

1. O PROCESSO DA MANUTENÇÃO

A execução da manutenção influencia no ciclo de vida de sistemas e equipamentos cobrindo dois aspectos importantes desses: operação e desempenho.

A manutenção é uma atividade estratégica que contribui para a melhoria dos níveis de *performance* de qualquer sistema disponível para operação, garantindo qualidade, segurança e preservação do meio ambiente de acordo com padrões preestabelecidos. Buscam-se, com esta, melhores resultados da produtividade do sistema com qualidade da operação a custos competitivos.

MONCHY (1989 p.3) resume a importância da manutenção para um sistema produtivo destacando que ela começa muito antes do dia da primeira pane (parada de emergência) de uma máquina. De fato, ela começa desde sua concepção, predeterminando-se a sua manutenibilidade (aptidão de ser conservada), a sua confiabilidade e sua disponibilidade (aptidão de ser “operacional”) e sua durabilidade (duração de vida prevista).

A figura 1 a seguir resume as duas visões da manutenção.

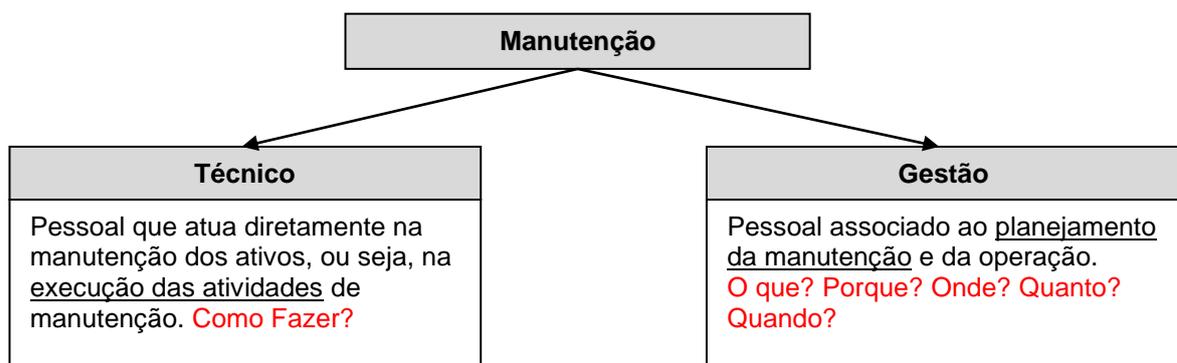


FIG.1 DUAS LINHAS DE AÇÃO DA MANUTENÇÃO

1.1. MANUTENÇÃO

Existem várias definições de manutenção. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a define como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. (ABNT-NBR-5462,1994)

Segundo LAFRAIA (2001, p.161), manutenção é um conjunto de ações destinadas a manter ou recolocar um item num estado específico no qual pode executar sua função requerida.

MONCHY (1989, p.1) ressalta o aspecto econômico da manutenção: “boa manutenção assegura as operações especificadas a um custo global otimizado” e a caracteriza como suporte para o funcionamento da produção, esta tratada como o objetivo da existência da empresa.

HAMAOKA *et al.* (2000) definem como o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas ou equipamentos, para mantê-los nas mesmas condições de desempenho de fábrica e de projeto, visando garantir a consecução de sua função dentro dos parâmetros de disponibilidade, de qualidade, de prazos, de custos e de vida útil adequados

A Organização das Nações Unidas caracteriza a atividade fim de qualquer entidade organizada como “Produção = Operação + Manutenção”, dando-se a manutenção as seguintes responsabilidades:

- reduzir o tempo de paralisação dos equipamentos que afetam a operação;
- reparar, em um período de tempo determinado, o equipamento quando ocorrer alguma irregularidade que reduza o potencial de execução do serviço e
- garantir o funcionamento das instalações de forma que os produtos ou serviços atendam a critérios e padrões estabelecidos pelo controle de qualidade TAVARES (1997, p.1).

A manutenção de sistemas complexos é caracterizada como de cunho industrial, com diretrizes, procedimentos, roteiros e rotinas bem definidos e uma dotação orçamentária estruturada objetivando a continuidade da operação evitando a ocorrência de fatos que possam degradar ou interromper a prestação do serviço.

1.1.1. O DESENVOLVIMENTO DA MANUTENÇÃO

Segundo WYREBSKI (1987), a prática da manutenção iniciou-se, efetivamente, com a invenção das primeiras máquinas têxteis a vapor no século XVI, onde quem consertava era a mesma pessoa que operava, sendo treinada pelo próprio fabricante.

Os conceitos de manutenção bem como as suas finalidades foram evoluindo em paralelo com o desenvolvimento industrial mundial. As primeiras necessidades de se

efetuar reparos nas máquinas de um processo fabril ocorreram com o advento da primeira Guerra Mundial, quando foi implantado um processo de produção em série com programas de produção. Surgem, então, os primeiros conceitos de manutenção corretiva, que consiste em reparar falhas que provocam a impossibilidade de um sistema ou item cumprir com sua função no nível especificado ou requerido.

Esta visão da manutenção permaneceu até a segunda Guerra Mundial que impôs o aumento da produção, necessitando-se não somente corrigir as falhas, mas também preveni-las. Foram então desenvolvidos processos de controle e prevenção de falhas que em conjunto com as rotinas de correção formaram a base de apoio à operação e iniciaram a fase da manutenção preventiva, caracterizada pela possibilidade de intervir no item antes da ocorrência da falha.

No início da década de 1950, devido à necessidade de desenvolvimento da indústria pós-guerra, aliada a evolução da área aeronáutica e da indústria eletro-eletrônica, notou-se que o tempo gasto para diagnosticar as falhas era maior do que o gasto com a reparação, trazendo a necessidade de formação de equipes técnicas compostas por especialistas de várias áreas para assessorar a produção. Essas equipes formaram a engenharia de manutenção, que entre outras finalidades deveria planejar e controlar a manutenção avaliando as causas e os efeitos das falhas na produção.

Em meados dos anos 1970 surgiu a ciência denominada Terotecnologia (tecnologia de conservação) com objetivo de reduzir os custos dos ciclos de vida de equipamentos, aplicando um conjunto de práticas de gestão financeira e de logística.

Com o desenvolvimento da microeletrônica, a redução dos custos de aquisição de computadores e a introdução dos conceitos de qualidade total, foi possível formar equipes multidisciplinares para análise dos registros de falhas armazenados em bancos de dados específicos de manutenção, implicando na redução dos custos globais, no aumento da confiabilidade e disponibilidade das máquinas e dos equipamentos da produção.

