b. Entendimento de como é o cliente;
- c. Necessidades e expectativas do cliente;
- d. Entendimento das práticas e as más práticas do cliente.

iv. Exigências:

a. Exigências de projeto:

- 1. Elétrico;
- 2. Mecânico;
- 3. Confiabilidade;
- 4. Vida útil;
- 5. Segurança;
- 6. Material;
- 7. Meio Ambiente;
- 8. Controles;
- 9. Padronização dos componentes.

b. Considerações de manutenção;

c. Custo objetivo;

d. Alternativas de projeto;

e. Sistemas críticos.

v. Garantia do produto:

a. Exigências de documentação;

b. Exigências de inspeção e teste;

c. Exigências de operação e transporte.

A meta, proposta e/ou objetivo da FMEA de produto é definir e demonstrar as soluções de engenharia em resposta às exigências funcionais como definido pela análise FMEA e o cliente.

Conforme STAMATIS (1995), para concluir este objetivo, a FMEA de produto deve basear-se em exigências, necessidades e nas expectativas do cliente. Como uma regra geral, esta informação pode ser o resultado da Preparação da Prática da Qualidade, QFD, uma necessidade interna para melhoria, ou o resultado de uma FMEA. Deverá ser incluído como uma das primeiras etapas da FMEA, uma análise de custo-benefício definindo as soluções úteis para os problemas já conhecidos. O objetivo deste estágio inicial é para maximizar o sistema de qualidade, confiabilidade, custo e manutenibilidade, independente de qual nível a FMEA esteja sendo realizada. Isto pode ser acompanhado através das seguintes considerações:

1. Transformar uma necessidade operacional do cliente em uma descrição dos parâmetros de performance do sistema, utilizando processos interativos de uma análise funcional, resumos, otimização de processos ou de dados, definições, projetos, revisão de projetos, testes e avaliações;
2. Integrar os parâmetros técnicos relacionados entre si e garantir que todas as compatibilidades físicas, funcionais e as interfaces do programa otimizem a definição total do projeto ou sistema;
3. Integrar confiabilidade, manutenibilidade, suporte de engenharia, fatores humanos, segurança, meio ambiente, integridade estrutural e produção, entre outros fatores relativos às especialidades no emprego da engenharia.

O resultado da FMEA de produto será um projeto preliminar, que pode ser alterado com informações novas ou modificações, e que tem uma configuração definida e especificações funcionais propícias traduzindo as exigências estabelecidas nos processos qualitativos e quantitativos detalhados, características de serviço ou montagem. Alguns dos assuntos gerais importantes em uma FMEA de produto são:

- i. Assuntos Gerais:

- a. Projeto e exigências operacionais definidos;
- b. Fatores de capacidade estabelecidos;
- c. Concepção do projeto de manutenção definido.

ii. Elementos de Suporte:

Nesta área, um dos elementos da equipe deve fazer uma investigação para identificar se as exigências são conhecidas e/ou podem ser otimizadas para:

- a. Testes e assistência técnica de equipamentos;
- b. Pessoal e treinamento;
- c. Reparo e peças sobressalentes.

iii. Características de projeto:

- a. Padronização;
- b. Acessibilidade;
- c. Comunicação;
- d. Segurança;
- e. Provisões de testes;
- f. Controles;
- g. Transporte;
- h. Confiabilidade;
- i. Permutabilidade;
- j. Dados técnicos;
- k. Produção;
- l. Software.

Questões específicas no decorrer do desenvolvimento da FMEA de produto podem ser:

1. O que o produto faz e quais são as suas utilidades pretendidas?
2. Como é medida a performance do produto? É funcional?

3. Quais as matérias primas e quais componentes são utilizadas para construir o produto?
4. Como e sob quais condições é a interface do produto com outros produtos?
5. Que produtos são criados pelo produto ou são usados pelo produto?
6. Como o produto é utilizado, conservado, reparado e descartado no final da sua vida útil?
7. Quais são as etapas de fabricação na produção do produto?
8. Quais fontes de energia estão envolvidas e como?
9. Quais são as capacidades e limitações distintas do produto?

Após todos os estudos serem concluídos, assume-se pela equipe que está conduzindo a análise, que estão trabalhando com um produto dentro das especificações de segurança, projeto, processo e qualidade exigidos pelo cliente e por regulamentos governamentais.

### 2.3.1 Passo a passo na análise da FMEA

Segundo STAMATIS (1993), tradicionalmente, vêm sendo utilizados dois métodos para o projeto: exigências de projeto-por-custo e projeto-para-cliente. Na aproximação do projeto-por-custo, o objetivo do projetista é desenvolver o projeto no limite de custo. Esta aproximação é chamada de análise de valor de engenharia e está além do escopo desta dissertação. Na aproximação das exigências no projeto-para-cliente, o projetista dá ao cliente o que ele deseja com a adição de exigências para satisfazer os regulamentos, documentos de segurança ou qualquer outro critério que seja visto como apropriado para o projeto. Este segundo método será adotado nesta dissertação.

Existem duas exigências para a performance da FMEA de produto. A primeira é a identificação da forma adequada e a segunda é a identificação das diretrizes da avaliação. (STAMATIS, 1995).

A planilha para a FMEA de produto não é universal, e não é padronizada. Cada companhia tem a sua própria tabela da análise FMEA para refletir as necessidades da organização e as informações importantes dos clientes. Na indústria automotiva,

entretanto, os esforços têm sido bem sucedidos e em 1º de julho de 1993, uma forma padronizada e um procedimento foram publicados pela AIAG.

As avaliações das diretrizes não são universais e não são padronizadas. Cada indústria tem sua própria diretriz para refletir a necessidade da organização, o produto e as expectativas dos clientes.

Geralmente, a avaliação das diretrizes segue dois caminhos. O primeiro é qualitativo e o segundo, quantitativo. Em ambos os casos, o valor numérico pode ser de 1 a 5 ou de 1 a 10, sendo o segundo intervalo mais comum.

A Figura 2.5 mostra a planilha mais comum da FMEA de produto. A planilha é dividida em três partes. A primeira contempla do item 1 ao 10, que serão listados abaixo e que dizem respeito ao começo da FMEA. Nenhum dos itens é obrigatório, entretanto eles adicionam informações à FMEA de produto e fornecem informações essenciais que podem ser necessárias no seu decorrer.

A segunda parte da planilha, contempla do item 11 ao 24. Esses itens são obrigatórios para qualquer FMEA. A ordem das colunas pode ser alterada, mais colunas podem ser adicionadas, mas nenhuma das colunas presentes pode ser removida. Os itens 11 ao 24 podem ser vistos como o corpo da FMEA.

A terceira parte do formato, contempla os itens 25 e 26. No entanto, eles não são obrigatórios, apenas refletem a autoridade e a responsabilidade da equipe em comprometer-se com o projeto da FMEA. As assinaturas podem ser vistas como o fechamento da FMEA. Abaixo, segue o detalhamento de todos os itens e os números em parêntesis são os códigos identificados do formato da Tabela 2.2.

Identificação do Sistema Auxiliar (1). Identifica o nome do sistema auxiliar ou a identificação do título da FMEA.

Responsabilidade do Projeto (2). Nome do responsável pela organização, divisão ou departamento que possui a responsabilidade pelo projeto do sistema. Pessoa



responsável (2A). Às vezes isto é necessário para nomear a pessoa responsável pelo projeto do sistema.

Envolvimento de Outras Áreas (3). Nome de outras pessoas ou atividades (dentro da organização) que afetam o projeto do sistema.

Envolvimento de Fornecedores ou Outros (4). Identifica outras pessoas, fornecedores e/ou unidades, podendo ser externos à organização, que afetam o projeto ou estão envolvidas no projeto, produção ou montagem, ou serviço do sistema.

Modelo ou Produto (5). Nome do modelo e/ou produto usado no sistema.

Tabela 2.2 - Planilha para a FMEA de produto. (STAMATIS, 1995, p. 131).

(1) Identificação do Sistema: \_\_\_\_\_ (4) Envolvimento de Fornecedores: \_\_\_\_\_ (8) Data da FMEA: \_\_\_\_\_  
 (2) Responsabilidade do Projeto: \_\_\_\_\_ (5) Modelo/Produto: \_\_\_\_\_ (9) Data da Rev. FMEA: \_\_\_\_\_  
 (2A) Pessoa responsável: \_\_\_\_\_ (6) Data de Liberação da Engenharia: \_\_\_\_\_ (10) Nome do Componente: \_\_\_\_\_  
 (3) Envolvimento de Outras Áreas: \_\_\_\_\_ (7) Preparado por: \_\_\_\_\_ Página \_\_\_\_ de \_\_\_\_ páginas

Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação					
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN	
(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)				
<b>Conquista da equipe</b>																	

(25) Assinaturas de aprovação \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

(26) Assinaturas de conformidade \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Data de Liberação da Engenharia (6). Identificar a data (dia-mês-ano) em que o produto está marcado para ser liberado.

Preparado por (7). Geralmente, o nome do engenheiro projetista responsável pela FMEA é identificado. Às vezes, informações adicionais também são escritas, tais como:

- i. Número do telefone do engenheiro projetista do sistema;
- ii. Setor/departamento do engenheiro projetista do sistema;
- iii. Atividade da organização (em outras palavras, divisão, departamento);
- iv. Membros da equipe (nome, telefone, ramal, setor, e assim por diante).

Data da FMEA – Original (8). Escrever a data (dia-mês-ano) do início da FMEA de produto.

Data da FMEA – Revisão (9). Escrever a data (dia-mês-ano) da última revisão.

Nome do Componente (10). Identificar o nome ou número da peça/equipamento. Normalmente é escrito o número do desenho de engenharia da última revisão.

Função do Projeto do Componente (11). O engenheiro escreve a intenção, proposta, meta ou o objetivo do componente do projeto. A finalidade do projeto deverá ser obtida através das necessidades do cliente, objetivos e expectativas. Tipicamente, são incluídas exigências de segurança, regulamentos governamentais e outros documentos internos ou externos inerentes à organização.

Geralmente, estas necessidades, objetivos e expectativas são definidas através de uma Preparação da Prática da Qualidade, QFD, onde incluem várias outras considerações. Algumas destas considerações são o resultado de reuniões formais discutindo a responsabilidade do produto por toda a sua vida útil, termos de garantia, normas industriais, e/ou requisitos específicos do cliente.

Para o projeto ser eficiente, este deverá ser identificado em detalhes através de uma documentação que seja concisa, exata e de fácil entendimento, ou também pode ser

identificado por um diagrama de blocos funcional, com o qual mostrará os elementos do sistema como blocos funcionais e então o sistema poderá ser decomposto. Isto é importante para observar que o objetivo do diagrama de blocos funcional é mostrar a maioria dos elementos do sistema e para entender como essa interação de todos os elementos afeta o sistema entre si e por outros elementos externos ao sistema.

Se uma declaração é usada para descrever uma finalidade, esta finalidade deverá ser escrita em termos específicos. Para facilitar isto, o relator da FMEA deverá tentar pensar em verbos de ação e substantivos apropriados. Os verbos de ação definem a performance e a performance define a finalidade. A combinação dos verbos de ação com os substantivos definem a conexão; conseqüentemente, a identificação do processo torna-se mais fácil. Isto pode ser facilitado através de uma atividade à parte com um quadro de trabalho conforme o exemplo da Tabela 2.3.

Exemplos de função de projeto do componente:

- i. Realizar a união dos componentes;
- ii. Fornecer o tempo estimado de montagem;
- iii. Facilitar a fabricação;
- iv. Fornecer a indicação de vibração.

Modo de Falha Potencial (12). O problema. A preocupação. A falha. O defeito. A oportunidade de melhoria. Quando for considerado um modo de falha potencial, um dos membros da equipe deve pensar na perda da função do projeto—uma falha específica. Quanto mais específica, melhor será a oportunidade de identificar os efeitos e as causas da falha. A falha de projeto ocorre quando um produto não está adequadamente protegido contra o risco de avaria, falha no sistema de segurança, ou falhas para minimizar as conseqüências evitáveis em um acidente.

Para cada função de projeto identificada no item 11, deverá ser listada a falha correspondente. Pode existir mais de uma falha para cada função. Para ajudar a identificar o modo de falha potencial, um dos membros da equipe deve pensar na negação ou na perda de função.

Tabela 2.3 - Quadro de trabalho de avaliação da função. (STAMATIS, 1995, p. 134)

Nome do projeto: \_\_\_\_\_

Escopo de elemento(s) chave: \_\_\_\_\_

Restrições de projeto: \_\_\_\_\_

Número do desenho: \_\_\_\_\_ Número da Equipe: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Lista de Funções			Básicas	Secundárias	Especificações	
					Exigências de produto	
No.	Verbo	Substantivo			Quanto custa? Quando?	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

Exemplos correspondendo à falha incluem:

- i. Falha em abrir;
- ii. Peças inadequadas;
- iii. Sem pressão;
- iv. Componente quebrado;
- v. Peça com vazamento;
- vi. Corrosão;
- vii. Sem controle na velocidade.

Outro caminho para identificar a antecipação do modo de falha empregado: Como este sistema, projeto, componente, sistema auxiliar ou processo pode falhar? Pode ocorrer quebra, desgaste, ou alguma outra coisa? A ênfase está no engenheiro, que

deverá tentar antecipar a possibilidade de falha no início do projeto, identificando se o componente irá ou não falhar. Outro caminho para identificar os modos de falha é através da Análise por Árvore de Falhas, FTA, que pode ser realizada antes de iniciar a FMEA.

Efeito(s) de Falha(s) Potencial(is) (13). Um efeito de falha potencial é a consequência desta falha no próximo projeto, sistema, produto, cliente, e/ou regulamentos governamentais. As questões normalmente são: o que a experiência do cliente descreve como o resultado deste modo de falha? O que acontece ou, qual(is) é(são) a(s) ramificação(ões) desta falha? A consequência pode ser para o próprio projeto, produto, cliente e/ou regulamentos governamentais. Frequentemente, o efeito de falha é identificado pela perspectiva ou experiência do cliente.

Para identificar os efeitos potenciais, alguns dos documentos que podem ser consultados são:

- i. Dados históricos;
- ii. Documentos de garantia;
- iii. Dados do serviço de campo;
- iv. Estudos de possibilidade;
- v. Reclamação dos clientes;
- vi. FMEAs passados ou atuais;
- vii. Dados de confiabilidade.

Onde quer que o(s) efeito(s) potencial(is) for(em) identificado(s), as ramificações da perda de função de projeto deverão ser determinadas. Considerações devem ser dadas ao próprio projeto, outros sistemas, ao produto e ao cliente. Embora as considerações de segurança possam ser uma consequência, esta é a coluna onde deverão ser feitas as anotações apropriadas. Exemplos de efeitos potenciais de falha são:

- i. Sistema próximo a montante: falha em operar;
- ii. Sistema próximo a jusante: nenhum;
- iii. Outro (s) sistema (s): nenhum;
- iv. Produto: degradação da performance;

- v. Cliente: insatisfação completa; falha no sistema para operar;
- vi. Governo: pode não aprovar de acordo com uma norma específica.

Características Críticas-(14). Características críticas normalmente são associadas à FMEA porque o equipamento começa a ter formato no estágio de projeto. Até que o equipamento seja definido, características críticas e/ou significativas não podem ser identificadas (SLONE, 1986). O símbolo utilizado para representar este campo é o “∇.” Este é o campo onde as identificações das características críticas são feitas. A identificação da criticalidade ou significância na análise FMEA é somente para designar controles especiais para o processo, montagem e/ou FMEA de serviço. Deste ponto, eles são transferidos para o plano de controle.

Exemplos de possíveis itens críticos podem ser dimensões, especificações, testes, processos, ferramentas e hábitos. Características críticas são identificadas quando exigências de processo:

- i. Podem afetar a segurança;
- ii. Podem afetar a conformidade com os regulamentos governamentais;
- iii. São necessárias para ações/controles especiais.

A entrada para esta coluna é um S para sim, N para não ou um outro símbolo específico determinado pela empresa, organização ou equipe contratada que está aplicando a FMEA. Esta proposta é para sinalizar uma característica crítica potencial que pode ou não existir. Uma boa indicação de criticalidade é quando a severidade é taxada como 9 ou 10 com ocorrência e detecção maior do que 3.

Severidade do Efeito (15). Severidade é uma classificação que indica a seriedade do efeito do modo de falha potencial do projeto. A severidade é sempre aplicada ao efeito do modo de falha. De fato, existe uma correlação direta entre o efeito e a severidade. Por exemplo, se o efeito é crítico, a severidade é alta. Por outro lado, se o efeito não é crítico, a severidade é baixa.

A severidade é verificada através de uma perspectiva do sistema, pelo próprio projeto, de outros sistemas, do produto, do cliente e/ou regulamento governamental.

Para uma proposta de avaliação, normalmente é usada uma tabela de classificação que reflete o resultado da organização em conjunto com o cliente e/ou regulamentos governamentais. Um exemplo do modo de classificação de severidade pode ser visualizado na Tabela 2.4.

Em uma FMEA, a classificação de severidade deverá ser baseada no pior efeito do modo de falha. Quando completo, ordenam-se os modos de falha com base na severidade de seus efeitos.

Causa(s) Potencial(is) de Falha(s) (16). A causa de um modo de falha do projeto é a deficiência do projeto, que resulta no modo de falha. Isto deve ser enfatizado repetidamente até quando um dos membros da equipe observar o foco da (s) causa (s), pois deve-se olhar para a causa raiz e não para o sintoma da falha.

Para fazer um bom trabalho da (s) causa (s) potencial(ais) apropriada(s) da identificação da falha, um dos membros da equipe deve entender do sistema e do projeto, e fazer perguntas apropriadas. Ser específico é de grande importância. Quanto maior for a aproximação da causa raiz, melhor será para identificar a causa da falha. Por exemplo, um isolamento ruim no fio elétrico poderia ser a causa de um curto-circuito? Algumas das técnicas que podem ser utilizadas são “brainstorming”, diagrama de causa e efeito, análise de diagrama de blocos entre outras ferramentas da qualidade. (STAMATIS, 1995)

A pergunta básica é: o caminho pelo qual pode o sistema falhar é uma função compreendida? Outro caminho é utilizar a técnica dos cinco porquês. No início, são observações superficiais que mais tarde vão se tornando observações mais substanciais. Outras questões podem ser postas como: sob quais circunstâncias poderiam causar a falha? Como ou por que a peça pode falhar se ela satisfaz a especificação de engenharia?



Tabela 2.4 – Guia de severidade para a FMEA de produto - Escala qualitativa de 1 a 10. (STAMATIS, 1995, p. 138).

<b>Efeito</b>	<b>Classificação</b>	<b>Crítérios</b>	<b>Resolução</b>
Nenhum	1	Sem efeito	<p>Se um valor numérico cair entre dois números, sempre selecione o número maior.</p> <p>Se a equipe não concordar no valor da classificação, os itens abaixo podem ajudar:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se não houver um acordo em uma categoria adjacente ou uma diferença fora da média. Por exemplo, se um membro disser 5 e alguém disser 6, a classificação neste caso deverá ser 6 (5 e 6 são categorias próximas. Entretanto, <math>5+6=11</math>, <math>11/2 = 5.5 \cong 6</math>)</li> <li>2. Se o desacordo pular uma categoria, então um consenso deverá ser alcançado. Nivelado com uma pessoa resistindo, o consenso total deverá ser alcançado. Sem média, sem maioria. Ninguém nesta equipe deverá ter o domínio da classificação. Eles não poderão concordar 100%, mas eles podem conviver com isto.</li> </ol>
Muito leve	2	Cliente não incomodado. Efeito muito pequeno na performance do produto. Às vezes é observado como um defeito sem importância.	
Leve	3	Cliente incomodado levemente. Efeito leve na performance do produto. Na maioria das vezes é observado como um defeito sem importância.	
Baixo	4	Cliente apresenta um incômodo baixo. Efeito menor na performance do produto. O defeito não requer reparos. Sempre é observado como um defeito sem importância.	
Moderado	5	Cliente apresenta alguma insatisfação. Efeito moderado na performance do produto. Defeito sem importância no componente, mas requer reparo.	
Significativo	6	Cliente apresenta um desconforto ou preocupação. Performance do produto degradada, mas continua operacional e seguro. Componente sem importância inoperável.	
Alto	7	Cliente insatisfeito. Performance do produto severamente afetada, mas continua operando e seguro. Sistema auxiliar inoperante.	
Extremo	8	Cliente muito insatisfeito. Produto inoperável, mas seguro. Sistema inoperante.	
Sério	9	Efeito perigoso. O equipamento pode ser desligado com segurança—falha dependente do tempo. De acordo com os regulamentos governamentais, está em perigo.	
Perigoso	10	Efeito perigoso. Segurança comprometida—falha inesperada. Não está de acordo com os regulamentos governamentais.	

OBS.: Todo o conteúdo das linhas-guia e classificações pode ser alterados para refletir uma situação específica.

O modo de falha pode ser causado por um ou mais componentes individuais, ou pela listagem parcial abaixo:

- Falha no equipamento devido ao projeto inadequado;
- Seleção imprópria dos componentes;
- Uso impróprio do processo;
- Procedimentos de controle inadequados;
- Falha em fazer cumprir o processo e controles de qualidade;
- Instalação imprópria ou falta de manutenção;
- Deficiência dos dispositivos de segurança, fatores relativos ao ambiente;
- Uso excessivo;
- Alteração do produto;
- Instruções de operação impróprias;
- Erro humano;
- Escolha de materiais impróprios;
- Concentração de tensão;
- Fadiga, lesão uniforme;
- Corrosão;
- Dano por hidrogênio, corrosão intragranular, formação de bolhas;
- Descarbonização, abrasão e desgaste, impacto e vibração;
- Interação com outros componentes;
- Interação com componentes de outros sistemas;
- Interação com o governo;
- Interação com o cliente.

Esta parte da FMEA é importante porque 76% de todas as mudanças de engenharia são devidas às correções de projeto ruim e somente 24% das mudanças de engenharia são devido a melhoramentos (CURLEY e RYDER, 1992). É imperativo que o foco na performance da FMEA seja para identificar todas as possíveis falhas potenciais.

Neste ponto, deve ser enfatizado que a maioria dos benefícios da FMEA de produto é a identificação e a remoção dos modos de falha potenciais causados pelo

sistema e/ou interação dos componentes. Estas interações também podem envolver fatores humanos e devem ser revisadas totalmente.

A interface entre o modo de falha e a (s) causa (s) não é linear ou de um-para-um. Podem-se encontrar várias causas para um único modo de falha. Às vezes a interface de um-para-um existe. Deve-se então, listar o maior número de causas possíveis. Estas causas serão transferidas para a FMEA de produto como um modo de falha potencial. Entretanto, quanto mais causas são identificadas na FMEA de produto, mais fácil torna-se a FMEA.

Exemplos de causas de falha incluem:

- i. Torque muito alto ou baixo;
- ii. Dureza;
- iii. Viscosidade muito alta ou baixa;
- iv. Porosidade.

Se a severidade da falha é classificada de 8 a 10, um empenho especial deverá ser feito para identificar todas as possíveis causas raízes.

Ocorrência (17). Ocorrência ou frequência é dada pela classificação do valor correspondente para o número estimado de frequências e/ou o número cumulativo de falhas que poderiam ocorrer por uma dada causa acima da vida de produto. Para identificar a frequência para cada uma das causas, um dos membros da equipe pode utilizar o número cumulativo de falhas do componentes, CNF, por 100 ou 1000 componentes – CNF/100 ou CNF/1000, respectivamente – sobre a vida de produto do componente em estudo. O atributo específico da durabilidade irá depender do componente.

Um outro caminho para definir a vida de produto é a identificação do período ou vida útil depois que o componente é descartado pois encerra a sua função como projetado.

Se a frequência esperada e/ou número cumulativo de falhas não puder ser estimada, é aceitável para a FMEA de produto examinar sistemas similares ou substituir sistemas e/ou componentes por informações similares.

Geralmente, a FMEA de produto opera sob a hipótese de um ponto único de falha, ou seja, se o componente falha, todo o sistema falha. A definição para um ponto único de falha é: se o componente falhar, o sistema falha. Não é considerado a redundância, diversidade ou outro método alternativo na ocorrência, eles serão considerados na detecção. Por exemplo, peças únicas do equipamento e cabos para carregamento de carga trabalham em local onde a temperatura é elevada com dependência dos componentes únicos, que comumente pode ser evitado pelo uso de redundância. Neste caso, a instalação dos cabos em duplicidade na área de carregamento poderia minimizar a paralisação do serviço em um evento de ruptura do cabo.

A ocorrência/frequência é calculada para todas as causas de falha. Se esta não puder ser estimada, então a ocorrência deverá ser 10. Isto deve também ser um consenso acordado por toda a equipe. Na Tabela 2.5 é mostrado um típico guia de ocorrência.

Método de Detecção; Verificações de Projeto; Controles Existentes (18). Um método, procedimento, teste, revisão de projeto ou uma análise de engenharia. Estes são alguns dos métodos de primeiro nível para detectar a falha no projeto ou parte dele (BLANCHARD e LOWERY, 1969). Eles podem ser muito simples, como por exemplo, a utilização de “brainstorming” ou muito técnicos e avançados, com a utilização de análise de elementos finitos, revisão de projeto, simulação computacional e testes em laboratório. Em um caso semelhante, o foco estará na eficiência do método/técnica de controle para detectar o problema antes deste chegar ao cliente.

O objetivo é detectar uma deficiência no projeto tão cedo quanto possível. Esta deficiência pode ser vista como uma fraqueza no projeto para revelar, detectar ou eliminar o problema de projeto (CHIEN, 1985). A ideia de detecção antecipada na FMEA de produto é para melhorar a eficiência dos sinais de controles de projeto.

Se a FMEA de produto é feita na fase de projeto, antes de iniciar a fabricação do produto, pode ser difícil estimar a categoria da detecção. Neste caso, um dos membros

da equipe pode utilizar informações históricas, ou tipos similares de informações de componentes ou sistemas similares. Em alguns casos, isto é possível por não ter um método, teste ou técnica para identificar a falha. Neste caso, a entrada nesta coluna deverá ser escrita: não identificado até o momento.

Outro caminho para focar na detecção é utilizar a técnica de “brainstorming” para identificar novos métodos, testes e como eles se adaptam para a nova tarefa. Duas das principais questões no processo de “brainstorming” deverão ser:

- i. Como se pode descobrir esta falha?
- ii. Em qual caminho pode ser identificada esta falha?

Para responder a estas questões, uma lista de verificação pode ser útil; entretanto, alguns dos caminhos mais efetivos para detectar uma falha no estágio de projeto são:

- i. Fornecer técnicas de simulação;
- ii. Modelagem matemática;
- iii. Protótipo para teste;
- iv. Experiências de projeto;
- v. Testes de verificação de projeto;
- vi. Testes do produto específico;
- vii. Estudos de tolerâncias;
- viii. Revisão de projeto;
- ix. Revisão de material.

Tabela 2.5 – Guia de ocorrência para a FMEA de produto - Escala Qualitativa de 1 a 10. (STAMATIS, 1995, p.142).

Ocorrência	Classificação	Crítérios	CNF/1000	Resolução
Praticamente impossível	1	Falha improvável. Historicamente sem falhas.	< 0.00058	<p>Se um valor numérico cair entre dois números, sempre selecione o número maior.</p> <p>Se a equipe não concordar no valor da classificação, os itens abaixo podem ajudar:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Se não houver acordo em uma categoria adjacente ou uma diferença fora da média. Por exemplo, se um membro disser 5 e alguém disser 6, a classificação neste caso deverá ser 6 (5 e 6 são categorias próximas. Entretanto, <math>5+6=11</math>, <math>11/2 = 5.5 \cong 6</math>).</li> <li>Se o desacordo pular uma categoria, então um consenso deverá ser alcançado. Nivelado com uma pessoa resistindo, o consenso total deverá ser alcançado. Sem média, sem maioria. Ninguém nesta equipe deverá ter o domínio da classificação. Eles não poderão concordar 100%, mas eles podem conviver com isto.</li> </ol>
Remota	2	Número raro de falhas prováveis.	0.0068	
Muito leve	3	Falhas muito pouco prováveis.	0.0063	
Leve	4	Falhas pouco prováveis.	0.46	
Baixa	5	Número ocasional de falhas prováveis.	2.7	
Média	6	Número médio de falhas prováveis.	12.4	
Moderadamente alta	7	Número moderadamente alto de falhas prováveis.	46	
Alta	8	Número alto de falhas prováveis.	134	
Muito alta	9	Número muito alto de falhas prováveis.	316	
Praticamente certa	10	Falha praticamente certa. Existe histórico de falhas de projetos anteriores ou similares.	> 316	

OBS.: Todo o conteúdo das linhas-guia e classificações pode ser alterado para refletir uma situação específica.

A maioria dos itens em detecção de falhas é quantificável. A revisão do projeto, entretanto, é também uma importante ferramenta, que é utilizada para rever a conveniência do sistema e/ou projeto. Isto pode ser quantificável, mas também pode ser uma metodologia sistemática e qualitativa para questionar o projeto. Em uma típica revisão de projeto pode ser incluída:

1. Revisão preliminar de projeto — A proposta para a revisão preliminar de projeto é para definir e selecionar uma aproximação para encontrar as exigências funcionais do produto. O resultado é uma descrição de características do produto, estimativa de custos de produção, estimativa da vida útil e a descrição do preliminar do ambiente de uso. Neste estágio, probabilidade, confiabilidade, modelagem e testes estatísticos podem ser necessários.

2. Revisão intermediária de projeto — A proposta da revisão intermediária de projeto é para determinar se o produto completará com êxito estas exigências funcionais em um nível aceitável de segurança, produção e utilidade. Neste estágio, o projeto comercial pode ser estimado, podem-se revisar os resultados dos testes, das margens de segurança, das seleções de materiais avaliados, do processo de produção e da ferramentaria.

3. Revisão final de projeto — A proposta da revisão final de projeto é para rever e aprovar as informações detalhadas de projeto necessárias para a fabricação do produto.

Neste estágio, é avaliado se a documentação está completa. São providenciados uma última verificação das funções, características, produção, verificação das normas apropriadas, erros do operador, rentabilidade e segurança do projeto antes da fabricação do produto.

4. Lista de Verificação de Revisão de Projeto — Segue abaixo uma típica lista de verificação que pode ser considerada. (BASS, 1991, BLANCHARD, 1986, FORD, 1989, STAMATIS, 1992).

- i. Definir o produto em seu meio ambiente de uso:

- a. Quais são as utilizações dos produtos?
  - b. Quais são os ambientes previsíveis de uso?
  - c. Descrever as habilidade e capacidades dos possíveis usuários.
- ii. Identificar a segurança e estimar os riscos:
- a. Quais são os perigos?
  - b. Estimar a probabilidade de ocorrência e a seriedade dos danos resultantes de cada perigo.
- iii. Avaliações alternativas:
- a. Quais características alternativas de projeto ou técnicas de produção estão disponíveis, incluindo garantia e instruções, e isto pode ser esperado para reduzir ou eliminar problemas de segurança?
  - b. Projetos alternativos de avaliação considerando:
    - Características e comparações de diferentes produtos;
    - Outros problemas de segurança introduzidos pelo projeto alternativo;
    - Seus efeitos na utilidade do produto;
    - Seus efeitos no custo básico do produto.

No caso de erro humano, um método de detecção pode ser desenvolvido com critérios como os apresentados a seguir, baseados na MIL-STD-1472C (1981) e WOODSON (1981):

- i. Integração entre tela e controles:
  - a. As telas e os controles deverão estar juntos;
  - b. As telas e os controle com funções similares deverão estar agrupados;



- c. As telas deverão refletir as direções apropriadas para o controle dos mecanismos.
- ii. Exibição visual:
  - a. A exibição visual deverá fornecer somente as informações necessárias para a operação do sistema;
  - b. Telas críticas deverão estar localizadas em uma área visível ao operador;
  - c. Indicadores luminosos deverão seguir certas padronizações e códigos de cores;
  - d. Os tamanhos das figuras deverão ser dimensionadas levando em consideração a visão de alcance do operador.
- iii. Exibição de áudio:
  - a. Sinais de áudio deverão ter freqüências e amplitudes que possam ser ouvidas no ambiente de operação;
  - b. A freqüência de resposta e o alcance devem ser apropriados para o ambiente de operação.
- iv. Controles:
  - a. Os controles dos mecanismos deverão ser relatados em normas e procedimentos;
  - b. Os controles deverão estar arranjos na seqüência com a qual eles serão utilizados;
  - c. As cores dos controles deverão seguir os procedimentos e códigos;
  - d. Os controles deverão ser codificados pela forma, cor, tamanho e localização.
- v. Letreiros e avisos de segurança:

- a. Os letreiros e avisos de segurança deverão ser legíveis e entendíveis sobre as condições de operação previsíveis pelas expectativas dos usuários;
- b. Letreiros e avisos de segurança deverão, quando apropriado:
  - Identificar o fato de que existe um problema de segurança;
  - Identificar o nível do problema de segurança;
  - Identificar a verossimilhança da notificação de segurança resultando em dano;
  - Explanar como evitar a notificação de segurança;
  - Descrever as conseqüências da notificação de segurança se o aviso de segurança não for atendido.

vi. Antropometria:

- a. Os equipamentos deverão ser projetados para acomodar a maior quantidade possível de usuários em potencial.

vii. Critérios da área de operação:

- a. Os controles deverão estar dispostos ao alcance do operador;
- b. Critérios de projeto deverão contemplar que o operador trabalhe em pé e/ou sentado;
- c. Critérios de projeto deverão contemplar o assento e os controles do operador.

viii. Critérios de projeto do ambiente de trabalho:

- a. Aquecimento, ventilação, ar condicionado e padrões de umidade relativa do ar para a segurança e eficiência da performance do trabalho;
- b. Iluminação apropriada;

- c. Níveis de ruído apropriados;
  - d. Limites de aceleração e vibração apropriados.
- ix. Critérios de projeto para manutenção:
- a. Critérios de acessibilidade;
  - b. Limitação de peso.
- x. Listas de verificação:
- a. Listas específicas de verificação para funções específicas.

Detecção (19). É uma classificação correspondente à verossimilhança de que os controles do projeto proposto irão detectar uma causa raiz específica de um modo de falha antes da peça ser encaminhada para a produção. Para identificar uma classificação de detecção, um dos membros da equipe deverá estimar a habilidade para cada um dos controles identificados no item 18 para detectar a falha antes que ela alcance o cliente. Em outras palavras, os controles identificados no item 18 são eficientes para o projeto?

Se a habilidade dos controles detectarem que a falha é desconhecida ou a detecção não pode ser estimada, então a classificação da detecção deverá ser 10. Um guia típico de detecção é mostrado na Tabela 2.6.

Número de Prioridade de Risco (RPN) (20). Este número é o produto da severidade, ocorrência e detecção. O RPN define a prioridade da falha. Por si próprios, os RPNs não possuem um valor ou média. Eles são usados somente para ordenar ou definir uma deficiência potencial de projeto.

Tabela 2.6 – Guia de detecção para a FMEA de produto - Escala Qualitativa de 1 a 10. (STAMATIS, 1995, p.147).

Efeito	Classificação	Crítérios	Resolução
Praticamente certo	1	Tem a maior eficiência em cada categoria aplicável	<p>Se um valor numérico cair entre dois números, sempre selecione o número maior.</p> <p>Se a equipe não concordar no valor da classificação, os itens abaixo podem ajudar:</p> <p>3. Se não houver acordo em uma categoria adjacente, uma diferença fora da média. Por exemplo, se um membro disser 5 e alguém disser 6, a classificação neste caso deverá ser 6 (5 e 6 são categorias próximas. Entretanto, <math>5+6=11</math>, <math>11/2 = 5.5 \cong 6</math>)</p> <p>4. Se o desacordo pular uma categoria, então um consenso deverá ser alcançado. Nivelado com a pessoa que está resistindo, o consenso total deverá ser alcançado. Sem média, sem maioria. Ninguém nesta equipe deverá ter o domínio da classificação. Eles não poderão concordar 100%, mas eles podem conviver com isto.</p>
Muito alto	2	Tem eficiência muito alta	
Alto	3	Tem eficiência alta	
Moderadamente alto	4	Tem eficiência moderadamente alta	
Médio	5	Tem eficiência média	
Baixo	6	Tem eficiência baixa	
Leve	7	Tem eficiência muito baixa	
Muito leve	8	Tem a menor eficiência em cada categoria aplicável	
Remoto	9	Não é aprovado, não é confiável e a eficiência é desconhecida.	
Praticamente impossível	10	Sem projeto técnico disponível ou desconhecido e / ou não é planejado.	
OBS.: Todo o conteúdo das linhas-guia e classificações pode ser alterado para refletir uma situação específica.			

Na FMEA de produto, um dos membros da equipe deve sempre lembrar que a meta é reduzir o RPN, através de uma redução na severidade, ocorrência ou detecção.

A severidade só pode ser reduzida através de uma mudança de projeto. Se isto for alcançável, então a falha será eliminada. (STAMATIS, 1995).

A ocorrência pode ser reduzida através de uma melhoria nas especificações de engenharia e/ou exigências com a intenção de prevenir as causas ou reduzir sua frequência.

A detecção pode ser reduzida acrescentando ou melhorando a técnica de avaliação do projeto ou incrementando o tamanho da amostra, e/ou adicionando equipamentos para detecção. O resultado será o melhoramento na habilidade para detectar a falha antes que esta alcance o cliente.

Ações Recomendadas (21). A FMEA não deverá ser feita sem as ações recomendadas, que podem ser ações específicas ou pode ser um estudo futuro. A idéia da ação recomendada na FMEA de produto é para reduzir a severidade, ocorrência, detecção ou todos estes elementos. Em essência, a FMEA de produto é feita para eliminar deficiências/falhas de projeto.

Para facilitar esta meta, a equipe da FMEA deverá priorizar estes modos de falha com o mais alto RPN, a mais alta severidade e a mais alta ocorrência. Recomendações típicas podem ser:

- i. Sem ação no momento;
- ii. Acrescentar dispositivos de detecção na construção;
- iii. Fornecer alternativas para o projeto;
- iv. Acrescentar sistemas de redundância.

Responsabilidade da Área ou Pessoal e Data de Conclusão (22). Identificar a responsabilidade da área/pessoal e a data alvo de conclusão para a ação recomendada.

Ações Realizadas (23). Este é o acompanhamento do processo. Apenas porque algo foi recomendado, não significa que será feito. É imperativo que alguém – normalmente o engenheiro projetista – acompanhe as recomendações e determine se realmente elas foram comunicadas adequadamente, propriamente e/ou se existe a necessidade de atualização.

Todas as FMEAs são documentos dinâmicos e, como tal, alguém deve ser responsabilizado por atualizá-los. Frequentemente, a pessoa que é responsável é o engenheiro projetista, que tem a responsabilidade de tornar claro que a FMEA de produto é um documento dinâmico e que reflete a última informação relevante e suas últimas ações recomendadas.

Depois da ação ter sido realizada, deverá ser escrita a data efetiva ou a data de conclusão com uma breve descrição da ação.

RPN Revisado (24). Depois que as ações são incorporadas ao projeto, a equipe da FMEA deverá reavaliar as conseqüências da severidade, ocorrência e detecção. Os resultados deverão ser revisados pela equipe da FMEA, um novo RPN deverá ser calculado e as falhas ordenadas novamente. Este processo será refeito até que a equipe da FMEA decida que as informações relevantes foram totalmente consideradas. Se nenhuma ação for realizada, esta coluna deverá permanecer em branco.

Assinaturas de Aprovação (25). Definir quem serão os responsáveis pela condução da FMEA. Os nomes e os títulos irão depender da organização. Nomes típicos podem ser o do gerente do projeto, gerente de confiabilidade e o gerente da engenharia.

Assinaturas de Conformidade (26). Definir a responsabilidade da conclusão e implementação da FMEA. Os nomes e os títulos irão depender da organização. Nomes típicos poder ser os gerentes da engenharia, produção ou garantia da qualidade.

Às vezes, uma FMEA de produto é associada a uma FMEA de projeto. O método para este desenvolvimento e a base lógica para a FMEA de projeto são as mesmas para a de produto.

### 2.3.2 Equipe recomendada

Uma equipe é necessária para desenvolver uma FMEA de produto. A composição da equipe deverá ser de cinco a nove profissionais com conhecimentos e experiências multifuncionais e deverão ter o domínio do problema. (STAMATIS, 1992). Uma equipe típica pode incluir:

- i. Engenheiro de sistema (obrigatório);
- ii. Engenheiro de confiabilidade;
- iii. Engenheiro de testes;
- iv. Engenheiro metalúrgico;
- v. Engenheiro de processo (obrigatório);
- vi. Representante de marketing;
- vii. Engenheiro de projeto (obrigatório).