1.1.2. TIPOS DE MANUTENÇÃO

A determinação do tipo de manutenção a ser executada em uma empresa depende exclusivamente da política adotada pela sua direção, que leva em conta o perfil da operação do sistema, o tipo de produto ou serviço que está sendo disponibilizado ao cliente, o custo de reposição de equipamentos e peças, os níveis projetados de confiabilidade e segurança e a forma de gerenciamento ambiental proposto. Entre os vários tipos de manutenção podem ser mencionados: corretiva, preventiva, preditiva (ou preventiva de condição), corretiva paliativa, corretiva curativa, preventiva de ronda e preventiva sistemática, sendo que há consenso em se destacar a corretiva, a preventiva e a preditiva, caracterizando as demais como combinações ou nuances destas. Na FIG. 2 são representadas esquematicamente as formas de atuação nos serviços de manutenção, considerando as características das falhas e as várias formas de saná-las.

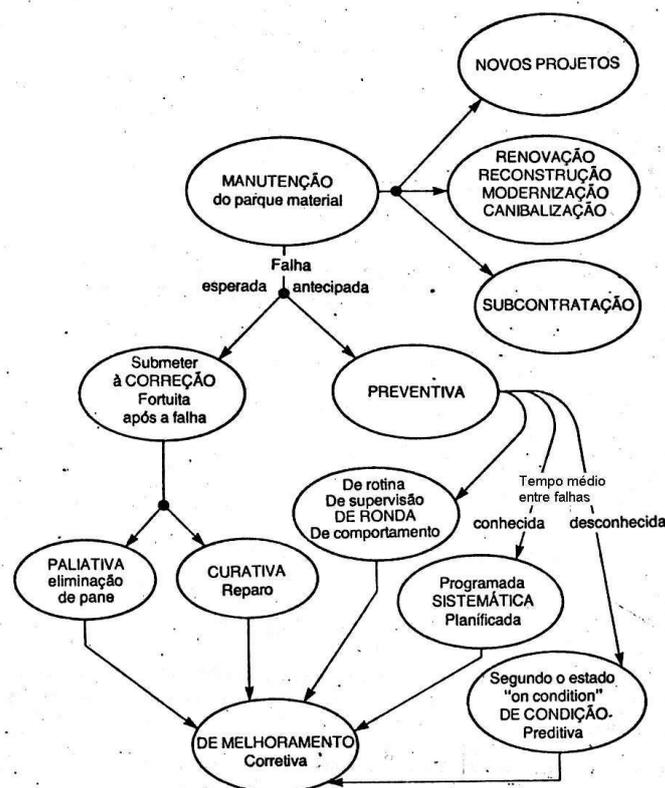


FIG.2 FORMAS DE AÇÃO DE UM SERVIÇO DE MANUTENÇÃO

Fonte: MONCHY (1989 p.32)

Falhas são inevitáveis, mas as consequências delas podem ser evitadas pelo uso de técnicas que facilitem a compreensão e até que possam prever a probabilidade de acontecerem.

O objetivo principal da análise de falhas é evitar que novas falhas aconteçam. O uso de técnicas para a investigação deve balizar as decisões quanto às formas de se evitá-las ou de retardá-las, maximizando o tempo de vida útil do ativo.

A avaliação da vida útil do ativo considera dois pontos fundamentais, onde se deve:

- ✓ MAXIMIZAR o Tempo de Operação dos equipamentos pela contenção das causas fundamentais das falhas;
- ✓ Qualificar o sistema de gerenciamento de ativos visando a MINIMIZAÇÃO do emprego de insumos (\$) e de mão-de-obra (Hh), ou seja, MINIMIZANDO o Tempo de equipamento parado (em Manutenção).

Os dois pontos anteriores estão resumidos na FIG.3, onde se une também a necessidade de se avaliar a confiabilidade e a manutenibilidade.

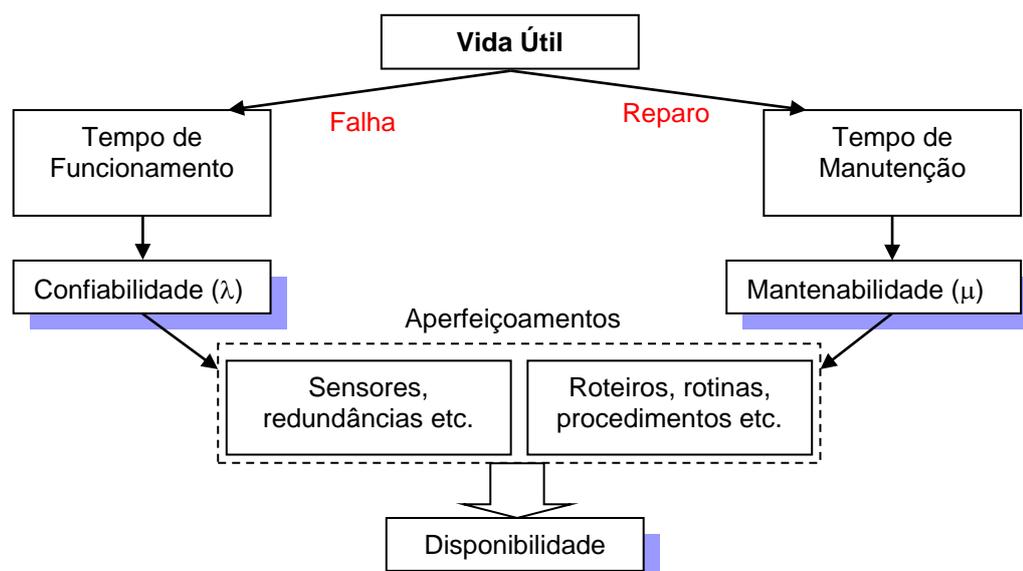


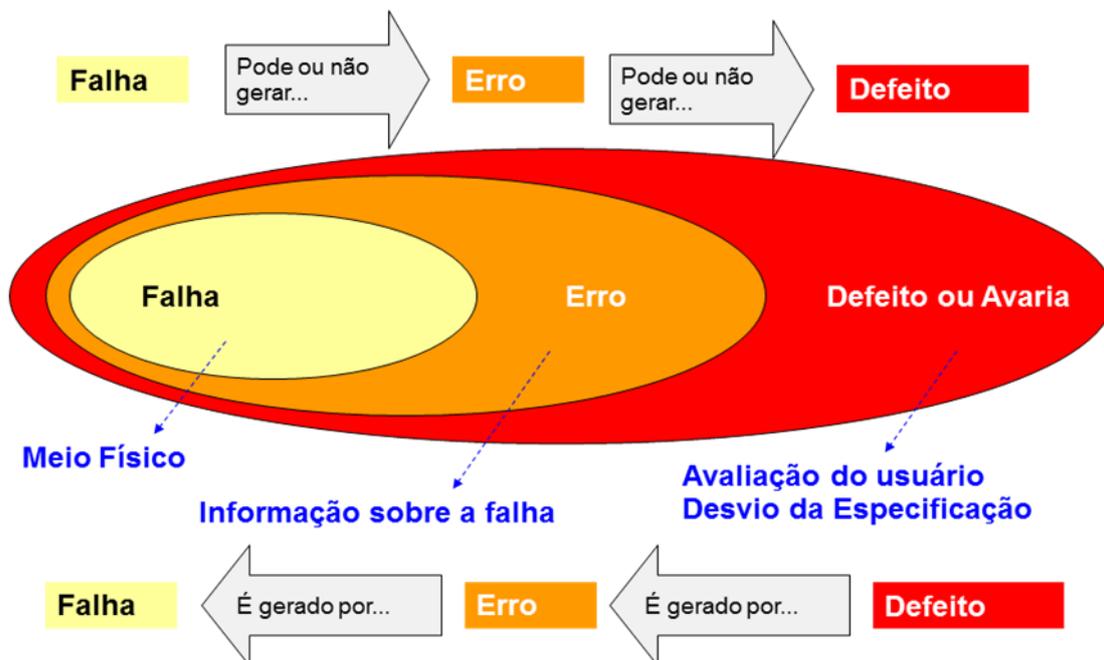
FIG. 3 – Relação entre Confiabilidade e Manutenibilidade

Neste momento cabe definir alguns conceitos importantes:

- ✓ **Defeito ou Avaria (*failure*¹):** um sistema falha quando se desvia da sua especificação de funcionamento. Podem ser evitados quando utilizam-se técnicas de tolerância a falhas. O sistema está defeituoso ou avariado quando ele não pode prover o serviço desejado.

- ✓ **Erro (error):** transição do sistema, provocada por uma falha, para um estado interno incorreto. Pode provocar um defeito ou não. Pode ser observado e avaliado.
- ✓ **Falha (fault¹):** acontecimento que altera o padrão normal de funcionamento de um dado componente do sistema. É a causa física. São inevitáveis!

A figura 4 adiante resume a relação entre defeito, erro e falha.



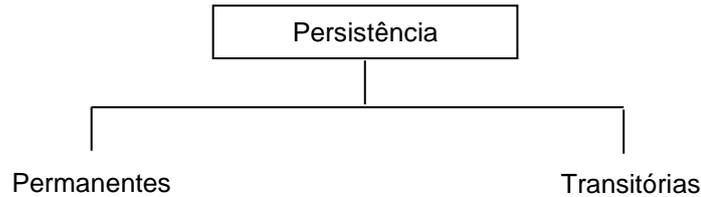
1- Alguns autores traduzem *failure* como **falha** e *fault* como **falta**. Sendo assim, chamar-se-ia "tolerância a faltas" já que falhas não são toleradas.

FIG. 4 – Relação entre defeito, erro e falha

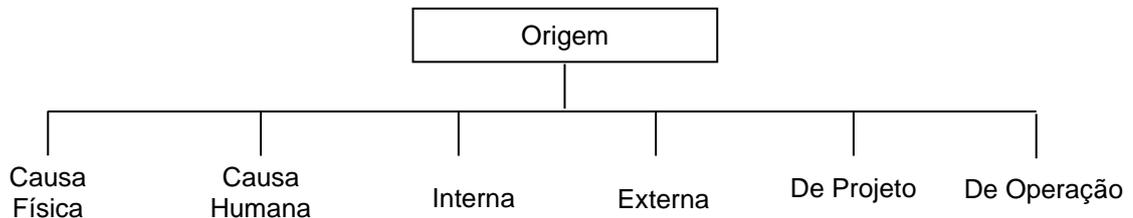
Cabe ainda destacar que:

- ✓ Um sistema defeituoso (ou avariado) é aquele que contém falhas.
- ✓ Apesar de uma falha ter o potencial de gerar erros (e por sua vez gerar defeitos), ela pode não gerar erro algum durante o período de sua observação. Esta falha pode não se manifestar até que o componente defeituoso seja usado.
- ✓ Se há um erro no estado do sistema, então existe uma sequência de ações que podem ser executadas e que levarão a defeitos (ou avarias) no sistema, a não ser que medidas de correção sejam tomadas.

As falhas podem ser classificadas de acordo com a sua persistência.



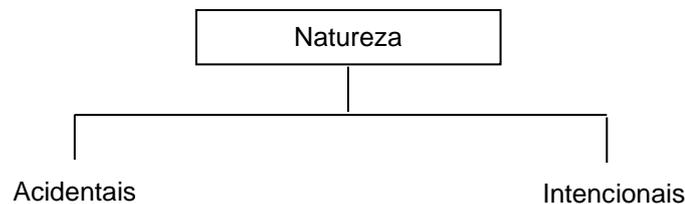
As falhas podem ainda ser classificadas de acordo com a sua origem.



Alguns classificam quanto à origem da seguinte forma:

- ✓ Falha primária: falhas por erros de projeto.
- ✓ Falha secundária: falhas devido a causas externas ao projeto (trabalho em condição anormal, fora da especificação e por manutenção imprópria).
- ✓ Falha de comando: erro ou ruído ao comandar um componente.

As falhas podem ser classificadas de acordo com a sua natureza.



O aumento da competitividade entre as empresas, aliada a necessidade de redução de custos e ao incremento da produção, fizeram com que a manutenção evoluísse e se destacasse como área de grande importância no sistema organizacional, se firmando como uma função estratégica para o planejamento da produção. A FIG. 5 demonstra o processo de evolução das formas de atuação da manutenção nos últimos cinquenta anos, destacando os períodos em que as intervenções da manutenção eram determinadas pelo tempo de operação do equipamento e em outros momentos, pela condição do equipamento no contexto operacional.



FIG.5 - DESENVOLVIMENTO DAS FORMAS DE ATUAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Fonte: LAFRAIA (2001 P.238)

1.1.2.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA

A manutenção corretiva é uma intervenção não planejada, pois atua após a ocorrência da falha ou mau funcionamento de um item para restabelecimento a seu estado operacional ou disponibilização para produção do sistema.

A *performance* e a segurança de um sistema qualquer pode ser afetada drasticamente se esse for o único tipo de manutenção praticada, pois como não há controle dos fatos que podem causar a deterioração ou a parada do sistema, as falhas podem acontecer a qualquer momento e com um tempo para reparo indeterminado.

Na FIG. 6 a seguir, são representados o desempenho (*performance*) e o funcionamento de um item em um intervalo de tempo (t_0, t_3) que inclui uma pane ou falha no instante t_1 , um intervalo (t_1, t_2) de execução da manutenção e t_2 , instante de recuperação da operacionalidade do item. A *performance* do item decresce até o instante t_1 , momento onde se registra uma ocorrência ou pane, necessitando-se de uma intervenção corretiva. Neste instante t_1 pode-se intervir para eliminação provisória

da falha, colocando-se o item em funcionamento com um nível de *performance* inferior (1) ao especificado e gastando-se menos tempo na intervenção ou pela reparação total, mais demorada e onerosa que a anterior, porém com um nível teórico de confiabilidade e *performance* melhor (2).