Outras recomendações para os participantes podem incluir:

- viii. Engenheiro de qualidade;
- ix. Engenheiro de serviço de campo;
- x. Representante R & D;
- xi. Engenheiro de ferramentaria;
- xii. Engenheiro de produto.

Não existe uma fórmula para montar a equipe. A equipe deve refletir as necessidades e exigências que o problema e a cultura da organização requerem.

### 3. DEA – Análise envoltória de dados

#### 3.1 DEA: a análise

A definição da medida de eficiência clássica para uma linha de produção, comparando-se apenas 2 (duas) variáveis por vez, é apresentada abaixo:

$$\eta = \frac{O_j}{I_i} \cdot C \quad (3.1)$$

$$O_j, I_i > 0 \quad \forall i, j \quad (3.2)$$

$$O_j \supset \{\Re\} \quad (3.3)$$

Onde:

$\eta$ : eficiência;

$O_j$ : nível do “output” j;

$I_i$ : nível do “input” i;

$C$ : 100, para converter o resultado em percentual.

Essa técnica não apresenta resultados satisfatórios quando aumentamos o número de variáveis, ou quando queremos fazer uma avaliação global de eficiência no processo, envolvendo as diversas variáveis com naturezas e medidas distintas. (ESTELLITA LINS e MEZA, 2000)

Utilizando a equação 3.1, por exemplo, num processo de produção de oxigênio gasoso de baixa pureza, ela por si só, para um cálculo de eficiência do equipamento, não seria satisfatória, mesmo que a principal medida de eficiência de um equipamento deste porte seja a capacidade de produção real, “output,” dividida pela a capacidade de produção de projeto, “input,” a produção real não é uma fotografia, não é estática, ela sofre variações significativas ao longo do tempo devido às mudanças da temperatura ambiente, à manutenção preventiva, ao “downtime,” ao modo “vent,” uma falha no



envio de alarme em consequência de um desvio no processo, o tempo entre a falha e a sua correção, a qualidade da água, a eficiência dos trocadores de calor, etc. Ou seja, são variáveis com medidas diferentes, que não é possível avaliar simultaneamente, não temos como converter essas medidas distintas para uma mesma unidade utilizando apenas a equação 3.1, e conseqüentemente a medida de eficiência estaria incompleta ou inconsistente. (ESTELLITA LINS e MEZA, 2000)

Para melhorar a eficiência da equação 3.1, tem-se que aumentar o numerador, ou sejam, os “outputs” e/ou diminuir o denominador, os “inputs.” Entretanto, o denominador não pode ser igual a zero, pois teríamos soluções infinitas e não iríamos chegar a conclusão nenhuma sobre qual índice teríamos que melhorar para atingir a melhor eficiência, pois trata-se de um caso real.

Define-se DMU, unidade de tomada de decisão, como sendo o local, equipamento, uma parte do processo, um componente, etc, cuja eficiência está sendo avaliada. (ESTELLITA LINS e MEZA, 2000)

A DEA calcula e propõe melhorias aos índices de eficiência em situações onde  $i$  variáveis “inputs” e  $j$  variáveis “outputs” com unidades distintas são avaliadas simultaneamente em um único modelo matemático. Estas variáveis são convertidas na mesma unidade de valor com as suas devidas restrições, pois estamos tratando de casos não-hipotéticos. Nesta avaliação  $i$  e  $j$  são distribuídos em um gráfico de dispersão de  $n$  dimensões onde é traçado uma fronteira de eficiência definida pelos melhores “inputs” e “outputs” encontrados no processo. A partir deste gráfico é calculada a eficiência de cada variável e o quanto cada uma tem que melhorar para atingir a fronteira de eficiência. (MEZA, 1998)

Na DEA, os modelos desenvolvidos são baseados em programação linear, onde normalizamos a equação 3.1, implementando as devidas correções para o seu próprio aumento de eficiência e onde se deseja maximizar os “outputs” dando um nível de “input,” ou minimizar os “inputs,” dando um nível de “output” sem a perspectiva de infinitas soluções. (GARCIA et al., 2005)

Há várias decisões a serem tomadas em função da indicação de que parâmetro, seja

ele  $i$  ou  $j$ , tem que ser melhorado para se ter efetivamente um aumento de eficiência. (MEZA, 1998)

Com estas definições apresenta-se uma implementação da DEA.

### 3.1.1 Implementação da DEA

Apresentaremos uma implementação da DEA, desenvolvida por GOLANY e ROLL (1989), e que é utilizada amplamente tanto de maneira formal como de maneira intuitiva. Eles estabeleceram três fases principais na implementação, que são:

- i. Definição e seleção das DMUs a entrarem na análise;
- ii. Determinação das variáveis “inputs” e “outputs” que são relevantes e apropriadas para estabelecerem a eficiência relativa das DMUs selecionadas;
- iii. Aplicação dos modelos DEA.

### 3.1.2 Definição e seleção de DMUs

A primeira fase determina o conjunto de DMUs a serem avaliadas. Como já foi dito, este conjunto deve ser principalmente homogêneo, no entanto assumimos que existem diferenças na performance destas DMUs e que estas podem ser medidas. Por DMUs homogêneas entendemos as que realizam as mesmas tarefas com os mesmos objetivos e que estão trabalhando nas mesmas condições de processo utilizando variáveis que são iguais, exceto em intensidade e magnitude. Uma vez definidas as DMUs, devemos determinar o número das mesmas. Indica-se que o número de DMUs deve ser pelo menos o dobro do número de variáveis utilizadas no modelo. (ESTELLITA LINS e MEZA, 2000).

### 3.1.3 Seleção de variáveis

A segunda fase, a seleção de variáveis, considera uma grande lista inicial de possíveis variáveis a entrar no modelo, podendo ser controláveis ou não, pois existem novos modelos DEA que consideram esses diferentes tipos de variáveis. Também podem ser qualitativas ou quantitativas, sendo que as variáveis quantitativas devem tomar um valor físico a fim de torná-las mensuráveis. A introdução de um grande número de variáveis resulta em uma maior explicação das diferenças entre as DMUs, mas por outro lado, fará com que um número maior de DMUs estejam na fronteira de eficiência. Além disso, o incremento de muitas variáveis reduz a capacidade da DEA de discriminar as DMUs eficientes das ineficientes, pois uma DMU pode incrementar a sua eficiência sem fazer nenhum esforço. Portanto, o modelo deve ser mantido o mais compacto possível para maximizar o poder discriminatório da DEA. (MEZA, 1998).

A seleção de variáveis pode ser de dois tipos. O primeiro utiliza a opinião do interessado, usuário e/ou especialista. Este deve levar em consideração o seguinte:

- i. Se a variável está trazendo a informação necessária que não tenha sido incluída em outras variáveis;
- ii. Se a variável está relacionando ou contribuindo para um ou mais objetivos da aplicação;
- iii. Se os dados da variável são confiáveis e seguros;
- iv. Explicam-se as eficiências de uma DMU.

De outro lado, esta escolha também pode ser baseada na análise de correlação, apresentada por ESTELLITA, (1997), chamada de “I O Stepwise.” Para aplicação deste método deve identificar-se cada variável como “input” e “output.” Calculam-se as correlações entre todas as variáveis e escolhe-se um par inicial, “input-output,” com a maior correlação que são as duas primeiras variáveis a entrarem no modelo. As outras variáveis são escolhidas da seguinte forma:

- i. Se é “input,” então deve estar correlacionada positivamente com o índice de eficiência até agora encontrado;

- ii. Se é “output,” então deve estar correlacionada negativamente com o índice de eficiência até agora encontrado.

Com cada nova variável no modelo calcula-se a eficiência DEA e a correlação desta eficiência com cada uma das variáveis. ESTELLITA LINS e MOREIRA (1998), demonstraram que o primeiro par achado é importante para a escolha correta das variáveis a entrarem no modelo. Um primeiro par mal escolhido pode levar a uma escolha de variáveis não ótimas e apresentam-se métodos para a escolha correta desse primeiro par.

#### 3.1.4 Aplicação do modelo

Deve-se escolher a orientação do modelo, o que permite estabelecer o objetivo do estudo. Quando se escolhe uma orientação “input,” isto indicará que o objetivo será a redução dos “inputs,” que pode ser obtida sem alterar o nível dos “outputs” atuais. A orientação “output” indica que desejamos maximizar os “outputs” que podem ser obtidos sem incrementar o nível dos “inputs” utilizados.

Logo após definimos o modelo, ou os modelos a serem utilizados. No item 3.2, estes modelos serão apresentados.

A análise para a implementação da DEA não é inflexível e pode ser realimentada, ou ter a ordem de entrada alterada, isto é, ir da entrada 3 ou 2 para a entrada 1, se for necessário. Por exemplo, o método para seleção de variáveis “I O Stepwise” utiliza a cada passo a aplicação do modelo DEA para determinar as novas eficiências e recalcular as correlações. Por outro lado, as DMUs, e o modelo DEA devem ser escolhidos de tal forma que expressem os objetivos do estudo ou aplicação.

### 3.2 Modelos DEA

Alguns dos principais modelos desenvolvidos para a DEA são o modelo CCR, o BCC e o modelo aditivo. Veremos a sua origem e a utilização.

### 3.2.1 O modelo CCR

Como já foi mencionado, a análise envoltória de dados, DEA, nasceu com o trabalho de Charnes, Cooper e Rhodes, os quais desenvolveram um modelo que constrói uma superfície linear por partes sobre os dados e que determina a eficiência técnica das unidades sob estudo. O modelo por eles proposto é:

$$\text{Maximizar } h_0 = \frac{\sum_{y=1}^s v_y O_{y0}}{\sum_{x=1}^r u_x I_{x0}} \quad (3.4)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{y=1}^s v_y O_{yk}}{\sum_{x=1}^r u_x I_{xk}} \leq 1, k = 1, \dots, n \quad (3.5)$$

$$u_x, v_y \geq 0, \forall x, y \quad (3.6)$$

Onde:

- $h_0$ : eficiência da DMU O;
- $r$ : número total de “inputs;”
- $s$ : número total de “outputs;”
- $n$ : número total de DMUs;
- $I_{xk}$ : valor de “input” x para a DMU k;  $k = 1, \dots, n$ ;
- $O_{yk}$ : valor de “output” y para a DMU k;  $k = 1, \dots, n$ ;
- $u_x$ : peso dado ao input x;
- $v_y$ : peso dado ao output y.

Então o problema consiste em achar os valores das variáveis  $u_x$  e  $v_y$ , que são os pesos, a importância relativa de cada variável, de modo que se maximize a soma

ponderada dos “outputs,” dividida pela soma ponderada dos “inputs” da DMU em estudo, sujeita à restrição de que esse quociente seja menor ou igual a 1, para todas as DMUs. Logo, as eficiências variam de 0 a 1.

Os pesos encontrados,  $u_x$  e  $v_y$ , são correspondentes à DMU atual. Este processo é repetido para cada uma das  $n$  DMUs, com o qual obtemos diferentes valores para  $u_x$  e  $v_y$  para cada DMU. Através destes pesos obtemos um índice de eficiência relativo.

Devemos notar que esta formulação tem infinitas soluções ótimas pois, se  $u$  e  $v$  são uma solução, então  $\alpha u$  e  $\alpha v$  também serão uma outra solução ótima para o problema. Para solucionar isto, introduzimos a transformação linear desenvolvida por CHARNES, COOPER E RHODES (1962) com o qual geramos o seguinte modelo:

$$\text{Maximizar } h_0 = \sum_{y=1}^s v_y O_{y0} \quad (3.7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{x=1}^r u_x I_{x0} = 1 \quad (3.8)$$

$$\sum_{y=1}^s v_y O_{yk} - \sum_{x=1}^r u_x I_{xk} \leq 0, k=1, \dots, n \quad (3.9)$$

$$u_x, v_y \geq 0, \forall x, y \quad (3.10)$$

Esta forma de problema é conhecida como o problema dos multiplicadores, como também são chamados os pesos. Desta formulação podemos deduzir o problema dual equivalente, que é o seguinte:

$$\text{Minimizar } \theta \quad (3.11)$$

Sujeito a:

$$-O_{y0} + \sum_{k=1}^n O_{yk} \lambda_k \geq 0, y = 1, \dots, s \quad (3.12)$$

$$\theta I_{y0} - \sum_{k=1}^n I_{xk} \lambda_k \geq 0, x = 1, \dots, r \quad (3.13)$$

$$\lambda_k \geq 0, \forall k \quad (3.14)$$

Neste problema devemos encontrar os  $\lambda_k$ , que minimizem  $\theta$ .

De outro lado, podemos ver que este problema tem uma menor quantidade de restrições,  $s + r < n + 1$ , e em geral é recomendado que o número total de variáveis,  $s + r$ , seja a metade do número de DMUs. Por esta razão é melhor adotar esta forma do modelo. Este modelo é chamado de problema do envelope.

Graficamente, o modelo CCR determina uma fronteira da constante que retorna para a escala CRS, que indica que crescimentos proporcionais dos “inputs” produzirão crescimentos proporcionais dos “outputs.” Na Figura 3.1 podemos observar que essa proporção é constante e é dada por  $\alpha$ .

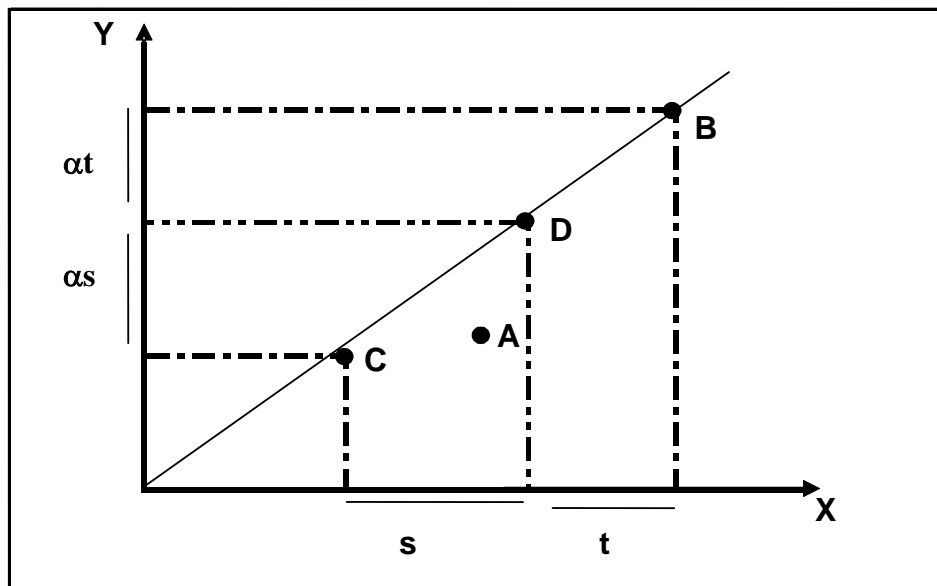


Figura 3.1 - Incrementos Proporcionais. Fronteira CRS.

De outro lado, a Figura 3.2 nos mostra um modelo com duas variáveis, um “input” (X) e um “output” (Y), e cinco DMUs, onde a fronteira CRS, em forma de cone, está definida pela DMU eficiente D; na figura com três variáveis a fronteira CRS teria forma de prisma, etc. Todas as outras DMUs que não se encontram na fronteira são ineficientes. Além disso, as setas indicam a projeção de cada DMU ineficiente na fronteira, resultado que também é fornecido pelo modelo do envelope, onde  $\theta$  nos fornece a redução eqüiproporcional dos “inputs.” A eficiência da DMU A é dada pela distância do eixo até o ponto atual dividido pela distância do eixo até o ponto ótimo. Na figura MN/MA é esta eficiência, fornecida pelo modelo dos multiplicadores, onde também podemos obter a importância relativa de cada variável.

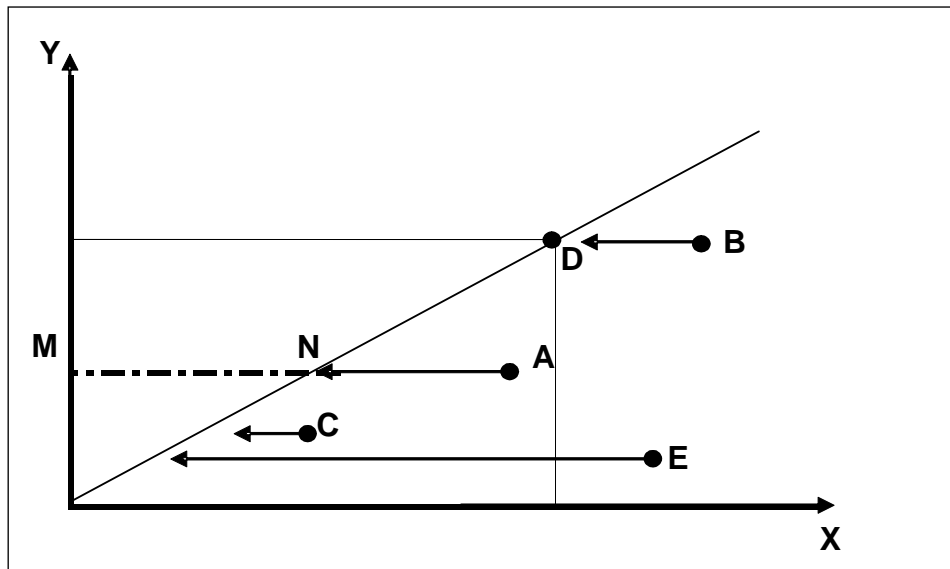


Figura 3.2 - Fronteira CRS. Orientação Input.

No caso deste modelo, estamos procurando minimizar os “inputs” sem decrementar os níveis dos “outputs:” que se chama de orientação “input,” também chamada de ótica de redução dos inputs. Existe uma formulação para a orientação “output,” ótica de aumento dos “outputs,” que procura maximizar os “outputs” sem incrementar o nível dos “inputs” utilizados. O modelo para este propósito se obtém invertendo o quociente, com o qual temos o seguinte modelo:

$$\text{Minimizar } w_0 = \frac{\sum_{x=1}^r u_x I_{x0}}{\sum_{y=1}^s v_y O_{y0}} \quad (3.15)$$



Sujeito a:

$$\frac{\sum_{x=1}^r u_x I_{x0}}{\sum_{y=1}^s v_y O_{y0}} \geq 1, k = 1, \dots, n \quad (3.16)$$

$$u_x, v_y \geq 0, \forall x, y \quad (3.17)$$

Neste problema temos as mesmas variáveis de decisão  $u_x$  e  $v_y$ , podendo ser linearizado da mesma forma que a equação 3.15. Podemos obter o dual deste modelo, obtendo assim o modelo do envelope onde  $\phi$  é o incremento proporcional dos “outputs.”

Na Figura 3.3, vemos que a eficiência segundo esta orientação para a DMU E está dada pela distância ME/MN.

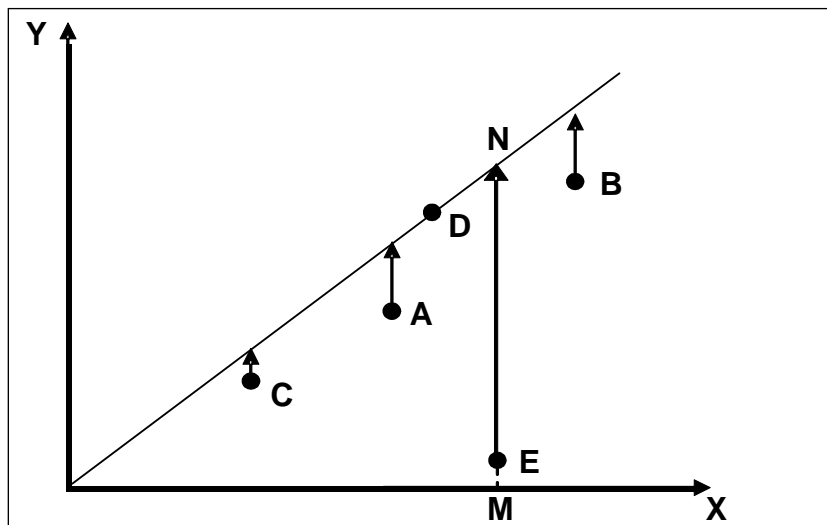


Figura 3.3 - Fronteira CRS. Orientação Output.