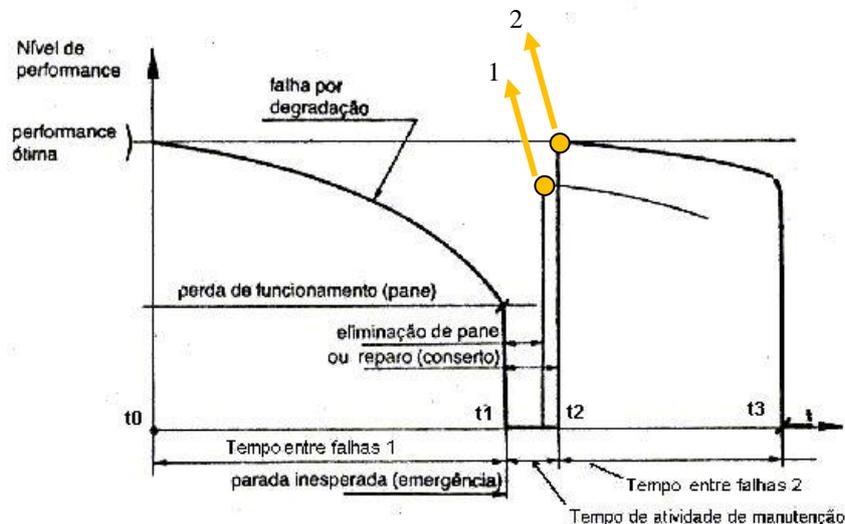


FIG.6 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA MANUTENÇÃO CORRETIVA

Fonte: MONCHY (1989 p.34)

Para que o conjunto seja efetivamente restabelecido ao seu estado normal deve-se identificar a ocorrência, diagnosticá-la, localizá-la e isolá-la do restante do sistema, analisar as causas, efetuar a correção, reparando ou substituindo o item danificado e verificar o funcionamento pós-recuperação por meio de testes.

Segundo MONCHY (1989, p.38), justifica-se ter a manutenção corretiva como método de intervenção padrão quando:

- Os gastos indiretos de falha e os problemas de segurança são mínimos;
- A empresa adota uma política de renovação frequente do material e
- O parque é constituído de máquinas muito diferentes umas das outras e as eventuais falhas não são críticas para a produção.

As principais causas de falhas que podem fazer com que o item ou sistema necessite de manutenção corretiva são a inadequação do projeto, a má qualidade de fabricação, a má operação do equipamento ou manutenção ineficiente ou insuficiente.

1.1.2.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

É caracterizada por ser uma intervenção planejada com o objetivo de reduzir a probabilidade de falhas de um equipamento. Consiste de inspeções, medições e serviços como limpeza, lubrificação, calibração e substituição periódica de peças críticas.

WYREBSKI (1987) define a manutenção preventiva como uma filosofia ou uma série de procedimentos, ações, atividades ou diretrizes adotadas para se evitar ou minimizar a necessidade de manutenção corretiva. Adotar a manutenção preventiva significa introduzir o fator qualidade no serviço de manutenção.

Para que uma inspeção seja efetuada devem ser definidos os itens críticos, suas instalações e as localizações dentro da área operacional e suas influências na atividade fim da organização. Deve ser estabelecida uma lista de itens a serem inspecionados, tipos de intervenções a serem realizadas, suas frequências e a necessidade de emprego de outros equipamentos para substituição provisória.

TEÓFILO (1989 p. 14) ressalta que um programa adequado de manutenção preventiva deve considerar a relação entre os custos das atividades de intervenção e os de paralisação do sistema, equipamento ou produção.

Na FIG. 7 é representado o desempenho (*performance*) de um item como função do tempo onde a técnica de manutenção preventiva é praticada. No intervalo de tempo entre t_0 e t_1 são efetuadas várias visitas preventivas, representadas pelos instantes t_{v1} a t_{v5} , para identificar as condições de operacionalidade do item. Estas visitas são efetuadas até a parada para a execução da manutenção preventiva no instante t_1 , momento próximo do limite de *performance* desse item. Entre os instantes t_1 e t_2 , executa-se a manutenção preventiva, restabelecendo a condição teórica de *performance* ótima, momento que inicia um novo ciclo de visitas preventivas até a próxima parada para a intervenção preventiva, representada pelo instante t_3 .

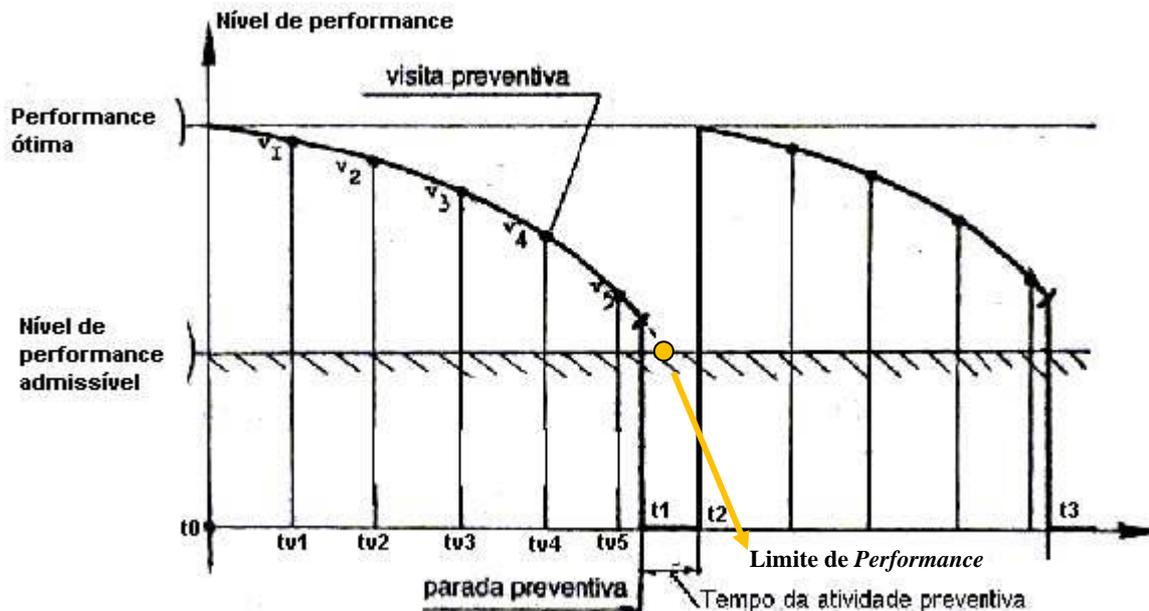


FIG.7 NÍVEL DE PERFORMANCE x TEMPO DE FUNCIONAMENTO E REPARO DE UM EQUIPAMENTO - Fonte: MONCHY (1989 p.34)

Segundo LAFRAIA (2001, p.173), a manutenção preventiva de um sistema ou item afeta diretamente sua confiabilidade e a taxa de falhas (frequência com que as falhas ocorrem num certo intervalo de tempo), isto é, na probabilidade de falha imediata em qualquer instante, dado que o equipamento estava operando.

A FIG. 8, a seguir, representa a taxa de falhas (λ) em função do tempo de operação de um sistema ou item. Observando-se as curvas, podem-se destacar três trechos distintos: o primeiro, que se estende no intervalo $(0, t_1)$ e que apresenta taxa de falhas decrescente, denominado período juvenil, onde ocorrem grande quantidade de falhas, mas dependendo do tipo de controle de qualidade e inspeção, pode-se obter razoável redução das mesmas; o segundo, no intervalo (t_1, t_2) , denominado período adulto é caracterizado pela taxa de falhas constante e o terceiro, no intervalo (t_2, ∞) , denominado período senil, onde nota-se um aumento considerável da taxa de falhas, observando-se que a forma de intervenção da manutenção preventiva pode influenciar a taxa de falhas, modificando inclusive o tempo de vida útil do sistema ou item.



FIG.8 TAXA DE FALHAS x TEMPO DE OPERAÇÃO

Fonte: LAFRAIA (2001 P.173)

Para se avaliar as três fases não se pode utilizar a mesma abordagem estatística, haja vista que os comportamentos em relação ao tempo são diferenciados. A FIG. 9 apresenta as funções de densidade de probabilidade características das três fases da curva da banheira.

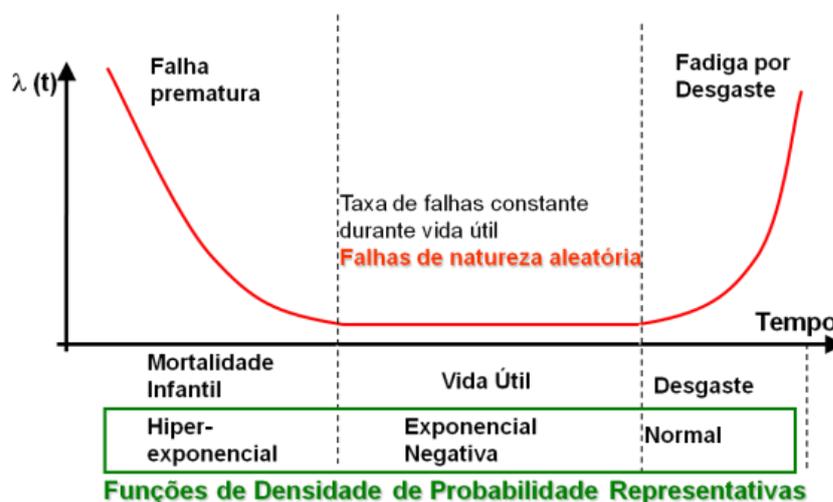


FIG. 9 – Três fases da Curva da Banheira

Dependendo do componente a curva da banheira pode apresentar um aspecto diferente. A FIG. 10 a seguir apresenta as curvas de um software, de componentes eletrônicos e componentes mecânicos. A primeira curva, da esquerda para direita,

registra a correção das falhas (*bugs*) a medida que elas forem acontecendo (FIG.10-A). A segunda é caracterizada pela existência inicial de falhas aleatórias e por não possuírem desgaste acentuado (FIG.10-B). A terceira apresenta as três fases da curva da banheira em destaque (FIG.10-C). Objetiva sempre se tentar prolongar a fase das falhas aleatórias para se aumentar a vida útil do componente, maximizando o investimento no ativo.

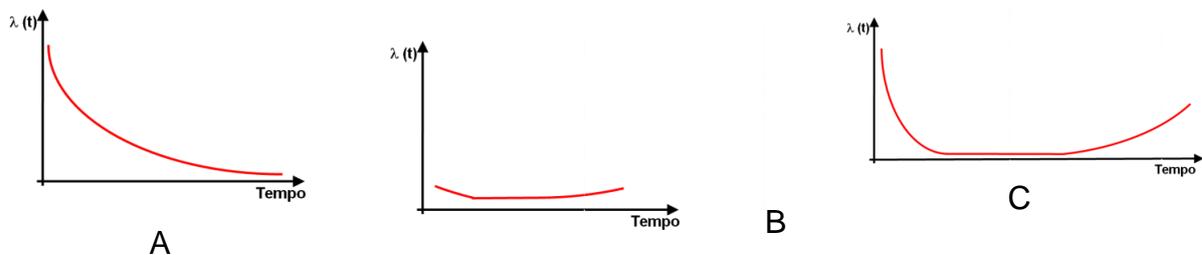


FIG.10 – Três exemplos de curvas da banheira

A adoção da manutenção preventiva proporciona a continuidade do funcionamento do sistema, podendo-se programar as paradas para tal, cumprindo-se com mais facilidade os programas de produção. Com isso, possibilita-se a redução de estoques de peças de reposição e diminui-se o tempo de indisponibilidade do item. Em compensação, para que esse tipo de abordagem seja implantado, necessitam-se da elaboração de programas, procedimentos, roteiros e rotinas de manutenção eficazes e de uma equipe com qualificação para intervir nos equipamentos com os menores tempos possíveis.

1.1.2.3. PROGRAMA DE MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL

Além da melhoria dos processos de planejamento e controle da manutenção, a formação de equipes multidisciplinares pode proporcionar um maior envolvimento entre as equipes de produção e manutenção, facilitando a identificação de problemas operacionais.

O programa de Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance – TPM*) também conhecido como programa de Manutenção Autônoma, é caracterizado pelo envolvimento de todos os funcionários da cadeia produtiva com os da manutenção, em níveis diferenciados, de acordo com o posicionamento na hierarquia da empresa.

De acordo com WYREBSKI (1987), as inovações tecnológicas incorporadas pelos Estados Unidos na área de manutenção de máquinas, caracterizaram a evolução da manutenção preventiva para a Manutenção Produtiva Total. O Japão concretizou a TPM com o envolvimento de todos em um programa de manutenção total, sendo aperfeiçoado pelo *Japan Institute of Plant Maintenance* – JIPM e implantado, a partir de 1970, na *Nippon Denso* (pertencente ao grupo *Toyota*) com cinco propósitos básicos relacionados por ANTUNES (2001):

- 1- Maximizar o rendimento global dos equipamentos (Eficiência do ativo).
- 2- Desenvolver um sistema de manutenção produtiva que leve em consideração vida útil do equipamento (Ciclo de vida do ativo).
- 3- Envolver todos os departamentos, planejamento, projeto, utilização e manutenção, na implantação da TPM (Treinamento conjunto – não-setorial).
- 4- Envolver, ativamente, todos os empregados - desde a alta gerência até os trabalhadores de chão-de-fábrica (Qualidade total).
- 5- Tornar o TPM um movimento visando à motivação gerencial, através do desenvolvimento de atividades autônomas de melhorias por pequenos grupos (Auto-reparo).