Devemos notar que o índice de eficiência obtido na orientação “input” é igual ao índice de eficiência obtido utilizando a orientação “output,” como podemos ver na Figura 3.4, onde observamos que a medida de eficiência orientada ao “input”  $NS/NA$  é igual à medida de eficiência orientada ao output  $MA/MT$ . Este resultado foi observado por FARE e LOVELL (1978), somente quando se admite que a escala é constante, isto é, quando aplicamos o modelo CCR.

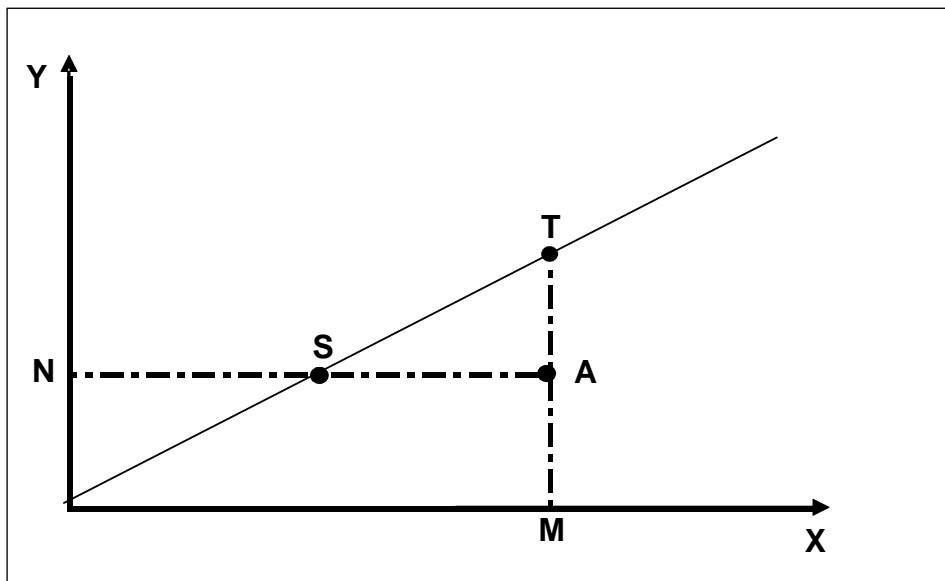


Figura 3.4 - Projeções das orientações “Input” e “Output.”

De outro lado, a redução equi-proporcional dos “inputs” pode não ser suficiente para atingir a eficiência, podendo acontecer que seja necessária uma redução nos “inputs” e um aumento nos “outputs” para atingir a eficiência. O mesmo pode ocorrer para a orientação “output.” Essa redução é expressa pelas folgas diferentes de zero no resultado.

### 3.2.2 O modelo BCC

A suposição do modelo CCR é que todas as DMUs estão operando em uma escala ótima, CRS, isto é um incremento nos “inputs” produz um incremento proporcional nos “outputs,” por isso não considera situações nas quais existem competição imperfeita, restrições nas finanças, etc. A fronteira variável retorna a escala VRS considerando a possibilidade de rendimentos crescentes ou decrescentes de escala na fronteira eficiente. O modelo desenvolvido por BANKER et al. (1984), chamado de modelo BCC, permite situações desse tipo. Eles incluíram no modelo do envelope do CHARNES et al. (1978) a restrição de que a somatória dos  $\lambda$  seja igual a 1, restrição de convexidade, com o que se obtém uma envoltória da forma apresentada na Figura 3.5.

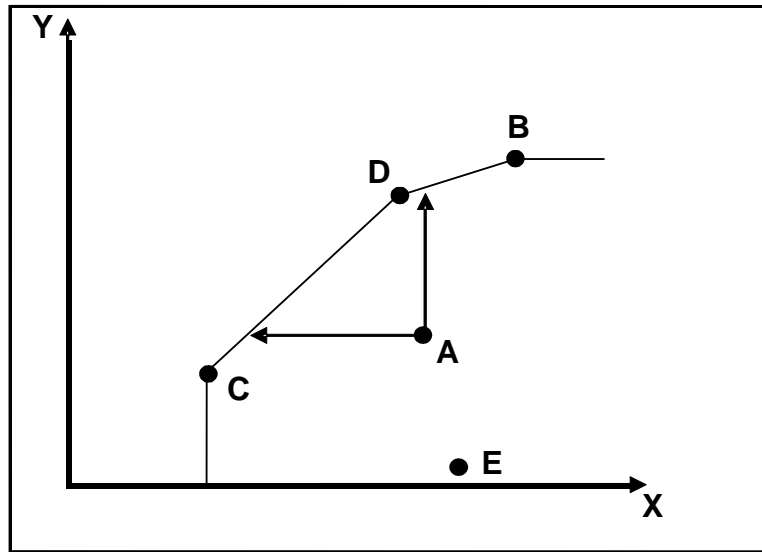


Figura 3.5 - Projeções das orientações na Fronteira VRS

Obtém o modelo do problema do envelope de orientação “input” da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } \theta \quad (3.18)$$

Sujeito a:

$$-O_{y_0} + \sum_{k=1}^n O_{yk} \lambda_k \geq 0, y = 1, \dots, s \quad (3.19)$$

$$\theta I_{y_0} - \sum_{k=1}^n I_{xk} \lambda_k \geq 0, x = 1, \dots, r \quad (3.20)$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1 \quad (3.21)$$

$$\lambda_k \geq 0, \forall k \quad (3.22)$$

Da figura, podemos observar que qualquer DMU será comparada com as DMUs eficientes que operam à mesma escala, isto é, o ponto ótimo de operação, que é refletido

na fronteira, será uma combinação convexa das DMUs observadas. Por exemplo, na figura da referência vemos que a projeção ótima da DMU A, utilizando a orientação “input” é um ponto determinado pela combinação linear das DMUs C e D. De outro lado, utilizando a orientação “output,” o ponto projetado na fronteira, ponto ótimo, é uma combinação linear das DMUs D e B, sendo que para ambas as orientações os valores da combinação linear estão dados pelos  $\lambda$ . Observa-se que as medidas de eficiência nas duas orientações são diferentes.

O modelo dos multiplicadores do modelo BCC é o seguinte:

$$\text{Maximizar } h_0 = \sum_{y=1}^s v_y O_{y0} + v_0 \quad (3.23)$$

Sujeito a:

$$\sum_{x=1}^r u_x I_{x0} = 1 \quad (3.24)$$

$$\sum_{y=1}^s v_y O_{yk} - \sum_{x=1}^r u_x I_{xk} + v_0 \leq 0, k = 1, \dots, n \quad (3.25)$$

$$u_x, v_y \geq 0, \forall x, y \quad (3.26)$$

$$v_0 \text{ irrestrito} \quad (3.27)$$

Como podemos verificar, a formulação dos multiplicadores BCC difere da do CCR somente pela adição da variável  $v_0$ . Da mesma maneira, para a formulação com orientação “output,” o modelo BCC tem a adição de convexidade no modelo do envelope e adição da variável  $u_0$  no modelo dos multiplicadores. Graficamente, o  $v_0$ , ou  $u_0$  na orientação “output,” pode ser interpretado como a intercessão da equação dos planos que definem a envoltória. Na Figura 3.6, observamos que o hiperplano P2, no caso uma reta, tem um  $v_0 > 0$ , e ao contrário, o hiperplano P1 tem um  $v_0 < 0$ .

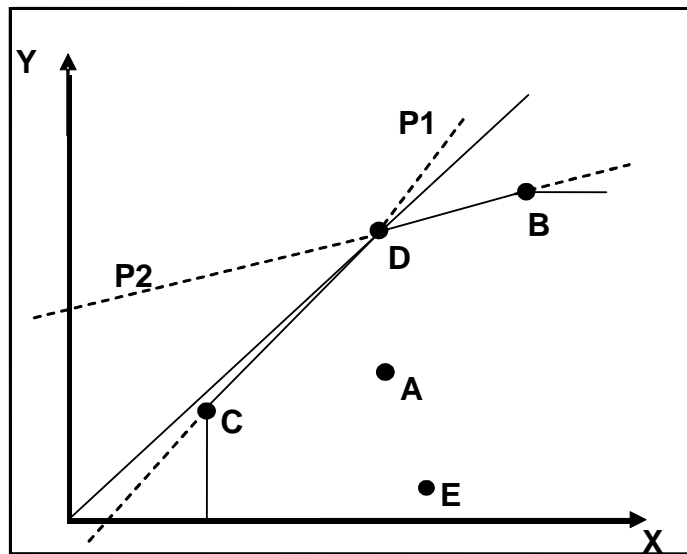


Figura 3.6 - Hiperplanos na fronteira VRS

Cabe destacar que quando a variável  $v_0$  é menor que 0, dizemos que as DMUs no hiperplano estão operando a rendimentos de escala crescentes, caso contrário estão operando a rendimentos de escala decrescentes. Graficamente, as DMUs que trabalham a rendimentos de escala crescentes encontram-se à esquerda da interseção das fronteiras CRS e VRS, DMU C da figura da referência, e as DMUs que trabalham a rendimentos de escala decrescentes encontram-se à direita, DMU B da mesma figura.

Relacionando as fronteiras CRS e VRS, podemos ver das figuras anteriores e do Figura 3.7 que a eficiência das DMUs na fronteira VRS é menor ou igual às eficiências na fronteira CRS. A igualdade ocorrerá na intercessão das duas fronteiras.

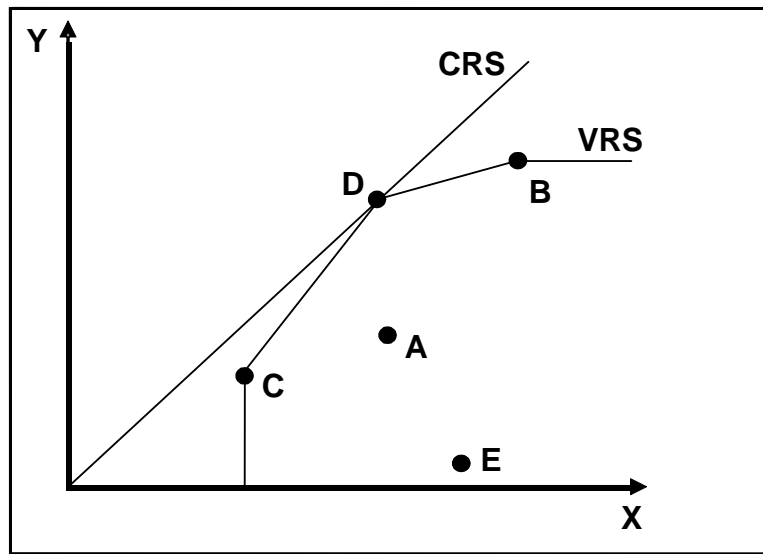


Figura 3.7. Relações das fronteiras CRS e VRS

### 3.2.3 Formulações não arquimedianas para os modelos CCR e BCC

Suponhamos uma situação como a da Figura 3.8, na qual temos dois “inputs” e um “output.”

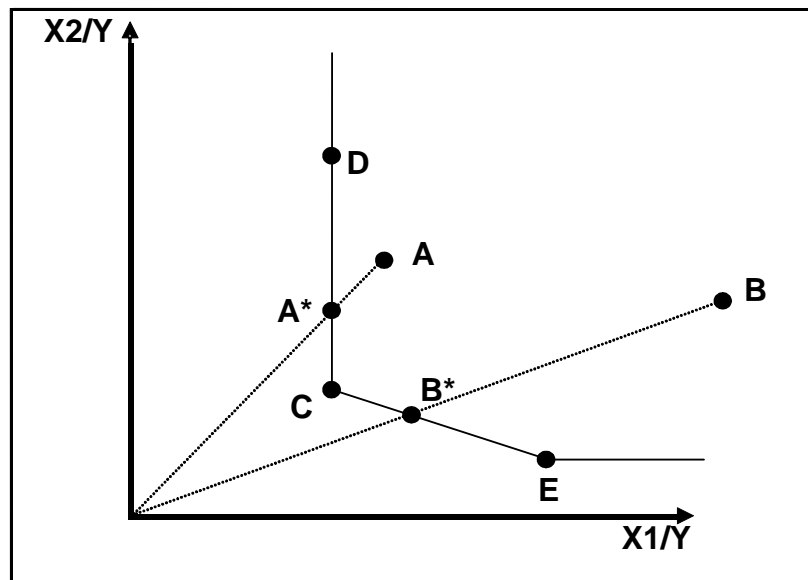


Figura 3.8 - Existência de DMUs Pareto ineficientes.

Em uma situação deste tipo, as formulações até agora vistas dariam como resultado as DMUs D, C e E como eficientes, e as DMUs A e B como ineficientes, sendo que as projeções ótimas, na fronteira destas são A\* e B\*. No entanto, observando

com atenção, podemos verificar que o ponto dado como ótimo  $A^*$  pode melhorar avançando em direção ao ponto C, isto é  $X1/Y$  mantém-se constante enquanto  $X2/Y$  diminui, o que implica que  $X2$  pode ter uma redução sem alterar o nível de  $Y$ . O mesmo acontece com o ponto D cuja referência ótima também é o ponto C. Estes dois casos diferem do caso da DMU B, cuja projeção ótima encontra-se em um ponto que é uma combinação linear das DMUs eficientes C e E. Dá-se então o conceito de Pareto eficiente. No caso de orientação “input,” significa que, quando uma DMU é Pareto eficiente, não se pode mostrar que qualquer outra DMU, ou combinação de DMUs, pode produzir a mesma quantidade de “output” com menos de algum “input” (Koopmans, 1951, Charnes et al., 1981, Lewin e Morey, 1981, Estellita Lins, 1998). Podemos obter uma definição análoga para o caso da orientação ao “output.”

Nas formulações, estes movimentos das DMUs até um ponto Pareto eficiente são dados pelas folgas diferentes de zero. No exemplo, os resultados das formulações correspondentes às DMUs A e D apresentariam uma folga associada à variável  $X2$  no modelo do envelope.

Com o propósito de evitar a identificação de DMUs como eficientes que não são Pareto eficientes, se introduz uma constante não arquimediana,  $\varepsilon$ , associada às folgas, com o que se obtém as seguintes formulações:

Para o modelo CCR orientado ao “input” temos no modelo do problema do envelope:

$$\text{Minimizar } \theta - \varepsilon \cdot \sum_{y=1}^s s_y^+ - \varepsilon \cdot \sum_{x=1}^r s_x^- \quad (3.28)$$

Sujeito a:

$$-O_{y0} + \sum_{k=1}^n O_{yk} \lambda_k - s_y^+ = 0, y = 1, \dots, s \quad (3.29)$$

$$\theta I_{y0} - \sum_{k=1}^n I_{xk} \lambda_k - s_x^- = 0, x = 1, \dots, r \quad (3.30)$$

$$\lambda_k - s_y^+, s_x^- \geq 0, \forall k, y, x \quad (3.31)$$

No caso do modelo do problema dos multiplicadores temos:

$$\text{Maximizar } h_0 = \sum_{y=1}^s v_y O_{y0} \quad (3.32)$$

Sujeito a:

$$\sum_{x=1}^r u_x I_{x0} = 1 \quad (3.33)$$

$$\sum_{y=1}^s v_y O_{yk} - \sum_{x=1}^r u_x I_{xk} \leq 0, k = 1, \dots, n \quad (3.34)$$

$$-v_y \leq -\varepsilon, y = 1, \dots, s \quad (3.35)$$

$$-u_x \leq -\varepsilon, x = 1, \dots, r \quad (3.36)$$

$$u_x, v_y \geq 0, \forall x, y \quad (3.37)$$

Para o modelo BCC com a mesma orientação temos para o problema do envelope a seguinte formulação:

$$\text{Minimizar } \theta - \varepsilon \cdot \sum_{y=1}^s s_y^+ - \varepsilon \cdot \sum_{x=1}^r s_x^- \quad (3.38)$$

Sujeito a:



$$-O_{y0} + \sum_{k=1}^n O_{yk} \lambda_k - s_y^+ = 0, y = 1, \dots, s \quad (3.39)$$

$$\theta I_{y0} - \sum_{k=1}^n I_{xk} \lambda_k - s_x^- = 0, x = 1, \dots, r \quad (3.40)$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1 \quad (3.41)$$

$$\lambda_k - s_y^+, s_x^- \geq 0, \forall k, y, x \quad (3.42)$$

Para o modelo do problema dos multiplicadores temos:

$$\text{Maximizar } h_0 = \sum_{y=1}^s v_y O_{y0} + v_0 \quad (3.43)$$

Sujeito a:

$$\sum_{x=1}^r u_x I_{x0} = 1 \quad (3.44)$$

$$\sum_{y=1}^s v_y O_{yk} - \sum_{x=1}^r u_x I_{xk} + v_o \leq 0, k = 1, \dots, n \quad (3.45)$$

$$-v_y \leq -\varepsilon, y = 1, \dots, s \quad (3.46)$$

$$-u_x \leq -\varepsilon, x = 1, \dots, r \quad (3.47)$$

$$u_x, v_y \geq 0, \forall x, y \quad (3.48)$$

$$v_o \text{ irrestrito} \quad (3.49)$$

Analogamente, podemos construir os modelos CCR e BCC com orientação “output.”

Na função objetivo destes dois modelos dos envelopes para ambas as orientações, a constante não arquimediana  $\epsilon$  permite que a otimização de  $\theta$  também otimize as folgas. Em uma primeira etapa otimiza  $\theta$ , e logo a localização à fronteira de eficiência é feita através das folgas das variáveis,  $s^+$  e  $s^-$ . Logo, matematicamente, uma DMU Pareto eficiente é aquela com  $\theta = 1$ , e todas as folgas,  $s^+$  e  $s^-$ , são iguais a zero.

Estas formulações não arquimedianas geralmente são utilizadas pelos softwares DEA, para a determinação das DMUs eficientes.

### 3.2.4 O modelo aditivo

Apresenta-se o modelo aditivo, desenvolvido por CHARNES et al. (1985), o qual determina uma fronteira VRS, com a característica que pode ser vista na Figura 3.9.

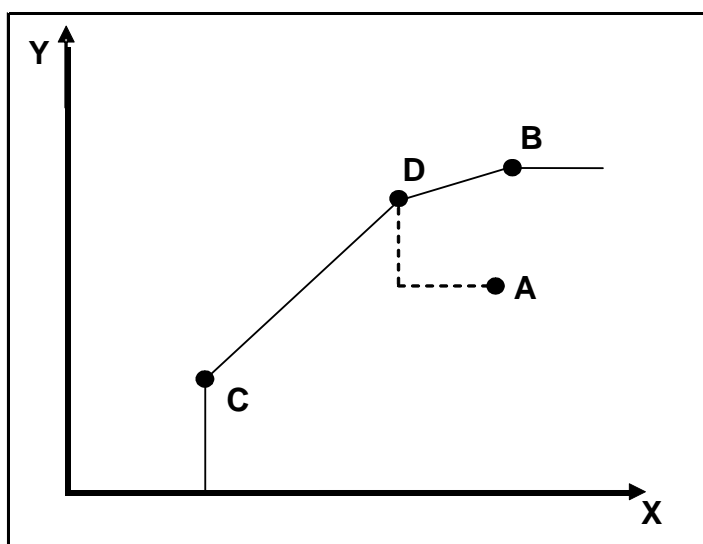


Figura 3.9 - Projeção na fronteira no modelo aditivo

A fronteira na figura indica VRS e esta determinada pelas DMUs B, C e D, sendo a DMU A ineficiente. O modelo aditivo, cuja formulação veremos a seguir, maximiza a folga em direção a uma DMU ótima, sem a redução equi-proporcional dos

dois modelos anteriores nem a determinação da orientação do modelo. O problema do envelope é o seguinte:

$$\text{Minimizar } - \sum_{y=1}^s s_y^+ - \sum_{x=1}^r s_x^- \quad (3.50)$$

Sujeito a:

$$-O_{y0} + \sum_{k=1}^n O_{yk} \lambda_k - s_y^+ = 0, y = 1, \dots, s \quad (3.51)$$

$$- \sum_{k=1}^n I_{xk} \lambda_k - s_x^- = 0, x = 1, \dots, r \quad (3.52)$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1 \quad (3.53)$$

$$\lambda_k, s_y^+, s_x^- \geq 0, \forall k, y, x \quad (3.54)$$

O modelo dos multiplicadores tem a seguinte forma:

$$\text{Maximizar } h_0 = \sum_{y=1}^s v_y O_{y0} - \sum u_x I_{x0} + v_o \quad (3.55)$$

Sujeito a:

$$\sum_{y=1}^s v_y O_{yk} - \sum_{x=1}^r u_x I_{xk} + v_o \leq 0, k = 1, \dots, n \quad (3.56)$$

$$-v_y \leq -1, y = 1, \dots, s \quad (3.57)$$

$$-u_x \leq -1, x = 1, \dots, r \quad (3.58)$$

$$u_x, v_y \geq 0, \forall x, y \quad (3.59)$$

$$v_o \text{ irrestrito} \quad (3.60)$$

No primeiro caso, modelo do envelope, procura-se uma superfície que maximize a distância na direção à fronteira de eficiência porque o modelo determina a combinação mais extrema de todas as DMUs. O dual, problema dos multiplicadores, procura o hiperplano suporte:

$$\sum_{y=1}^s v_y O_{y0} - \sum u_x I_{x0} + v_o \quad (3.61)$$

com  $h_o$  máximo. Nas DMUs ineficientes, mede-se a distância a esse hiperplano.

Uma grande desvantagem deste modelo é que não é invariante em escala, isto é, a mudança da unidade de medida de uma variável influencia o resultado do problema, e a projeção na fronteira é o caminho mais longo na forma padrão (ESTELLITA, 1998).

ALI e SEIFORD (1993) desenvolveram uma formulação do modelo aditivo que considera CRS. Uma explicação mais detalhada do modelo aditivo encontra-se em CHARNES et al. (1985).

Além deste modelo, temos outros desenvolvidos nos últimos anos, como por exemplo, o modelo multiplicativo que, diferentemente dos outros modelos, permite uma envoltória log-linear ou Cobb-Douglas por partes. Não apresentaremos este modelo mas ele pode ser encontrado em CHARNES et al. (1983).

De outro lado, modelos mais atuais da DEA permitem a inclusão de variáveis não discricionárias e variáveis categóricas. Por variáveis discricionárias entendemos que são variáveis que não podem ser controladas, como por exemplo as variáveis ambientais. De outro lado, as variáveis categóricas são variáveis ordinais, que expressam a presença ou falta de alguma característica, uma capacidade particular ou uma representação discreta, como categorias populacionais. CHARNES et al. (1993)

desenvolveram um modelo para cada caso, que resolve os problemas com algumas suposições prévias simples.

Um dos itens mais avançados e mais desenvolvidos na DEA, pelo reflexo de realidade, é a incorporação das opiniões dos especialistas, ou usuários dentro do modelo. Estas opiniões são adicionadas no modelo do problema dos multiplicadores em forma de restrições adicionais. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos a respeito, os quais consideram diferentes tipos de restrições segundo as necessidades. Uma pesquisa muito bem documentada foi desenvolvida por ALLEN et al. (1998), onde podem ser achadas as distintas maneiras de incorporar essas restrições, os tipos de restrições, as aplicações feitas, e uma ampla bibliografia ao respeito.

## 4. Sistema de ar condicionado da sala de controle de uma usina nuclear

### 4.1 Função

O sistema tem a função de manter condições ambientais adequadas e seguras para o pessoal e equipamentos durante condições de operação normal ou de emergência, quando há um acidente de perda de refrigerante e/ou “black-out.” (BARRETO et al., 2002).

### 4.2 Bases de projeto

Segundo BARRETO et al. (2002), manter condições ambientais adequadas e seguras para o pessoal e para operações dos equipamentos, evitando a contaminação do ar por partículas, através do estabelecimento de uma pressão positiva de 2,5 mmca no interior da sala de controle.

Manter o nível de contaminação do ar abaixo dos limites máximos permissíveis pelas normas básicas de proteção radiológica da CNEN, mantendo desse modo as doses, no interior da sala de controle, tão baixas quanto possível durante operação normal e em emergência devido a acidentes de perda de refrigerante e/ou “black-out.”

### 4.3 Descrição operacional

Segundo BARRETO et al. (2002), o ar para a sala de controle, em condições normais de operação, é oriundo da área externa, sendo admitido através do abafador HV-5959 fluindo diretamente para uma das unidades de ar condicionado (VA -22 A/B) e então suprido para os diversos pontos da sala, conforme demonstrado no Apêndice B.

A fim de manter as condições segura para o pessoal de operação, na sala de controle, o sistema alinha-se automaticamente para modo de emergência, conforme no Apêndice C, quando ocorrer:

- i. Injeção de segurança;
- ii. “Black-out;”

- iii. Alta radiação;
- iv. Alta concentração de cloro.

O alinhamento automático do sistema para modo de emergência corresponde às seguintes atuações:

- i. Parte a unidade que estiver de prontidão – VA – 22 A ou B;
- ii. Parte os ventiladores reforçados – VA – 26 A e B;
- iii. Desliga os ventiladores de exaustão VA – 27;
- iv. Fecha os abafadores HV – 5959 e PV – 5963;
- v. Abre o abafador HV – 5955;
- vi. Abafadores PV – 5957 e B modulam.

Os abafadores PV – 5957 A e B ficarão modulando de forma a manter a pressurização positiva da sala de controle, através da admissão de ar externo pela veneziana fixa.

No caso de alta concentração de cloro, os abafadores PV – 5957 A e B permanecerão fechados, sendo que este sinal de fechamento sobrepuja os demais.

Quando o sistema for restabelecido, é necessário atuar nas botoeiras de rearme localizadas no painel de segurança, seção E, da sala de controle, após o que o sistema poderá ser passado para o modo normal de operação.

Caso o realinhamento para emergência tenha sido causado por sinal de alta radiação, o rearme só poderá ser efetuado após autorização da proteção radiológica.

Os seguintes equipamentos podem ser operados em modo local da sala de evaporadores:

- i. Ventiladores reforçados VA – 26 A/B;
- ii. Unidades de ar condicionado VA – 22 A/B;
- iii. Abafador HV – 5959;
- iv. Abafador PV – 5963.

Na perda de ar de instrumentos, os abafadores do sistema irão para posição de falha:

- i. HV – 5959 Renovação de ar – falha fechado;
- ii. PV – 5957 A e B controle de pressão em emergência – falham fechados;
- iii. HV – 5955 Entrada de filtro – falha aberto;
- iv. PV – 5963 Controle de pressão modo normal – falha fechado.

Nesta situação não haverá controle de pressão na sala de controle. O sistema ficará apenas em recirculação e será necessário parar o VA – 27 e ligar um dos VAs 26 A ou 26 B.

Cada unidade de ar condicionado é composta de compressor (VA – 54 A/B), condensador (VA – 53 A/B), evaporador e ventilador (VA – 22 A/B).

Na sucção do ventilador de exaustão (VA – 27) e na descarga dos ventiladores reforçados (VAs 26 A/B), existem detectores de fumaça que não perfazem nenhuma função automática, fornecendo apenas indicação local e alarme no painel de incêndio da sala de controle. No entanto, os detectores de fumaça DT – 33 e DT – 34, localizados na descarga dos VAs – 22 A e VA – 22B respectivamente, uma vez atuados, desarmam a unidade e o aquecedor correspondente e partem a outra unidade que está em prontidão, além de alarmarem no painel de incêndio da sala de controle.

O óleo do compressor é aquecido por uma resistência no cárter, que deve ser ligada através do fechamento do disjuntor do equipamento, no mínimo 2 horas antes da partida do compressor, após uma parada longa, a fim de evitar arraste de óleo e gás.

No painel local ao lado dos compressores, existe uma botoeira, que quando pressionada, acende uma lâmpada verde se a resistência estiver ligada. A lâmpada apaga ao ser liberada a botoeira.

Nos Apêndices B e C estão os fluxogramas de processo do ASC em operação normal e operação em emergência.



## 5. Aplicação da FMEA de produto ao sistema de condicionado da sala de controle de uma usina nuclear

### 5.1 Constituição da equipe

A equipe de trabalho para o desenvolvimento da FMEA de produto foi a seguinte:

- i. Engenheiro de Sistema – Sidnei Barbosa, Eletronuclear
- ii. Engenheiro de processo e confiabilidade – Gilberto Varanda, White Martins
- iii. Engenheiro Eletricista – Rodrigo Basso, White Martins
- iv. Engenheiro Químico – Marden Ferreira, White Martins
- v. Engenheiro Mecânico – Romel Santana, Fokal Engenharia
- vi. Engenheiro de projeto – Adriano Coutinho, Albcou Montagens e Construções Industriais

Para a formação desta equipe de trabalho, foi levada em consideração, a experiência profissional de cada um em sua área de atuação profissional e a disponibilidade de estarmos realizando este trabalho em conjunto.

O Sidnei Barbosa, trabalha como engenheiro de sistema do ASC na usina nuclear Angra 1 e foi designado pela Eletronuclear para nos suportar fornecendo informações técnicas do ASC, o Rodrigo Basso, Marden Ferreira e Adriano Coutinho trabalham no Centro de Tecnologia Rio, CTR, da White Martins Gases Industriais Ltda. desenvolvendo protótipos para aplicação de gases industriais, sendo que o Adriano Coutinho, através da empresa Albcou Montagens e Construções Industriais Ltda., o Romel Santana, trabalha na manutenção de turbinas aeronáuticas através da Fokal Engenharia e eu trabalho como engenheiro de processo de “Standard Plants,” na produção de oxigênio e nitrogênio na White Martins Gases Industriais Ltda.

## 5.2 Desenvolvimento da FMEA de produto

Os componentes que têm a maior representatividade do ASC foram selecionados para a aplicação da FMEA e estão ilustrados na Figura 5.1. São eles:

- i. AE-5962 A/B - Analisador de cloro;
- ii. HV-5959 - Abafador de fluxo;
- iii. VA-22 A/B - Evaporador e ventilador;
- iv. DT 33/34 - Detector de fumaça;
- v. VA 29 A/B - Aquecedor elétrico;
- vi. VA-53 A/B - Condensador a ar;
- vii. VA-54 A/B - Compressor das unidades de resfriamento;
- viii. VA-27 - Ventilador de exaustão;
- ix. PV-5963 - Controle de pressão modo normal – falha fechado;
- x. PV 5957 A/B - Controle de pressão em emergência – falha fechado;
- xi. VA-25 A/B/C/D - Unidade de filtração;
- xii. VA-26 A/B - Ventiladores reforçadores;
- xiii. HV-5955 - Entrada do filtro – falha aberto.

A FMEA é uma técnica indutiva de identificação de perigos, ou seja, admite que o componente está em um estado específico e determina o seu efeito sobre o sistema. Utilizando este raciocínio, a FMEA foi aplicada individualmente para todos os componentes selecionados do ASC e está demonstrada nas Tabelas de 5.1 a 5.13.

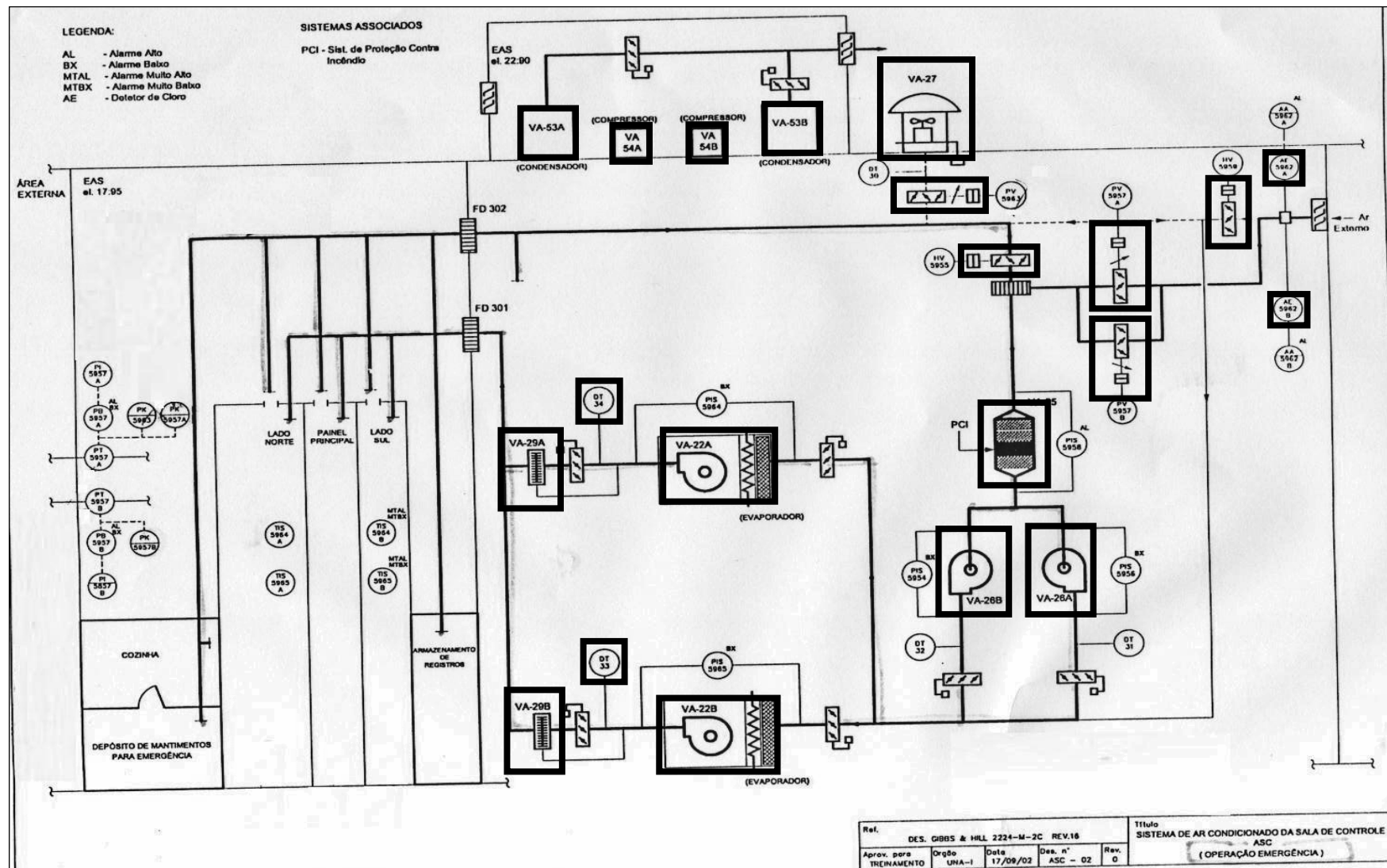


Figura 5.1 – Principais componentes do ASC

Tabela 5.1 – Desenvolvimento da FMEA no analisador de cloro

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Analisador de cloro</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>AE-5962A/B</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
1	Analisar a concentração de cloro	Indicação falsa alta da conc. de cloro	S	7	Descalibrado	3	Alarmes de alta conc., rotina de calibr., redund., treinamento	2	42	Manter em estoque um analisador de cloro.								
2		Indicação falsa baixa da conc. de cloro	N	5	Descalibrado	6	Rotina de calibração/ Redundância, treinamento	2	60	Sem ação no momento.								
3		Operação normal com baixa concentração de cloro.	S	10	Descalibrado	6		2	120	Sem ação no momento.								
4		Operação normal alta concentração de cloro, impedindo dos operadores continuarem na sala de controle e impedindo a operação da Usina	S	9	Formação de ácido clorídrico, a partir do Cl e umidade, H <sub>2</sub> O	6	Idem, rotina de inspeção, treinamento	2	108	Sem ação no momento.								
5		Operação normal com alta concentração de cloro no ASC, acelerando o processo de corrosão/avarias nos equipamentos	S	7	Descontinuidade no cabo	4	Rotina de inspeção, treinamento	2	56									
		Sem indicação da conc. de cloro	S	7	Ativação do modo de emergência do ASC													

Tabela 5.2 – Desenvolvimento da FMEA no abafador de fluxo (pág 1/2)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Abafador de fluxo</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>HV-5959</b> Página 1 de 2 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
6	Renovação de ar no modo normal ou bloqueio de entrada de ar no modo emergência	Válvula não abre	S	7	Falta de ar de instrumento	6	Alarme indicando baixa pressão de ar de instrumento	4	168	Rotina de inspeção no compressor de ar de instrumento e no pressostato.								
7				7	Atuador pneumático travado	3	Inspeção de rotina	3	63	Manter sobressalentes em estoque								
8				7	Falta de lubrificação	3	Inspeção de rotina e treinamento	4	84	Sem ação no momento.								
9				7	Rompimento da mangueira de ar de instrumento	3	Inspeção visual de rotina	3	63	Manter sobressalentes em estoque								
10				7	Desgaste de Rolamento	4	Inspeção de rotina e treinamento	5	140	Manter sobressalentes em estoque								
11	Válvula não fecha	No modo emergência, há possibilidade de contaminação da sala de controle impedindo o desligamento seguro da usina. No modo normal ela já trabalha aberta	S	10	Eixo/chaveta cisalhado	2	Inspeção de rotina	8	160	Ajuste de batente e veloc. de atuação do conj. Válvula e atuador na bancada de testes e posterior ajuste no local da montagem definitiva								

Tabela 5.2 – Desenvolvimento da FMEA no abafador de fluxo (pág 2/2)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Abafador de fluxo</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>HV-5959</b> Página 2 de 2 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
12	Renovação de ar no modo normal ou bloqueio de entrada de ar no modo emergência	Válvula não fecha		10	Válvula solenóide dando passagem	1	Manutenção Preventiva	7	70	Manter sobressalentes em estoque								

Tabela 5.3 – Desenvolvimento da FMEA no evaporador ventilador (pág 1/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da Sl. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Evaporador e ventilador</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-22A/B</b> Página 1 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
13	Refrigeração do ar da sala de controle	Correia do ventilador desajustada	S	10	Folga na correia	4	Inspeção a cada 2 meses, redundância no sistema	2	80	Sem ação no momento.								
14		Válvula de expansão danificada	S	10	Desgaste	4	Transmissores de temperatura, redundância no sistema	5	200	Desenvolver um método de inspeção								
15		Baixa eficiência térmica	S	10	Corrosão, intempéries, isolamento térmico danificado	5	Inspeção a cada 2 meses, transmissores de temperatura, redundância no sistema	2	100	Sem ação no momento								



Tabela 5.3 – Desenvolvimento da FMEA no evaporador ventilador (pág 2/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Evaporador e ventilador</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-22A/B</b> Página 2 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	∇	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
16	Filtros saturados	Aumento da perda de carga no sistema. Linha de líquido refrig. congelada. Modo Normal e Emergência: idem item anterior	S	10	Ambiente agressivo	7	Indicador de pressão diferencial, redund. no sistema, inspeção a cada 2 meses	3	210	Aumentar a frequência de inspeção dos filtros								
17	Excesso de vibração	Quebra do equipamento. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétricos, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emerg: evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Desbalanceamento Falta de lubrificação	6	Transmissor de vibração, inspeção e lubrificação a cada 2 meses, redundância no sistema	2	120	Sem ação no momento								
18	Avaria no mancal do ventilador	Cisalamento do eixo/chaveta. Parada do equip.. Modo Normal e Emergência Idem ao anterior.	S	10	Desbalanceamento Falta de lubrificação	5	Transmissor de vibração, inspeção e lubrificação a cada 2 meses, redundância no sistema	2	100	Sem ação no momento								

Tabela 5.3 – Desenvolvimento da FMEA no evaporador ventilador (pág 3/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Evaporador e ventilador</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-22A/B</b> Página 3 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
19	Baixa pressão de óleo	Parada do Equipamento. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétrico, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emergência: evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Carreamento do óleo do Carter devido à inoperância dos controles de capacidade térmica	8	Pressostato, inspeção a cada 2 meses, redundância no sistema	2	160	Aumentar a frequência de inspeção								
20	Perda do fluido refrigerante	Perda de capac. de refrigeração. Modo Normal e Emergência: idem item anterior	S	10	Corrosão na serpentina, vazamento	5	Transmissores de temperatura, inspeção a cada 2 meses, redundância no sistema	2	100	Sem ação no momento								

Tabela 5.4 – Desenvolvimento da FMEA no detector de fumaça (pág. 1/1)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade														Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Detector de fumaça</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>DT33 / DT34</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação							
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN			
21	Identificar incêndios no sistema	Detecção falsa de fumaça	S	6	Célula danificada	2	Rotina de inspeção, redundância no sistema	3	36	Sem ação no momento									
22		Sem detecção de fumaça	S	10	Descontinuidade do cabo, célula danificada	2	Rotina de inspeção, redundância no sistema	3	60	Manter sobressalentes em estoque									