Implanta-se a TPM com o principal objetivo de eliminar as perdas que prejudicam a produção por meio de análise das causas diretas. As deficiências associadas à homens, máquinas, materiais e métodos são consideradas perdas, podendo-se agrupá-las em perdas por parada devido à falha, mudança de linha de atuação ou regulagem, operação em vazio (sem produção efetiva) e pequenas paradas, queda de velocidade, defeitos gerados pelos processos de produção e no início da operação e por queda de rendimento do operador.

Para isso, utilizam-se alguns programas bem difundidos nas organizações:

A - Oito S:

1. *Seiri* = organização; implica eliminar o supérfluo.
2. *Seiton* = arrumação; implica identificar e colocar tudo em ordem.
3. *Seiso* = limpeza; implica limpar sempre e não sujar.
4. *Seiketsu* = padronização; implica manter a arrumação, limpeza e ordem em tudo.
5. *Shitsuke* = disciplina; implica a autodisciplina para fazer tudo espontaneamente.

6. *Shido* = treinar; implica a busca constante da capacitação pessoal.

7. *Seison* = eliminar as perdas.

8. *Shikari yaro* = realizar com determinação e união.

B – Eliminar as seis perdas:

1. Perdas por quebra.

2. Perdas por demora na troca de ferramentas e regulagem.

3. Perdas por operação em vazio (espera).

4. Perdas por redução da velocidade em relação ao padrão normal.

5. Perdas por defeito de produção.

6. Perdas por quebra de rendimento.

C – Cinco medidas para se obter Quebra-zero:

1. Estruturação das condições básicas.

2. Obediência às condições de uso.

3. Regeneração do envelhecimento.

4. Sanar as falhas do projeto (terotecnologia).

5. Incrementar a capacitação técnica.

Terotecnologia: ramo tecnológico que permite visualizar um projeto de forma holística, considerando-se as questões sociais, econômico-financeiras, tecnológicas, de operação e produção e de manutenção.

1.1.2.4. MANUTENÇÃO PREDITIVA

Também conhecida como manutenção de condição, a manutenção preditiva é caracterizada pela atuação num determinado instante do tempo diagnosticado como ideal e tem como objetivo garantir a operação contínua do equipamento, prevenindo-se desta forma contra falhas iminentes.

A determinação do instante de tempo ideal para a aplicação da manutenção preditiva é conseguida com a análise dos sintomas e com estatísticas das ocorrências. A análise estatística é utilizada quando existem dados históricos da manutenção corretiva e preventiva que podem ser utilizados na aplicação do cálculo de probabilidades e determinação de parâmetros de confiabilidade. A análise de sintomas é aplicada em equipamentos isolados e complementa as análises efetuadas pela análise estatística.

De acordo com SANTOS (1990 p.1.89), para adotar a manutenção preditiva são necessárias duas condições:

1ª - que haja uma degradação progressiva do sistema e que se possam monitorar as condições de funcionamento do item observado e

2ª - que o equipamento ou item seja suficientemente importante para o funcionamento do sistema.

Para que se possam monitorar os equipamentos, devem-se determinar parâmetros dos mesmos que relacionados ao estado do sistema, caracterizem o momento da intervenção. Esses parâmetros podem ser:

1. Consumo de energia, temperatura, corrente elétrica, viscosidade etc.;
2. Níveis de vibrações e ruídos;
3. Composição química das peças;
4. Dimensão que avalie folgas, desgastes etc.;
5. Radiação eletromagnética dos componentes elétricos.

WYREBSKI (1987) ressalta que a principal vantagem do uso da manutenção preditiva está na possibilidade de aproveitamento máximo da vida útil dos elementos de um equipamento, podendo-se programar, somente, a substituição das peças comprometidas.

Para SANTOS (1990 p.1.90), a possibilidade de diminuição de estoques, redução acentuada da manutenção corretiva e direcionamento para um gerenciamento das unidades críticas são outras vantagens desse tipo de manutenção.

1.1.2.5. MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

Segundo FLEMING (2001), a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) ou *Reliability Centred Maintenance* (RCM), começou a ser desenvolvida na indústria aeronáutica, por volta de 1960, com o objetivo de estabelecer um processo racional e sistemático de análise que permitisse a definição de tarefas de manutenção de equipamentos para garantir a confiabilidade e a segurança operacional ao menor custo possível.

Em 1978, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos preparou um relatório intitulado "*Reliability-centered Maintenance*", descrevendo a situação atual do desenvolvimento desta metodologia. Este relato serviu de base para formulação de estratégias de manutenção, cuja documentação recebeu o título de *Maintenance Steering Group – 3* (MSG3), foi promulgada em 1980 pela *Air Transport Association of America* (ATA). MOUBRAY (2001)

Conforme registro de LAFRAIA (2001), que indica que o principal objetivo da (MCC) é assegurar que um sistema ou subsistema e seus itens continuem a preencher as suas funções operacionais desejadas, confirma-se que deve existir uma visão sistêmica em qualquer tipo de análise, tanto econômico-financeira quanto em relação ao gerenciamento dos ativos. Enquanto na manutenção tradicional são levantadas as características técnicas das falhas, na MCC a visão é direcionada para os efeitos funcionais (operacionais) daquelas. Além disso, nela procura-se aumentar a confiabilidade e a segurança operacional dos ativos, em conjunto com a minimização dos impactos ambientais negativos.

Na MCC, as atividades de manutenção necessárias são classificadas com o intuito de gerar procedimentos para manter um sistema em funcionamento e não para colocar o equipamento em condição ideal.

A MCC é, antes de qualquer coisa, uma quebra de paradigma, ou seja, é uma técnica que alavanca a mudança cultural da manutenção nas organizações. É a evolução da Manutenção não-Estratégica, onde é comum se encontrar retrabalho, sem necessidade de qualificação intensiva, problemas crônicos (p.e. acidentes), falta de estoque para manutenção, falta de planejamento de manutenção (predomínio das intervenções corretivas), baixa produtividade dos equipamentos e dos RH, falta de

Engenharia de Produção

GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

histórico de manutenção (ou não-confiável) e excesso de horas extras. A tabela a seguir resume os dois focos abordados anteriormente.