Tabela 5.5 – Desenvolvimento da FMEA no aquecedor elétrico (pág. 1/1)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da Sl. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Aquecedor elétrico</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-29 A / B</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
23	Ajuste fino de temperatura na sala de controle (± 2°C)	Não ajusta a temperatura do ar		2	Descontinuidade do fio, falta de alimentação elétrica, falha do transmissor de temperatura	3	Inspeção de rotina	3	18	Sem ação no momento								
24		Aquecimento contínuo do ar		2	Falha do transmissor de temperatura	3	Inspeção de rotina	3	18	Sem ação no momento								

Tabela 5.6 – Desenvolvimento da FMEA no condensador a ar (pág. 1/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Condensador a ar</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-53 A / B</b> Página 1 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
25	Condensar o fluido refrigerante	Correia do ventilador desajustada	S	10	Folga na correia	4	Inspeção a cada 2 meses, redundância no sistema	2	80	Sem ação no momento.								
26	Filtros saturados	Aumento da perda de carga no sistema, congelamento da linha líquido refrigerante. Modo Normal e Emergência: idem item anterior	S	10	Ambiente agressivo	7	Indicador de pressão diferencial de, redundância no sistema, inspeção a cada 2 meses	3	210	Aumentar a frequência de inspeção dos filtros								

Tabela 5.6 – Desenvolvimento da FMEA no condensador a ar (pág. 2/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da Sl. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Condensador a ar</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-53 A / B</b> Página 2 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
27	Excesso de vibração	Quebra do equipamento. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétricos, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emerg.: Evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Desbalanceamento Falta de lubrificação	6	Transmissor de vibração, inspeção e lubrificação a cada 2 meses, redundância no sistema	2	120	Sem ação no momento								
28	Avaria no mancal do ventilador	Cisalhamento do eixo/chaveta. Parada do equip.. Modo Normal e Emerg. Idem ao anterior.	S	10	Desbalanceamento Falta de lubrificação	5		2	100	Sem ação no momento								
29	Queima do motor elétrico	Parada do equip. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétricos, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emergência: evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Curto circuito, isolamento, cabo de alimentação rompido	3	Inspeção periódica, redundância no sistema	3	90	Aumentar a frequência de inspeção								

Tabela 5.6 – Desenvolvimento da FMEA no condensador a ar (pág. 3/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Condensador a ar</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-53 A / B</b> Página 3 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
30	Sentido de rotação do ventilador invertido	Perda de capac. de refrigeração. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétricos, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emergência: evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Ligação elétrica incorreta.	3	Transmissor de temperatura da sala de controle, redundância no sistema	5	150	Incluir este item no <i>Check-list</i> de montagem após reparo/manut.								
31	Eficiência Baixa	Perda de capac. de refrigeração. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétricos, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emergência: evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Sujeira no condensador	5	Transmissor de temperatura da sala de controle, redundância no sistema	5	250	Realizar lavagem periódica no condensador								

Tabela 5.7 – Desenvolvimento da FMEA no compressor das unidades de resfriamento (pág. 1/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Compressor das unidades de resfriamento</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-54 A / B</b> Página 1 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
32	Comprimir o fluido refrigerante para alimentar o sistema de ar condicionado	Baixa eficiência térmica	S	10	Corrosão, intempéries, isolamento térmico danificado, vazamento de fluido refrig.	5	Inspeção a cada 2 meses, transmissores de temperatura, redundância no sistema	2	100	Sem ação no momento								
33		Baixa pressão de óleo	S	10	Problema na bomba de óleo, obstrução na tub. de óleo, ajuste incorreto na pressão, vazamento de óleo	8	Pressostato, inspeção geral e tribologia a cada 2 meses, redundância no sistema	2	160	Sem ação no momento								
34		Válvula de controle de capacidade do compressor não modula	S	10	Falha no atuador pneumático, falha no posicionador, falta de ar de instrumento	4	Transmissor de pressão na descarga do compressor, redundância do sistema	3	120	Inspeção periódica								



Tabela 5.7 – Desenvolvimento da FMEA no compressor das unidades de resfriamento (pág. 2/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Compressor das unidades de resfriamento</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-54 A / B</b> Página 2 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
35	Alta pressão na descarga	Parada do Equipamento. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétrico, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emergência: evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Ar ou gases não-condensáveis no sistema, válvula de descarga total ou parcialmente fechada, refrigerante líquido no compressor, excesso de refrigerante no sistema, falta de água na torre de resfriamento, má troca de calor no condensador, condensador defeituoso	3	Transmissor de pressão, inspeção periódica do processo, redundância no sistema	3	90	Sem ação no momento								
36	Superaquecimento do óleo	Reduz a viscosidade do óleo e a pressão. Parada do Equipamento. Modo normal e emergência idem ao item anterior	S	10	problema de alimentação de fluido frio no radiador de óleo, sujeira no radiador de óleo, baixo suprimento de refrigerante, óleo no refrigerante	3	Indicador de temperatura, inspeção periódica, redundância no sistema	3	90	Sem ação no momento								

Tabela 5.7 – Desenvolvimento da FMEA no compressor das unidades de resfriamento (pág. 3/3)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Compressor das unidades de resfriamento</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-54 A / B</b> Página 3 de 3 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
37	Baixa pressão na sucção	Parada do Equipamento. Modo Normal: desconforto térmico, falha humana. Falta de refrigeração nos painéis elétrico, pane no sistema, parada de Usina N. Modo Emergência: evacuar a sala de controle, desligamento seguro fora da sala	S	10	Baixo suprimento de refrigerante no evaporador, parcial ou completo congelamento do evaporador, válvula solenóide defeituosa, defeito mecânico na válvula de expansão, filtro entupido, ajuste errado no controle do evaporador, má troca de calor no condensador, formação de gelo na válvula de expansão devido à presença de umidade no refrigerante, vazamento de refrigerante.	3	Transmissor de pressão, inspeção periódica do processo, redundância no sistema	3	90									

Tabela 5.8 – Desenvolvimento da FMEA no ventilador de exaustão (pág. 1/1)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Ventilador de exaustão</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-27</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
38	Renovação de ar	Sentido de rotação do ventilador invertido	N	7	Ligação elétrica incorreta	3	Inspeção periódica	4	84	Incluir este item no <i>Check-list</i> de montagem após reparo/manut.								
39		Queima do motor elétrico	N	7	Curto circuito, isolamento, cabo de alimentação rompido	4	Inspeção periódica	4	112	Aumentar a frequência de inspeção								
40		Avaria no mancal do ventilador	N	7	Desbalanceamento Falta de lubrificação	5	Inspeção periódica	4	140	Sem ação no momento								
41		Excesso de vibração	N	7	Desbalanceamento Falta de lubrificação	6	Transmissor de vibração, inspeção e lubrificação a cada 2 meses	3	126	Sem ação no momento								

Tabela 5.9 – Desenvolvimento da FMEA na válvula de controle de pressão PV-5963 (pág. 1/1)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Controle de pressão modo normal – Falha Fechado</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>PV-5963</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
42	Válvula não abre	Não haverá controle de pressão de ar na sala de controle no modo normal, no modo emergência está válvula trabalha fechada	N	7	Falta de ar de instrumento,	4	Alarme indicando baixa pressão de ar de instrumento	4	112	Rotina de inspeção no compressor de ar de instrumento e no pressostato.								
43				7	Atuador pneumático travado	3	Inspeção de rotina Inspeção de rotina	3	63	Manter sobressalentes em estoque								
44				7	Falta de lubrificação	3	Inspeção de rotina e treinamento	4	84	Sem ação no momento.								
45				7	Rompimento da mangueira de ar de instrumento	3	Inspeção visual de rotina	3	63	Manter sobressalentes em estoque								
46				7	Desgaste de Rolamento	4	Inspeção de rotina e treinamento	5	140	Manter sobressalentes em estoque								
47	Válvula não fecha	No modo emerg., há possibilidade de contaminação da sala de controle impedindo o desligamento seguro da usina. No modo normal trabalha aberta	S	10	Eixo/chaveta cisalhado	2	Inspeção de rotina	8	112	Ajuste de batente e veloc. de atuação do conj. Válvula e atuador na bancada de testes e posterior ajuste no local da montagem definitiva								

Tabela 5.10 – Desenvolvimento da FMEA na válvula de controle de pressão PV-5957 A/B (pág. 1/2)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Controle de pressão em emergência – falha fechado</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>PV-5957A/B</b> Página 1 de 2 páginas		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
48	Controlar a pressão da sala de controle no modo Emergência	Válvula não abre	S	10	Falta de ar de instrumento,	3	Alarme indicando baixa pressão de ar de instrumento, sistema em redundância	4	120	Rotina de inspeção no compressor de ar de instrumento e no pressostato.								
49				10	Atuador pneumático travado	2	Inspeção de rotina Inspeção de rotina, sistema em redundância	3	60	Manter sobressalentes em estoque								
50				10	Falta de lubrificação	2	Inspeção de rotina e treinamento, sistema em redundância	4	80	Sem ação no momento.								
51				10	Rompimento da mangueira de ar de instrumento	2	Inspeção visual de rotina, sistema em redundância	3	60	Manter sobressalentes em estoque								
52				10	Desgaste de Rolamento	2	Inspeção de rotina e treinamento, sistema em redundância	5	100	Manter sobressalentes em estoque								

Tabela 5.10 – Desenvolvimento da FMEA na válvula de controle de pressão PV-5957 A/B (pág. 2/2)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade				Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Controle de pressão em emergência – falha fechado</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda				Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>PV-5957A/B</b> Página 2 de 2 páginas								
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação				
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN
53	Válvula não fecha	Não haverá controle de pressão de ar na sala de controle no modo emergência, no modo normal não haverá problema se está válvula trabalhar aberta	S	10	Eixo/chaveta cisalhado	2	Inspeção de rotina	8	160	Ajuste de batente e veloc. de atuação do conj. Válvula-atuador na bancada de testes e posterior ajuste no local da montagem definitiva						

Tabela 5.11 – Desenvolvimento da FMEA na unidade de filtragem (pág. 1/1)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da Sl. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Unidade de filtragem</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-25A/B/C/D</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
54	Evitar de que radiação e partículas suspensas irem para a sala de controle	Filtros saturados		10	Aumento da perda de carga no sistema sobrecarregando todo o sistema	2	Indicador de pressão diferencial, inspeção periódica,	3	60	Instalação de ventiladores adicionais (existente)								
55		Filtros fora da especificação	S	10	No modo emergência, passagem de radiação para a sala de controle	2	Fornecedor entregou fora da especificação, falha na conferência no ato do recebimento do material	2	40	É necessária a certificação do fabricante do componente seguindo a 10CFR50-emitido pela NRC								

Tabela 5.12 – Desenvolvimento da FMEA nos ventiladores reforçadores (pág. 1/1)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Ventiladores reforçadores</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>VA-26A/B</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
56	Manter a pressão interna da sala de controle, compensando a perda da carga imposta pelo filtro VA-25	Correia do ventilador desajustada		S	10	Folga na correia	4	Inspeção a cada 2 meses, redundância no sistema	2	80	Sem ação no momento.							
57		Excesso de vibração		S	10	Desbalanceamento Falta de lubrificação	6	Transmissor de vibração, inspeção e lubrificação a cada 2 meses, redundância no sistema	2	120	Sem ação no momento							
58		Avaria no mancal do ventilador		S	10	Desbalanceamento Falta de lubrificação	5		2	100	Sem ação no momento							
59		Queima do motor elétrico		S	10	Curto circuito, isolamento, cabo de alimentação rompido	3	Inspeção periódica, redundância no sistema	3	90	Aumentar a frequência de inspeção							



Tabela 5.13 – Desenvolvimento da FMEA na válvula de Entrada do filtro – falha aberto (pág. 1/1)

Identificação do Sistema: Sist. Ar Cond. da SI. de Contr. Usina Nuclear Responsabilidade do Projeto: Gerência de Engenharia de Sistemas Pessoa responsável: Gerência de Engenharia de Sistemas Envolvimento de Outras Áreas: Regras de Man., Man., Oper., Planej. de Man., Div. de Seg. Nuclear, Div. de Controle de Trab., Prot. Rad., Garantia de Qualidade													Envolvimento de Fornecedores: Não Aplicável Modelo/Produto: <b>Entrada do filtro – falha aberto</b> Data de Liberação da Engenharia: Jun/1980 Preparado por: Gilberto Varanda			Data do FMEA: 06/04/2006 Data da Rev. FMEA: 14/03/2007 Nome do Componente: <b>HV-5955</b> Página 1 de 1 página		
Função do projeto	Modo de falha potencial	Efeitos de falha potencial	▽	SEV	Causa(s) de falha potencial	OCO	Método de detecção	DET	RPN	Ações Recomendadas	Responsabilidade da área/pessoal e data de conclusão	Resultados da Ação						
												Ações Realizadas	SEV	OCO	DET	RPN		
60	Entrada de ar no filtro VA-25	Válvula não abre		S	10	Atuador pneumático travado	3	Inspeção de rotina	3	90	Manter sobressalentes em estoque							
61				S	10	Falta de lubrificação	3	Inspeção de rotina e treinamento	3	90	Sem ação no momento.							
62				S	10	Desgaste de Rolamento	4	Inspeção de rotina e treinamento	5	200	Manter sobressalentes em estoque							
63		Válvula não fecha		S	10	Eixo/chaveta cisalhado	2	Inspeção de rotina	8	160	Ajuste de batente e veloc. de atuação do conj. Válvula e atuador na bancada de testes e posterior ajuste no local da montagem definitiva							
64				S	10	Falta de ar de instrumento	6	Alarme indicando baixa pressão de ar de instrumento	3	180	Rotina de inspeção no compressor de ar de instrumento e no pressostato.							
65				S	10	Rompimento da mangueira de ar de instrumento	3	Inspeção visual de rotina	3	90	Manter sobressalentes em estoque							

### 5.3 Resultados da FMEA de produto

Para uma FMEA, é importante agrupar os dados em uma única tabela e em seguida ordená-los de forma decrescente por RPN. Desta forma, é facilitada a compreensão dos maiores perigos identificados após a aplicação da FMEA. A Tabela 5.14 demonstra esse ordenamento.

Todos os eventos listados na Tabela 5.14 se encontram detalhados nas Tabelas de 5.1 a 5.13.

Tabela 5.14 – Ordenamento por RPN após a análise FMEA

Evento	Severidade	Ocorrência	Detecção	RPN
31	10	5	5	250
16	10	7	3	210
26	10	7	3	210
14	10	4	5	200
62	10	4	5	200
64	10	6	3	180
6	7	6	4	168
11	10	2	8	160
19	10	8	2	160
33	10	8	2	160
53	10	2	8	160
63	10	2	8	160
30	10	3	5	150
10	7	4	5	140
40	7	5	4	140
46	7	4	5	140
41	7	6	3	126
3	10	6	2	120
17	10	6	2	120
27	10	6	2	120
34	10	4	3	120
48	10	3	4	120
57	10	6	2	120
39	7	4	4	112
42	7	4	4	112
47	7	2	8	112
4	9	6	2	108
15	10	5	2	100
18	10	5	2	100
20	10	5	2	100

Tabela 5.14 – Classificação do RPN após a análise FMEA (Continuação)

Evento	Severidade	Ocorrência	Detecção	RPN
28	10	5	2	100
32	10	5	2	100
52	10	2	5	100
58	10	5	2	100
29	10	3	3	90
35	10	3	3	90
36	10	3	3	90
37	10	3	3	90
59	10	3	3	90
60	10	3	3	90
61	10	3	3	90
65	10	3	3	90
8	7	3	4	84
38	7	3	4	84
44	7	3	4	84
13	10	4	2	80
25	10	4	2	80
50	10	2	4	80
55	10	2	4	80
56	10	4	2	80
12	10	1	7	70
7	7	3	3	63
9	7	3	3	63
43	7	3	3	63
45	7	3	3	63
2	5	6	2	60
22	10	2	3	60
49	10	2	3	60
51	10	2	3	60
54	10	2	3	60
5	7	4	2	56
1	7	3	2	42
21	6	2	3	36
23	2	3	3	18
24	2	3	3	18

A partir da Tabela 5.14, foram selecionados todos os eventos com RPN acima dos numerais 100 e ordenados na Tabela 5.15. Para haver uma diminuição das falhas potencialmente perigosas no ASC, as recomendações para os itens listados na Tabela 5.15 deverão ser seguidas e/ou uma revisão da análise FMEA deverá ser feita para o aumento da confiabilidade no sistema. Estas recomendações estão detalhadas nas Tabelas de 5.3 a 5.13.

Tabela 5.15 – Eventos para discussão após a aplicação da FMEA

Evento	S	O	D	RPN
31	10	5	5	250
16	10	7	3	210
26	10	7	3	210
14	10	4	5	200
62	10	4	5	200
64	10	6	3	180
6	7	6	4	168
11	10	2	8	160
19	10	8	2	160
33	10	8	2	160
53	10	2	8	160
63	10	2	8	160
30	10	3	5	150
10	7	4	5	140
40	7	5	4	140
46	7	4	5	140
41	7	6	3	126
3	10	6	2	120
17	10	6	2	120
27	10	6	2	120
34	10	4	3	120
48	10	3	4	120
57	10	6	2	120
39	7	4	4	112
42	7	4	4	112
47	7	2	8	112

O critério adotado de ordenação por RPN a partir do número 100 é apenas uma proposta, levando em consideração a importância do ASC para manter o conforto térmico dos operadores na operação modo normal, normal fora-de-rotina, como por exemplo, a partida e a parada da usina nuclear e a operação no modo emergência. Tem que levar também em consideração, de que forma a temperatura elevada pode influenciar no desempenho dos componentes elétricos e mecânicos que estão dentro da sala de controle. A influência da temperatura elevada nestes componentes não é conhecida até o momento.

## 6. Aplicação da FMEA-DEA ao sistema de condicionado da sala de controle de uma usina nuclear

### 6.1 Seleção das DMUs

As DMUs adotadas neste estudo de caso serão os 65 eventos potencialmente perigosos identificados na aplicação da análise FMEA e que se encontram detalhados nas Tabelas de 5.1 a 5.13.

### 6.2 Determinação das variáveis

A determinação das variáveis é muito importante para o cálculo da eficiência no ASC. Nesta dissertação, as variáveis adotadas serão a severidade, a ocorrência e a detecção.

### 6.3 Modelagem matemática da análise FMEA-DEA

O modelo desenvolvido baseia-se em programação linear onde se deseja maximizar os “outputs” dado um nível de “input,” ou minimizar os “inputs” dado um nível de “output.” A modelagem matemática orientada para os “outputs” desenvolvida pode ser vista nas equações 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4. (GARCIA et al., 2005).

$$\mathbf{Min} \mathbf{h}_1 = \sum_{i=1}^r \mathbf{x}_{i1} \mathbf{I}_{i1} \quad (6.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s \mathbf{y}_{jk} \mathbf{O}_{jk} = 1, \mathbf{k} = 1, \dots, \mathbf{n} \quad (6.2)$$

$$-\sum_{j=1}^s \mathbf{y}_{jk} \mathbf{O}_{jk} + \sum_{i=1}^r \mathbf{x}_{ik} \mathbf{I}_{ik} \geq 0, \mathbf{k} = 1, \dots, \mathbf{n} \quad (6.3)$$

$$\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j > 0 \quad \forall \mathbf{i}, \mathbf{j} \quad (6.4)$$

Onde:

- $I_{ik}$ : é o nível do “input”  $i$  da unidade  $k$ ;
- $O_{jk}$ : é o nível do “output”  $j$  da unidade  $k$ ;
- $x_{ik}$ : são os pesos atribuídos pelo modelo para o “input”  $i$  da unidade  $k$ ;
- $y_{jk}$ : são os pesos atribuídos pelo modelo para o “output”  $j$  da unidade  $k$ ;
- $r$ : são os números de “inputs;”
- $s$ : são os números de “outputs;”
- $n$ : é o número de unidades consideradas.

As eficiências das unidades consideradas são obtidas a partir do cálculo de suas distância à fronteira de eficiência. Esta fronteira é denominada isoquanta e no caso de análises via DEA ela é estabelecida e não estimada, como tradicionalmente é feito. O exemplo para visualização do que se pretende realizar está na Figura 6.1.

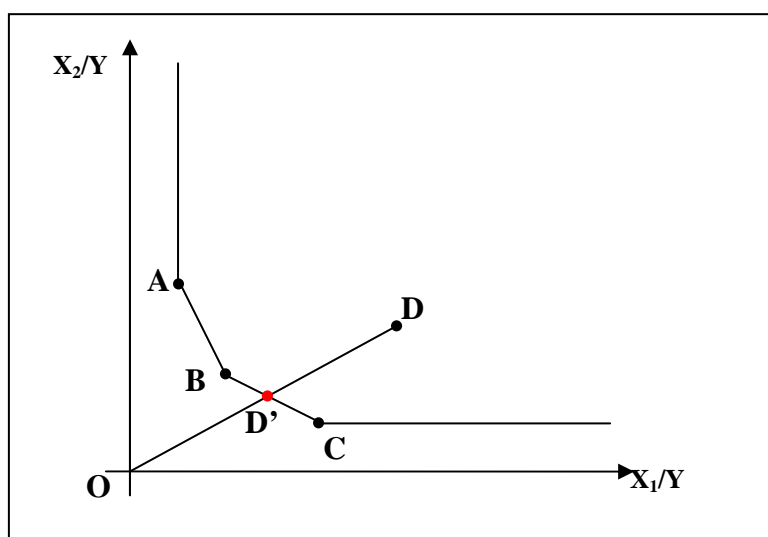


Figura 6.1: Fronteira de eficiência orientada para o “output”

Na Figura 6.1 são considerados dois “inputs” e um “output,” e a fronteira de eficiência é estabelecida com base nos dados de cada unidade sob avaliação. Percebe-se que o ponto D está envolto pela fronteira, caracterizando com isto que esta unidade não tem uma combinação eficiente de “input” para gerar uma dada quantidade de “outputs.” Observa-se também que o ponto D’ é a projeção do ponto D sobre a fronteira e esta projeção auxilia na caracterização de melhorias nos inputs  $X_1$  e  $X_2$  utilizados por D para que este alcance a fronteira e se torne eficiente.

#### 6.4 Aplicação da FMEA-DEA no ASC

Os pontos de melhoria ajudarão a identificar de quanto cada atributo de risco e cada modo de falha deve ser reduzido para que o evento se torne relativamente eficiente. No presente estudo de caso, as melhorias se darão reduzindo os índices de ocorrência, severidade e detecção dos respectivos modos de falhas. (GARCIA et al., 2005)

Conforme ESTELLITA LINS E MEZA (2000), utiliza-se o software “Frontier Analyst Professional Edition,” da “Banxia Software” e encontram-se os valores descritos na Tabela 6.1. São eles:

- i. Evento – todos os eventos potencialmente perigosos encontrados a partir da análise FMEA, ou sejam, os DMUs. A descrição completa de cada um encontra-se nas Tabelas de 5.1 a 5.13 ;
- ii. Eficiência – ao determinar as variáveis, severidade, ocorrência e detecção para aplicação da DEA, estes foram os valores encontrados para a eficiência atual de cada DMU;
- iii. Severidade, ocorrência e detecção (atual) – Valores obtidos a partir da análise FMEA no ASC;
- iv. Severidade, ocorrência e detecção (alvo) – após a aplicação da DEA nas DMUs, estes foram os valores encontrados para as variáveis alcançarem a curva de eficiência encontrada na análise DEA;
- v. Severidade, ocorrência e detecção (redução) – é o valor, em percentual que cada variável tem que reduzir para atingir a curva de eficiência encontrada na análise DEA.

Tabela 6.1 – Eficiência, variáveis alvo e percentuais de melhorias dos eventos

Evento	Eficiência	Atual			Alvo			Redução (%)		
		Sever.	Ocor.	Detec.	Sever.	Ocor.	Detec.	Sever.	Ocor.	Detec.
1	100	7	3	2	7	3	2	0	0	0
2	100	5	6	2	5	6	2	0	0	0
3	99,98	10	6	2	7	3	2	-30	-50	0
4	99,98	9	6	2	7	3	2	-22,2	-50	0
5	100	7	4	2	7	3	2	0	-25	0
6	61,29	7	6	4	4,29	3,68	2,45	-38,7	-38,7	-38,7
7	85,29	7	3	3	5,97	2,56	2,56	-14,7	-14,7	-14,7
8	74,36	7	3	4	5,21	2,23	2,97	-25,6	-25,6	-25,6
9	85,29	7	3	3	5,97	2,56	2,56	-14,7	-14,7	-14,7
10	60,87	7	4	5	4,26	2,43	3	-39,1	-39,1	-40
11	77,78	10	2	8	7,78	1,56	5,89	-22,2	-22,2	-26,4
12	100	10	1	7	10	1	7	0	0	0
13	99,99	10	4	2	7	3	2	-30	-25	0
14	56,86	10	4	5	5,69	2,27	2,84	-43,1	-43,1	-43,1
15	99,99	10	5	2	7	3	2	-30	-40	0
16	66,66	10	7	3	6,67	3,5	2	-33,3	-50	-33,3
17	99,98	10	6	2	7	3	2	-30	-50	0
18	99,99	10	5	2	7	3	2	-30	-40	0
19	99,97	10	8	2	7	3	2	-30	-62,5	0
20	99,99	10	5	2	7	3	2	-30	-40	0
21	100	6	2	3	6	2	3	0	0	0
22	99,99	10	2	3	6	2	3	-40	0	0
23	100	2	3	3	2	3	3	0	0	0
24	100	2	3	3	2	3	3	0	0	0
25	99,99	10	4	2	7	3	2	-30	-25	0
26	66,66	10	7	3	6,67	3,5	2	-33,3	-50	-33,3
27	99,98	10	6	2	7	3	2	-30	-50	0
28	99,99	10	5	2	7	3	2	-30	-40	0
29	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7
30	64,71	10	3	5	6,24	1,94	3,24	-37,6	-35,3	-35,3
31	52,73	10	5	5	5,27	2,64	2,64	-47,3	-47,3	-47,3
32	99,99	10	5	2	7	3	2	-30	-40	0
33	99,97	10	8	2	7	3	2	-30	-62,5	0
34	71,43	10	4	3	6,86	2,86	2,14	-31,4	-28,6	-28,6
35	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7
36	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7
37	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7
38	74,36	7	3	4	5,21	2,23	2,97	-25,6	-25,6	-25,6
39	67,44	7	4	4	4,72	2,7	2,7	-32,6	-32,6	-32,6
40	62,64	7	5	4	4,38	3,13	2,51	-37,4	-37,4	-37,4
41	73,08	7	6	3	5,12	4,38	2,19	-26,9	-26,9	-26,9
42	67,44	7	4	4	4,72	2,7	2,7	-32,6	-32,6	-32,6
43	85,29	7	3	3	5,97	2,56	2,56	-14,7	-14,7	-14,7
44	74,36	7	3	4	5,21	2,23	2,97	-25,6	-25,6	-25,6
45	85,29	7	3	3	5,97	2,56	2,56	-14,7	-14,7	-14,7



Tabela 6.1 – Eficiência, variáveis alvo e percentuais de melhorias dos eventos  
(Continuação)

Evento	Eficiência	Atual			Alvo			Redução (%)		
		Sever.	Ocor.	Detec.	Sever.	Ocor.	Detec.	Sever.	Ocor.	Detec.
46	60,87	7	4	5	4,26	2,43	3	-39,1	-39,1	-40
47	93,33	7	2	8	6,53	1,87	3,53	-6,7	-6,7	-55,8
48	71,43	10	3	4	6,14	2,14	2,86	-38,6	-28,6	-28,6
49	99,99	10	2	3	6	2	3	-40	0	0
50	91,66	10	2	4	6,67	1,83	3,67	-33,3	-8,3	-8,3
51	99,99	10	2	3	6	2	3	-40	0	0
52	84,61	10	2	5	7,23	1,69	4,23	-27,7	-15,4	-15,4
53	77,78	10	2	8	7,78	1,56	4,78	-22,2	-22,2	-40,3
54	99,99	10	2	3	6	2	3	-40	0	0
55	91,66	10	2	4	6,67	1,83	3,67	-33,3	-8,3	-8,3
56	99,99	10	4	2	7	3	2	-30	-25	0
57	99,98	10	6	2	7	3	2	-30	-50	0
58	99,99	10	5	2	7	3	2	-30	-40	0
59	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7
60	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7
61	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7
62	56,86	10	4	5	5,69	2,27	2,84	-43,1	-43,1	-43,1
63	77,78	10	2	8	7,78	1,56	4,78	-22,2	-22,2	-40,3
64	66,67	10	6	3	6,67	3,5	2	-33,3	-41,7	-33,3
65	83,33	10	3	3	6,5	2,5	2,5	-35	-16,7	-16,7

### 6.5 Análise preliminar da FMEA-DEA no ASC

Entre os 65 eventos encontrados, 42% apresentam eficiência de aproximadamente 100%, 25% apresentam eficiência entre 90% e 100% e 34% apresentam eficiência abaixo de 80%.

O sistema atual é eficiente ou não? Ainda não é possível responder esta pergunta pois, não há referencial comparativo até o momento. A recomendação sugerida é de buscar critérios na Eletronuclear ou na CNEN para verificar quais ações deverão ser realizadas na avaliação de eficiência do ASC.

Os resultados obtidos pela FMEA-DEA indicam quais as variáveis de cada evento deverão ser revisadas para a melhoria da eficiência do ASC. Os resultados estão na Tabela 6.2. Os eventos recomendados para a revisão da FMEA-DEA por uma equipe a ser montada pela Eletronuclear apresentaram uma eficiência abaixo de 80%.

Porque 80%? Este valor é apenas uma proposta. Como já foi descrito anteriormente, tem que levar em consideração a importância do ASC para manter o conforto térmico dos operadores nas condições de operação no modo normal, no modo normal fora-de-rotina e no modo emergência. Tem que levar também em consideração, de que forma a temperatura elevada pode influenciar na performance dos componentes elétricos e mecânicos que estão dentro da sala de controle.

Tabela 6.2 – Variáveis para diminuir os perigos potenciais no ASC

Evento	Eficiência	Atual			Alvo			Redução (%)		
		Sever.	Ocor.	Detec.	Sever.	Ocor.	Detec.	Sever.	Ocor.	Detec.
31	52,73	10	5	5	5,27	2,64	2,64	-47,3	-47,3	-47,3
14	56,86	10	4	5	5,69	2,27	2,84	-43,1	-43,1	-43,1
62	56,86	10	4	5	5,69	2,27	2,84	-43,1	-43,1	-43,1
10	60,87	7	4	5	4,26	2,43	3	-39,1	-39,1	-40
46	60,87	7	4	5	4,26	2,43	3	-39,1	-39,1	-40
6	61,29	7	6	4	4,29	3,68	2,45	-38,7	-38,7	-38,7
40	62,64	7	5	4	4,38	3,13	2,51	-37,4	-37,4	-37,4
30	64,71	10	3	5	6,24	1,94	3,24	-37,6	-35,3	-35,3
16	66,66	10	7	3	6,67	3,5	2	-33,3	-50	-33,3
26	66,66	10	7	3	6,67	3,5	2	-33,3	-50	-33,3
64	66,67	10	6	3	6,67	3,5	2	-33,3	-41,7	-33,3
39	67,44	7	4	4	4,72	2,7	2,7	-32,6	-32,6	-32,6
42	67,44	7	4	4	4,72	2,7	2,7	-32,6	-32,6	-32,6
34	71,43	10	4	3	6,86	2,86	2,14	-31,4	-28,6	-28,6
48	71,43	10	3	4	6,14	2,14	2,86	-38,6	-28,6	-28,6
41	73,08	7	6	3	5,12	4,38	2,19	-26,9	-26,9	-26,9
8	74,36	7	3	4	5,21	2,23	2,97	-25,6	-25,6	-25,6
38	74,36	7	3	4	5,21	2,23	2,97	-25,6	-25,6	-25,6
44	74,36	7	3	4	5,21	2,23	2,97	-25,6	-25,6	-25,6
11	77,78	10	2	8	7,78	1,56	5,89	-22,2	-22,2	-26,4
53	77,78	10	2	8	7,78	1,56	4,78	-22,2	-22,2	-40,3
63	77,78	10	2	8	7,78	1,56	4,78	-22,2	-22,2	-40,3

## 6.6 Comparação entre as técnicas FMEA de produto e FMEA-DEA

A FMEA é eficiente na identificação de perigos. Entretanto, após priorizar os eventos potencialmente perigosos, o RPN não calcula qual é a eficiência atual do sistema e não indica em qual variável os especialistas devem atuar para aumentar a eficiência do sistema.

A FMEA-DEA é uma técnica que, a partir de uma FMEA tradicional, é capaz de calcular a eficiência dos eventos dentro do sistema e de orientar a tomada de decisão dos especialistas, indicando qual a variável e em que percentual os mesmos devem atuar para haver um aumento da eficiência.

Para que as melhorias sejam implementadas, é preciso que se interprete o que significa reduzir, por exemplo, em 40%, um índice de severidade ou em 25% um índice de ocorrência. Observa-se que este significado deve englobar tanto custo como viabilidade técnica, ou seja, responder às seguintes questões: (i) quanto custa, por exemplo, inserir uma redundância no sistema? (ii) é tecnicamente viável inserir barreiras mitigadoras para os efeitos da parada do sistema? (iii) quanto custa inserir sistemas de controle que possam prever o emperramento de uma válvula?, etc. É importante que se perceba a flexibilidade gerencial para que os níveis de risco de um sistema possam ser reduzidos de forma otimizada. Este fato se torna viável quando se têm as diferentes possibilidades de melhorias, conforme as fornecidas pelo enfoque proposto. (GARCIA et al., 2005).

## 7. Conclusões e recomendações

Montar uma equipe da Eletronuclear com os representantes dos seguintes setores: Regras de Manutenção, Manutenção, Operação, Planejamento de Manutenção, Divisão de Segurança Nuclear, Divisão de Controle de Trabalho, Proteção Radiológica, Garantia da Qualidade e Análise Probabilística de Segurança para realizar uma revisão da FMEA no ASC. A partir dos resultados encontrados, aplicar novamente a FMEA-DEA.

Buscar critérios na Eletronuclear ou na CNEN para estabelecer qual o limite de eficiência mínima deverá ser adotado para poder verificar quais ações deverão ser realizadas na avaliação de eficiência do ASC, após a aplicação da FMEA-DEA.

A proposta desta dissertação é que a eficiência mínima adotada na FMEA-DEA seja de 80% para todos os componentes do ASC, levando em consideração a importância deste sistema para a segurança da usina nuclear. Os componentes que apresentarem eficiência abaixo de 80% deverão ter as suas variáveis reavaliadas e os planos de ação deverão ser executados para que a eficiência atinja pelo menos o valor proposto de 80%.

Em trabalhos futuros pretende-se aprimorar a metodologia apresentada, inserindo a possibilidade de tratar variáveis “fuzzy,” viabilizando com isto o tratamento das incertezas associadas à opinião dos especialistas. (GARCIA et al., 2005, LAPA e GUIMARÃES, 2004)

Em trabalhos futuros, pretende-se aprimorar o modelo matemático utilizado na DEA para buscar a menor distância percorrida da variável ineficiente até a fronteira de eficiência.

Através dos resultados obtidos e demonstrados na Tabela 6.2 com eficiência abaixo de 80%, recomenda-se:

i. Aumentar em 47,3% a capacidade de detecção e diminuir em 47,3% a ocorrência e a severidade do modo de falha: baixa eficiência do condensador de ar (VA-53 A/B) por sujeira no condensador;

ii. Aumentar em 43,1% a capacidade de detecção e diminuir em 43,1% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula de expansão do evaporador e ventilador (VA-22 A/B) danificada por desgaste;

iii. Aumentar em 43,1% a capacidade de detecção e diminuir em 43,1% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula de entrada do filtro (HV-5955) não abre por desgaste no rolamento;

iv. Aumentar em 40% a capacidade de detecção e diminuir em 39,1% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula abafadora de fluxo (HV-5959) não abre por desgaste do rolamento;

v. Aumentar em 40% a capacidade de detecção e diminuir em 39,1% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula de controle de pressão (PV-5963) não abre por desgaste do rolamento;

vi. Aumentar em 38,7% a capacidade de detecção e diminuir em 38,7% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula abafadora de fluxo (HV-5959) não abre por falta de ar de instrumento;

vii. Aumentar em 37,4% a capacidade de detecção e diminuir em 37,4% a ocorrência e a severidade do modo de falha: avaria no mancal do ventilador de exaustão (VA-27) por desbalanceamento ou falta de lubrificação;

viii. Aumentar em 35,3% a capacidade de detecção, diminuir em 35,3% a ocorrência e em 37,6% a severidade do modo de falha: sentido de rotação invertido do ventilador do condensador de ar (VA-53 A/B) por uma ligação elétrica incorreta;

ix. Aumentar em 33,3% a capacidade de detecção, diminuir em 50% a ocorrência e em 33,3% a severidade do modo de falha: filtro do evaporador e ventilador (VA-22 A/B) saturado por ambiente agressivo;

x. Aumentar em 33,3% a capacidade de detecção, diminuir em 50% a ocorrência e em 33,3% a severidade do modo de falha: filtro do condensador de ar (VA-53 A/B) saturado por ambiente agressivo;

xi. Aumentar em 33,3% a capacidade de detecção e diminuir em 41,7% a ocorrência e 33,3% a severidade do modo de falha: válvula de entrada do filtro (HV-5955) não fecha por falta de ar de instrumento;

xii. Aumentar em 32,6% a capacidade de detecção e diminuir em 32,6% a ocorrência e a severidade do modo de falha: queima do motor elétrico do ventilador de exaustão (VA-27) por curto circuito, falha de isolamento ou cabo de alimentação rompido;

xiii. Aumentar em 32,6% a capacidade de detecção e diminuir em 32,6% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula de controle de pressão (PV-5963) não abre por falta de ar de instrumento;

xiv. Aumentar em 28,6% a capacidade de detecção, diminuir em 28,6% a ocorrência e em 31,4% a severidade do modo de falha: válvula de controle de capacidade do compressor das unidades de resfriamento (VA-54 A/B) não modula por falha do atuador pneumático, falha no posicionador ou falta de ar de instrumento;

xv. Aumentar em 28,6% a capacidade de detecção, diminuir em 28,6% a ocorrência e em 38,6% a severidade do modo de falha: válvula de controle de pressão em emergência (PV-5957 A/B) não abre por falta de ar de instrumento;

xvi. Aumentar em 26,9% a capacidade de detecção e diminuir em 26,9% a ocorrência e a severidade do modo de falha: excesso de vibração no ventilador de exaustão (VA-27) por desbalanceamento ou falta de lubrificação;

xvii. Aumentar em 25,6% a capacidade de detecção e diminuir em 25,6% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula abafadora de fluxo (HV-5959) não abre por falta de lubrificação;

xviii. Aumentar em 25,6% a capacidade de detecção e diminuir em 25,6% a ocorrência e a severidade do modo de falha: sentido de rotação do ventilador de exaustão (VA-27) invertido por uma ligação elétrica incorreta;

xix. Aumentar em 25,6% a capacidade de detecção e diminuir em 25,6% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula de controle de pressão (PV-5963) não abre por falta de lubrificação;

xx. Aumentar em 26,4% a capacidade de detecção e diminuir em 22,2% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula abafadora de fluxo (HV-5959) não fecha pelo eixo ou chaveta estarem cisalhados;

xxi. Aumentar em 40,3% a capacidade de detecção e diminuir em 22,2% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula de controle de pressão em emergência (PV-5957 A/B) não fecha pelo eixo ou chaveta estarem cisalhados;

xxii. Aumentar em 40,3% a capacidade de detecção e diminuir em 22,2% a ocorrência e a severidade do modo de falha: válvula de entrada do filtro (HV-5955) não fecha pelo eixo ou chaveta estarem cisalhados;

Após serem implementadas todas estas recomendações, os valores das variáveis: detecção, ocorrência e gravidade dos eventos descritos na Tabela 6.2 deverão ser revisados e a FMEA-DEA deverá ser aplicada novamente. Os resultados esperados são o de aumento da eficiência no ASC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R., ATHANASSOPOULOS, A., DYSON, R. G., THANASSOULIS, E., 1997, "Weights restrictions and value judgments in data envelopment analysis: evolution development and future directions", *Annals of Operations Research*, v. 73, 99.13-34.
- ALI, A. I., SEIFORD, L.M., 1993, "Computacional accuracy and infinitessimals in Data Envelopment Analysis," *INFOR*, vol. 31, pp.290-297.
- AMERICAN SOCIETY FOR QUALITY CONTROL STATISTICS DIVISION, ASQC, 1983, *Glossary and tables for statistical quality control*, 2d. ed., Milwaukee: ASQC Quality Press.
- BANKER, R. D., CHARNES, A., COOPER, W. W., 1984, "Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis," *Management Science*, v. 30, n. 9, pp 1078-1092
- BARRETO, O. L., SOUSA, M. M., CARVALHO, A. L. B., SINESCALCHI, M. R., SCHUCK, 2002, L.P., Manual do sistema de ar condicionado da sala de controle-ASC, Eletronuclear, agosto.
- BASS, L., 1986, *Products liability: Design and manufacturing defects*, Colorado Springs, Colo.: Shepard's/McGraw-Hill.
- BASS, L., 1991, *Cumulative supplement to Products liability: Design and manufacturing defects*. Colorado Springs, Colo.: Shepard's/McGraw-Hill.
- BLANCHARD, B. S., 1986, *Logistics engineering and management*. 3d ed. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall.
- BLANCHARD, B. S., LOWERY, E. E., 1969, *Maintainability – Principles and practices*. New York: McGraw-Hill.