Questões	Manutenção Tradicional	MCC
Foco	Equipamento	Função do sistema
Objetivo	Manter o equipamento	Preservar a função do sistema
Atuação	Componente (parte)	Sistema (todo)
Atividades	O que <u>pode</u> ser feito	O que <u>deve</u> ser feito
Dados	Pouca importância	Muita importância
Documentação	Pouca	Fundamental
Metodologia	Empírica	Estruturada
Ação	Desgaste do equipamento	Planejamento: consequências da falha
Normalização	Não	Sim

Quanto à Normalização, cabe destacar que a MCC é a única baseada em uma norma internacional (SAE-JA 1011/1999 - *Evaluation Criteria for a Reliability-Centered Maintenance - RCM Processes*) e que dela foram gerados normativas específicas, tais como:

- 1999:** pela Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC - *International Electrotechnical Commission*), IEC-60300-3-11.
- 1999:** Padrão outorgado pela Sociedade Internacional de Engenheiros Automotivos (SAE – *Society of Automotive Engineers*), SAE-JA 1011.
- 2002:** SAE-JA 1012 (em conjunto com a SAE-JA 1012/2002).
- Comando Aéreo Naval dos Estados Unidos da América: *Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Maintenance Process* (NAVAIR 00-25-403).
- Marinha Real Britânica: *Naval Engineering Standard* (NES45).
- RCM2 – Versão da ALADON Consultoria em RCM, fundada por John Mitchell Moubray IV († 2004), que incorpora, dentre outros pontos, às questões ambientais e os critérios para quantificação de riscos ao processo de tomada de decisões.

Pode-se resumir a MCC pela relação das seguintes perguntas (baseado na SAE-JA 1011):

1. O que é o sistema?

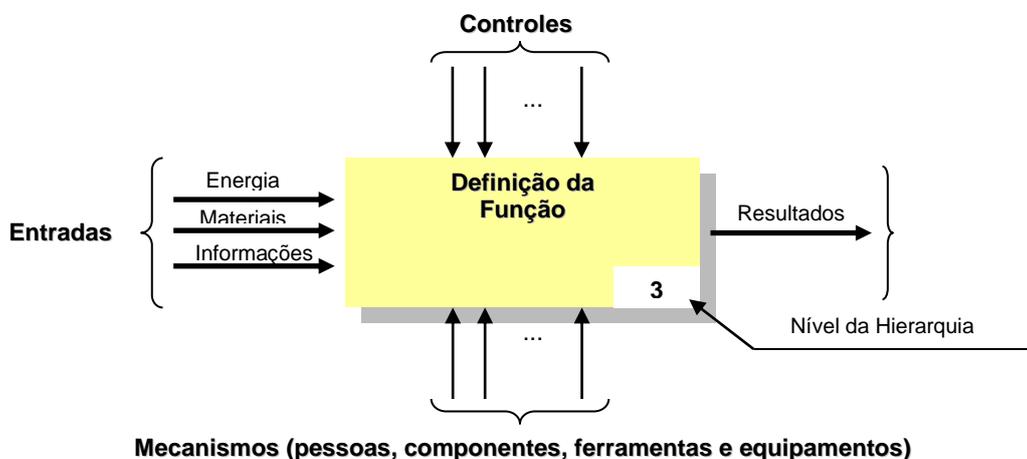
- a. Descrição;
- b. Responsabilidade dos componentes na operação;
- c. Hierarquização;
- d. Entradas, saídas, recursos e limitações (diagrama de blocos funcionais ajuda);
- e. Interfaces (fronteiras) entre os componentes e deles com outros sistemas (diagrama de blocos funcionais ajuda).

Método SADT – *Standard Analysis and Design Technique* para elaboração do Diagrama de Blocos Funcionais

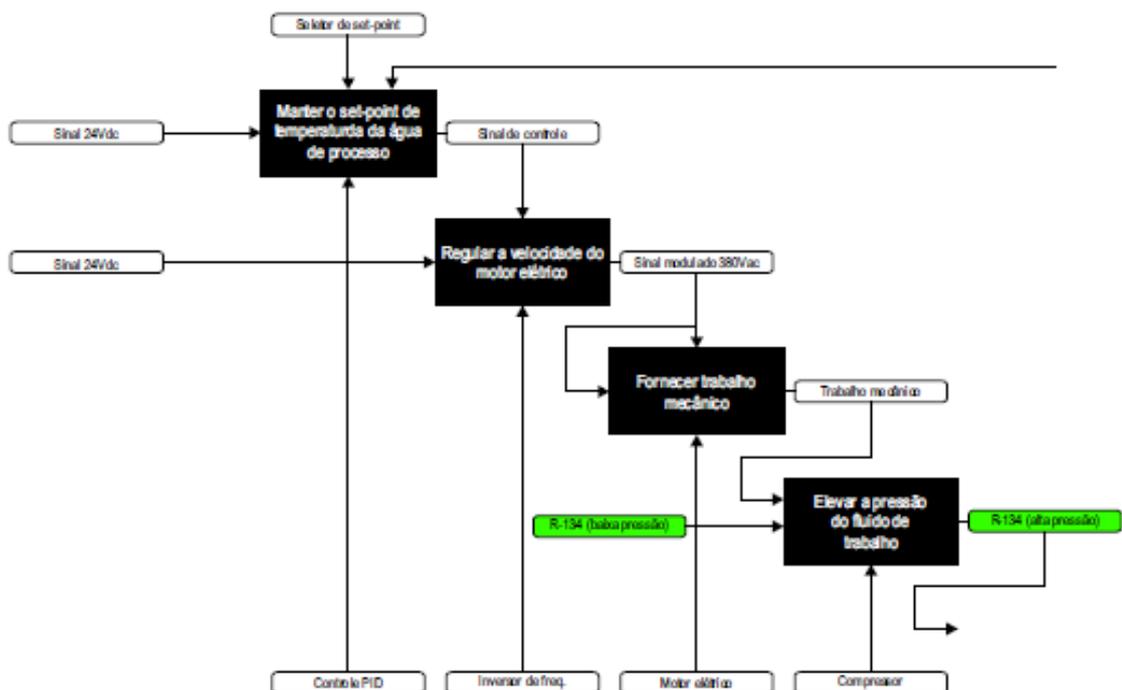
- ✓ Serve para facilitar o entendimento de como são os sinais de entrada e de saída;
- ✓ Facilita a identificação de quais são os mecanismos de controle necessários à execução de uma determinada função pelo sistema;
- ✓ Como um componente interage com outros.

O que se deve representar?

- Entradas: as energias, os materiais e/ou as informações necessárias à execução da função.
- Controles: os controles e outros elementos que limitam ou governam a forma como a função é executada.
- Mecanismos: as pessoas, os sistemas, as ferramentas ou os equipamentos necessários à execução da função.
- Saídas: os resultados da execução da função.



Exemplo:



Fonte: ANÁLISE DE FALHAS - TÓPICOS DE ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE - LUIS HENRIQUE TERBECK PINTO - ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO - 2004-NOVEMBRO

2. Quanto ao sistema, quais as **funções** (e desempenho) a preservar?
(FMEA ajuda)

Função: qualquer propósito pretendido para um processo ou produto.

3. De que forma o sistema falha em cumprir suas funções (**falhas funcionais**)?

Falhas Funcionais: são falhas conduzem à paralisação total ou parcial das funções requeridas para os ativos, obrigando à área de manutenção adotar uma abordagem adequada para a gerência da falha.