- BUENO, S., 1999, *Dicionário da Língua Portuguesa*. São Paulo: Didática Paulista.
- CARLSON, W. D., MCCULLEN, L. R., MILLER, G. H., 1995, "Why SAE J1739?," *International Congress and Exposition, SAE Technical Paper Series*, n. 950569, Detroit, Michigan, February 27- March 2.
- CHARNES, A., COOPER, W. W., GOLANY, B., SEIFORD, L., STUTZ, J., 1985, "Foundations of Data Envelopment Analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions," *Journal of Econometrics*, vol. 30, n. 1/2, pp 91-107.
- CHARNES, A., COOPER, W. W., LEWIN, A. Y., SEIFORD, L., 1994, *Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and Application*, 2 ed., Boston, Kluwer Academic Publishers.
- CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E., 1978, "Measuring the Efficiency of Decision-Making Units," *European Journal of Operational Research*, vol. 2, pp.429-444.
- CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E., 1962, "Programming with linear fraction functional," *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 9, n. 3/4, pp. 181-186.
- CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E., 1981, "Programming with linear fraction functional," *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 9, n. 3/4, pp. 181-186.
- CHARNES, A., COOPER, W.W., SEIFORD, L. et al., 1983, "Invariant multiplicative efficiency and piecewise Cobb-Douglas envelopments," *Operations research letters*, vol. 2, n. 3, pp.101-103.
- CHIEN, J., 1985, *Detailed tests show how well industrial local network performs*, Data Communications August, 14: 119-131.

- CHRYSLER MOTORS, 1986, *Design feasibility and reliability assurance*. In *FMEA*, Highland Park, Mich.: *Chrysler Motors Engineering Office*.
- COUTINHO, J. S., 1964, *Failure-Effect Analysis*, Trans. New York Academy of Sciences, pp.564– 585.
- CROWL, D.A., LOUVAR, J.F., 2002, *Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications*, 2nd. ed., Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR.
- CURLEY, J. J., RYDER, R. E., 1992, “Project management: Improving product development process,” *Technology. Engineering Society of Detroit*, October: 23-27.
- DANIELS, S. E., JOHNSON, K., JOHNSON, C., 2002, *Quality Glossary*, pp 65, *Quality Progress*.
- DEBREU, G., 1951, “The Measurement of Productive Efficiency,” *Econometrica*, vol. 19, n. 3, pp. 273-292.
- DICIONÁRIO MICHAELIS-UOL, 1999, Licenciado para uso exclusivo dos ganhadores do CD UOL.
- ESTELLITA LINS, P. M, MEZA, L.A., 2000, *Análise envoltória de dados, e perspectivas de integração no ambiente do apoio à decisão*, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- ESTELLITA LINS, M., 1997, “Modelo I O-Stepwise para seleção de variáveis em modelos de análise envoltória de dados”, *Anais do XXIV – SBPO*, Bahia, Brasil. Outubro.
- ESTELLITA LINS, M., 1998, Análise das fronteiras de produtividade “Data Envelopment Analysis”, notas de aula do curso de pós graduação de mestre em ciências em engenharia de produção.

- ESTELLITA LINS, M., MOREIRA, M. C. B., 1998, “Método I-O Stepwise para seleção de variáveis em modelos de análise envoltória de dados”, a ser publicado na revista Pesquisa Operacional.
- FERREIRA., M. L. R., 2003, Informações extraídas em notas de aula. Curso de Pós-Graduação Latu-Sensu Montagem Industrial e Fabricação Mecânica, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense-UFF.
- FORD MOTOR COMPANY, 1989, *Potential Failure mode and Effects Analysis*. Dearborn, Michigan: Ford Motor Company.
- FORD MOTOR COMPANY, 1992, *FMEA handbook*. Dearborn, Michigan: Ford Motor Company, Engineering Materials and Standards.
- GARCIA, P. A. A., NEVES, J. C. S., CAMPOS NEVES, G., 2001, “Avaliação dos modos de falha no RCM utilizando DEA,” *Pesquisa Naval*, Vol 14, pp. 143 – 155
- GARCIA, P. A. A., BARBOSA JUNIOR, G. V., MELO, P. F. F., 2005, “Utilização de um modelo de envelopamento de dados para propor melhorias em segurança: uma abordagem baseada em FMEA”, *International Nuclear Atlantic Conference, INAC*, 85-99141-01-5, Santos, São Paulo, Brasil, 28-Ago a 2-Set.
- GENERAL MOTORS, 1988, *FMEA reference manual*, Detroit, Mich.: General Motors Corporation, Reliability and Technology Department.
- GOLLANY, B., ROLL, Y., 1989, “An application procedure for a DEA,” *OMEGA Int. J. of Mgmt, Sci.*, vol. 17, n. 3, pp. 237-1250.
- JURAN, J.M., and F.M. GRZYNA, Jr., 1980, *Quality planning and analysis*. New York: McGraw-Hill.
- KECECIOGLU, D., 1991, *Reliability engineering handbook*, Vol. 1 and 2, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall

- KOOPMANS, T. C., 1951, *Analysis of production as an efficient combination of activities*. In: T.C. Koopmans (ed.), *Activity of production and Allocation*, 1 ed., New York, Wiley.
- KUMAMOTO, H & HENLEY, E. J., 1996, *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*, Wiley – IEEE press, NY, USA.
- LAPA, C. M. F & GUIMARÃES, A. C. F, “Effect analysis fuzzy inference system in nuclear problems using approximate reasoning,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 31, p. 107-115 (2004)
- LEWIN, A. Y., MOREY, R., 1981, “Measuring the relative efficiency and output potential of public sector organizations: an application of data envelopment analysis”, *International Journal of Policy Analysis and Information Systems*, v.5, pp.267-285.
- LEWIS, E. E., 1994, *Introduction to Reliability Engineering*, Department of Mechanical Engineering, Northwest University, Evanston, Illinois, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc..
- LIDIA, A. M., 1998, *Data envelopment analysis (DEA) na determinação da eficiência dos programas de pós-graduação COPPE/UFRJ*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MORANO, C. A. R., 2003, Informações extraídas em notas. Curso de Pós-Graduação Latu-Sensu Montagem Industrial e Fabricação Mecânica, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense-UFF.
- OMDAHL, T. P., 1988, *Reliability, availability, and maintainability dictionary*. Milwaukee: ASQC Quality Press.
- PETERS, T., 1992, *Liberation management*. New York: Alfred A. Knopf. Publisher.

- RABBITT, J. T., BERGH, P. A., 1998, *The QS-9000 book: The fast track to compliance*, New York: Amacom.
- REIFER, D. J., 1979, *Software Failure Modes and Effects Analysis*. IEEE Transactions on Reliability, R-28, 3, pp. 247–249.
- SAE STANDARDS J1739, 2002, (*Machinery FMEA*). Society Of Automotive Engineers. Automotive Quality And Process Improvement Committee.
- SEIFORD, L. M., 1997, “A Bibliography for Data Envelopment Analysis (1978-1996),” *Annals of Operations Research*, vol. 66, pp. 393-438.
- SLONE, J. P., 1986, “Broadland LANs,” *Journal or Information Systems Management*, Summer: 49.
- STAMATIS, D.H., 1989, 1991, 1992, FMEA training manual, Southgate, Michigan: Contemporary Consultants.
- STAMATIS, D.H., 1991a, QFD – Training manual, Southgate, Mich.: Contemporary Consultants.
- STAMATIS, D.H., 1991b, Effective teams – Training manual, Southgate, Mich.: Contemporary Consultants.
- STAMATIS, D.H., 1993, Value engineering: Maximizing value in specifics areas, Technology, Engineering Society of Detroit. April: 10-15.
- STAMATIS, D.H., 1995, Reprinted by ASQ, *Failure Mode and Effects Analysis: FMEA from Theory to Execution*, Quality Press. Milwaukee, Wisconsin.
- UNITED STATES MILITARY PROCEDURE MIL-P-1629, 1949, Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (9, November), Canceled by The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DODISS). 2005.

UNITED STATES MILITARY PROCEDURE MIL-P-1629, 1974/80/84, Procedures for Performing A Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, US MIL-STD-1629, November 1974, US MIL-STD-1629A, November 1980, US MIL-STD-1629A/Notice 2, November 1984, Washington, DC, US MIL-STD-1629A/Notice 3, August 1998, Canceled.

UNITED STATES MILITARY PROCEDURE MIL-P-1629, 1981, MIL-STD-1472C, Human engineering design criteria for military systems, equipment and facilities, May, 2, Washington, DC, US Department of Defense.

WOODSON, W., 1981, *Human factors design handbook*, New York, McGraw-Hill.

## APÊNDICE A

### GLOSSÁRIO

AIAG – “Automotive Industry Action Group,” ou em português, Grupo de Ação da Indústria Automotiva, é a criadora e a fonte de informação da série de procedimentos QS-9000. A divisão automotiva da ASQ mantém a conexão deste grupo. (DANIELS et al., 2002).

ANSI – “American National Standards Institute,” ou em português, Instituto Nacional Americano de Padronização, é uma organização privada, sem fins lucrativos que administra e coordena a padronização voluntária americana e a conformidade dos colaboradores do sistema. Os membros americanos da ANSI fazem parte da ISO, “International Organization for Standardization.” (DANIELS et al., 2002).

Antropometria – Conhecimento das dimensões das diversas partes do corpo humano. (BUENO, 1999).

ASQ – “American Society for Quality,” ou em português, Sociedade Americana para Qualidade, é uma associação profissional, sem fins lucrativos, que desenvolve, promove e aplica informações relativas à qualidade e tecnologia para o setor privado, público e acadêmico. A sociedade serve a mais de 108.000 (cento e oito mil) membros individuais e aproximadamente 1.100 (mil e cem) membros corporativos nos Estados Unidos e mais de 108 (cento e oito) membros corporativos em outros países. (DANIELS et al., 2002).

ASQC – “American Society for Quality Control,” ou em português, Sociedade Americana para o Controle de Qualidade, é o nome que a sociedade adotou de 1946 até 1997, quando foi modificado para ASQ. (DANIELS et al., 2002).

“Benchmarking” – É a melhora no processo com o qual a companhia mede a sua performance em comparação com o que há de melhor na classe industrial, determina como estas companhias alcançaram os seus níveis de performance e utiliza essa informação para melhorar a sua própria performance. Os assuntos que podem ser

incluídos no “benchmark” incluem estratégias, operações, processo e métodos utilizados. (DANIELS et al., 2002).

“Big Three” – Ou, em português, As 3 Maiores, é um grupo de trabalho formado pelos representantes des 3 (três) montadoras automotivas “Chrysler Corp., General Motors Corp. e Ford Motor Co.”

“Black-out” – Falta de energia elétrica em todos os sistemas da usina nuclear simultaneamente.

“Brainstorming” – Ou, em português, Tempestade de Idéias: É o que uma equipe utiliza para gerar idéias de um assunto particular. Cada pessoa do grupo é questionada para pensar livremente, criativamente e escrever o maior número de idéias possíveis. As idéias não são discutidas ou revisadas até que finalize a sessão de “Brainstorming.” (DANIELS et al., 2002).

Diagrama de Causa e Efeito, ou em inglês, “Cause and Effect Diagram,” é uma ferramenta para analisar processos de dispersão. É também conhecido por Diagrama de Ishikawa, porque Kaoru Ishikawa foi quem desenvolveu esta técnica e também pode ser conhecido por diagrama espinha de peixe porque o seu formato lembra o esqueleto de um peixe. Este diagrama ilustra as principais causas e causas auxiliares mais importantes para um determinado efeito ou sintoma. O diagrama causa e efeito faz parte das Sete Ferramentas da Qualidade. (DANIELS et al., 2002).

Cinco Porquês – Ou em inglês, “Five Whys:” é uma técnica utilizada para descobrir a causa raiz de um problema e mostrar as interfaces das causas por perguntar repetidas vezes: Por quê? (DANIELS et al., 2002).

$C_{pk}$  – é um índice de capacidade de processo utilizado na metodologia seis sigma, para quantificar os desvios de processo associados a variáveis como desgaste da ferramenta, variação na temperatura ambiente, mudança de operador e as diferentes características que cada lote de material podem ter. (LEWIS, 1994.)



DOE – “Design Of Experiments,” ou em português, Planejamento de Experimentos: é uma divisão de aplicação de interações estatísticas planejando, conduzindo, analisando e interpretando testes controlados para avaliação de fatores que controlam o valor de um parâmetro ou um grupo de parâmetros. (DANIELS et al., 2002).

“Downtime” – Tempo, normalmente contabilizado em horas/mês, em que o equipamento, processo ou serviço ficou parado, ou seja, sem produzir nada.

“Input” – Produtos, serviços, material ou entradas obtidas por fornecedores e utilizadas para produzir as saídas para entregar aos clientes internos ou externos.

ISO – “International Organization for Standardization”, ou em português, Organização Internacional para Padronização, é uma rede de trabalho de instituições de padronização nacional de mais de 140 países trabalhando em parceria com organizações internacionais, governamentais, industriais, negócios e representantes de consumidores para desenvolver e publicar normas internacionais. Atua como uma ponte entre o setor público e privado. (DANIELS et al., 2002).

“Modo Vent” – Tempo total, normalmente dado em horas/mês em que o equipamento não estava parado, entretanto por algum desvio de processo, também não está fornecendo oxigênio gás ao cliente.

OEM – “Original Equipment Manufacturers”, ou em português, Fabricantes de Equipamentos Originais. Os três maiores representantes que representaram a OEM na elaboração do Manual de Referência 1993 FMEA foram a “Bosch”, sendo fabricante de bateria, cabo de ignição, correia, filtro, freio, ignição eletrônica, iluminação, injeção eletrônica, motores elétricos, palhetas, velas de ignição, entre outros itens, a “Goodyear,” sendo fabricante de pneus e “Kelsey-Hayes,” atual “Hayes Brake,” produzindo sistemas de frenagem. (NOTA DO AUTOR 2007)

“Outliers” – O que está situado ou é classificado à parte do lote principal. (DICIONÁRIO MICHAELIS-UOL, 1999).

“Output” – É um produto final ou semi-acabado que acaba de sair de uma etapa do processo ou informação, serviço, material fornecido pelo cliente interno ou externo de um determinado processo.

“Pareto” – Uma ferramenta gráfica para hierarquização das causas da maior a menor significância. Isto é baseado no princípio de Pareto, que primeiramente foi definido por J. M. Juran em 1950. O princípio, nomeado depois do século 19 pelo economista Vilfredo Pareto, sugere que a maioria dos efeitos surgem relativamente de pequenas causas; ou seja, 80% dos efeitos surgem de 20% de possíveis causas. O gráfico de Pareto é uma das Sete Ferramentas da Qualidade. (DANIELS et al., 2002).

“Poka-yoke” – É um termo japonês que significa verificação do erro. Um dispositivo “poka-yoke” é aquele que previne componentes incorretos no início da fabricação, montagem e facilmente identifica uma falha ou erro. (DANIELS et al., 2002).

QFD – “Quality Function Deployment”, ou em português, Preparação da Prática da Qualidade: método estruturado em que as exigências do cliente são traduzidas para exigências técnicas apropriados para cada estágio de desenvolvimento do produto ou produção. O processo QFD normalmente é direcionado para ouvir a voz do cliente. (DANIELS et al., 2002).

Sete Ferramentas da Qualidade – Ou em inglês, “Seven Tools of Quality:” São ferramentas que ajudam as companhias a entenderem e melhorarem os seus processos. As ferramentas são diagrama de causa e efeito, gráficos de controle, planilha de fluxo, folha de verificação, histograma, gráfico de Pareto e diagrama de dispersão. (DANIELS et al., 2002).

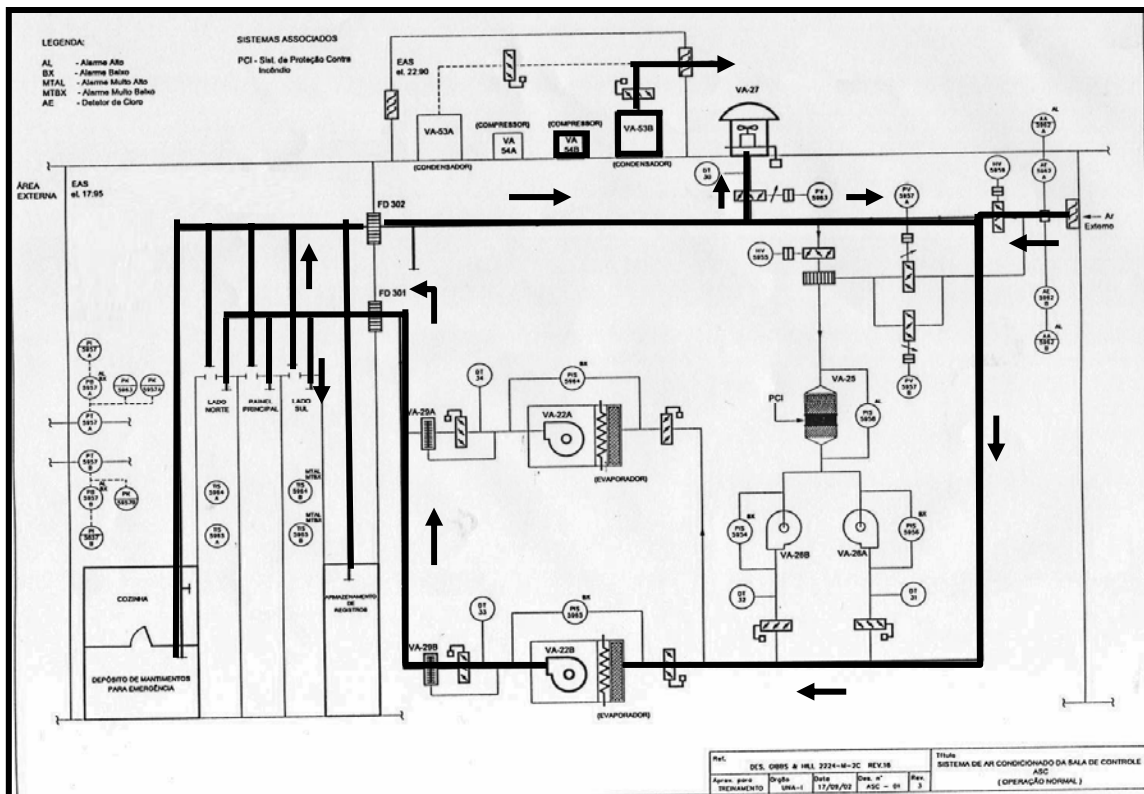
“Taguchi” – Método Taguchi: O Instituto de Fornecedores Americanos, ou em inglês, “American Supplier Institute,” tem essa marca registrada do termo da metodologia de engenharia da qualidade desenvolvida por Genichi Taguchi. Na engenharia de controle de qualidade, Taguchi utiliza os termos controle de qualidade fora-de-linha – “off-line,” controle de qualidade em-linha – “on-line” – e um sistema de

projeto experimental para melhorar a qualidade e reduzir os custos. (DANIELS et al., 2002).

“Turn Key” – Gire a Chave. É uma forma de contratação para a fabricação de um equipamento e/ou sistema onde a tecnologia de fabricação e/ou do processo não são repassados ao cliente final. Entretanto o contratado tem a obrigação contratual de fornecer o equipamento e/ou sistema em plenas condições de funcionamento sendo que o custo final, prazo de entrega e sistema de qualidade são definidos no início do processo. (FERREIRA, 2003).

# APÊNDICE B

## SISTEMA ASC EM OPERAÇÃO NORMAL



# APÊNDICE C

## SISTEMA ASC EM OPERAÇÃO EMERGÊNCIA