4. Quais são os **modos de falha** (FMEA e FTA ajudam)?

Modos de falha: Após a identificação de cada falha funcional, o próximo passo é identificar **todos os eventos** que são razoavelmente prováveis de causar cada estado de falha (falha funcional). Geralmente a descrição de um modo de falha deve consistir de um substantivo e de um verbo.

Para LAFRAIA (2001) Modo de Falha é a descrição da maneira pela qual um item falha em cumprir com a sua função. Compreende os eventos que levam a uma diminuição parcial ou total da função do item e de suas metas de desempenho.

Modos de falha (outras definições):

- Maneira pela qual a falha é observada. (Mil-Std 1629A) Visão de fora do sistema;
- Efeito pelo qual se percebe que a falha ocorreu (IEEE Std 500);
- É qualquer evento que possa levar um ativo (sistema ou processo) a falhar;

Exemplos típicos: fratura, separação, deformação, desgaste, corrosão, abrasão, desbalanceamento, rugosidade, desalinhado, trincamento, deficiências da manutenção, encurtamento, entupimento, vazamento interno, vazamento externo, indicação errada, operação inadvertida, fluxo restrito, curto-circuito (elétrico), fuga (elétrica).

Causas da falha (não são listadas no formulário da MCC): representa os eventos que geram (provocam, induzem) o aparecimento do modo de falha, e pode ser detalhada em diferentes níveis para diferentes situações.

Exemplos:

1) Componente: Eixo do veículo.

Abordagem: Funcional.

Função: Sustentar o veículo, proporcionar o movimento.

Modo de Falha: Não transmite o movimento.

2) Componente: Eixo do veículo.

Abordagem: Estrutural.

Função: Sustentar o veículo, proporcionar o movimento.

Modo de Falha: Desbalanceamento, ruptura, empeno, desgaste.

5. O que acontece quando ocorre cada falha (**efeitos**)?

Efeitos da falha: listar os efeitos da falha, os quais descrevem o que acontece quando ocorre cada modo de falha. Estas descrições devem incluir todas as informações necessárias para suportar a avaliação da consequência da falha, tais como:

- a) Qual a evidência (se existe alguma) de que ocorreu a falha;
- b) De que modo (se existe algum) ela é uma ameaça à segurança ou ao meio ambiente;
- c) De que modo (se existe algum) ela afeta a produção ou operação;
- d) Qual o dano físico (se existe algum) é causado pela falha;
- e) O que deve ser feito para restaurar a função do sistema após a falha.

Exemplo:

Modo de Falha: vazamento de fluido de freio;

Causa: junta isolante danificada;

Efeito: queda de desempenho do freio.

6. De que forma cada falha tem importância (**consequências das falha**)?

(FMEA ajuda)

Deve-se ter o cuidado de não confundir efeito da falha com consequência da falha:

O efeito da falha responde a questão “O que acontece quando o modo de falha ocorre?”

A consequência da falha responde a questão “Quais são as consequências quando o modo de falha ocorre?”

Categorias das consequências da falha:

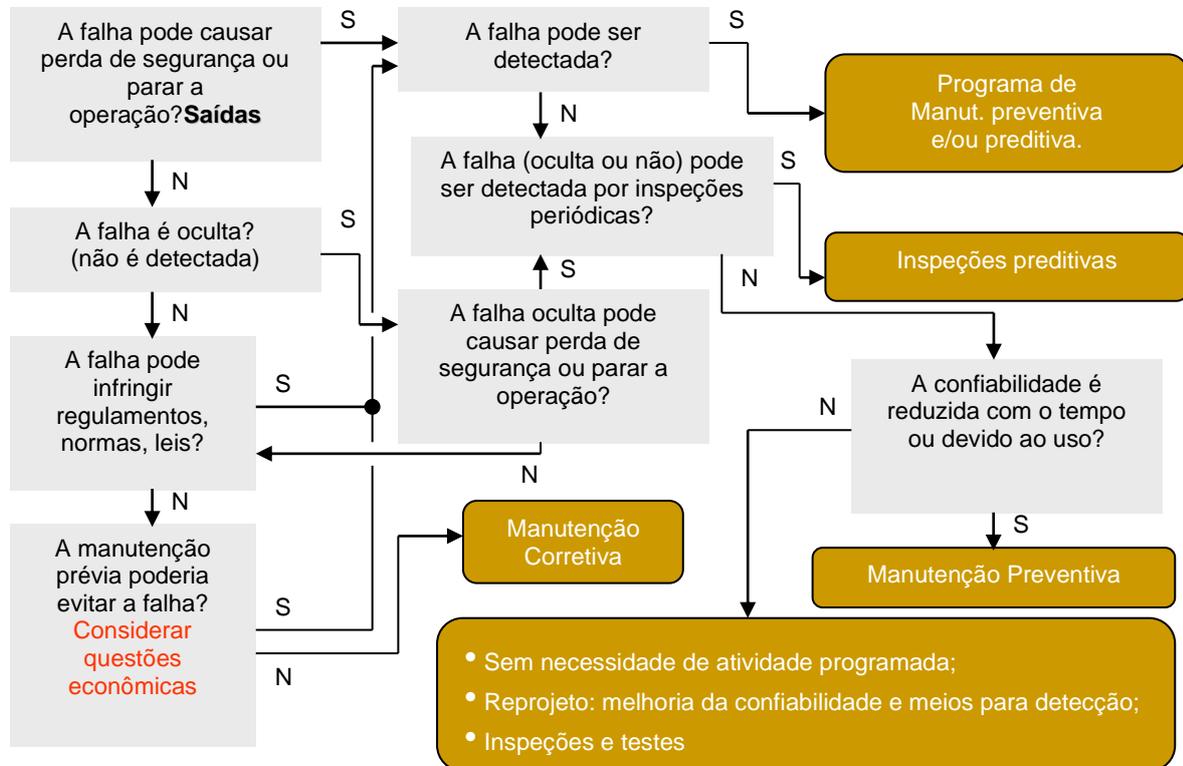
- ✓ Ocultas: as falhas ocultas não têm impacto direto, mas expõem a empresa a falhas múltiplas com consequências sérias, frequentemente catastróficas.
- ✓ Segurança e Meio Ambiente: uma falha tem consequência sobre a segurança se ela puder ferir ou matar alguém. Tem consequências sobre o meio ambiente se vier a violar qualquer padrão ambiental, da empresa, regional ou federal.
- ✓ Operacionais: uma falha tem consequências operacionais se ela afeta a produção (quantidade, qualidade do produto, serviço ao cliente ou custos operacionais, além do custo direto do reparo).
- ✓ Não-operacionais: tem apenas o custo direto do reparo.

7. O que pode ser feito para detectar e prevenir a falha (**tarefas preditivas e preventivas**)?

- ✓ Atividades pró-ativas: são tarefas empreendidas antes de uma falha ocorrer, de modo a prevenir o item de entrar em um estado de falha. Elas abrangem o que é tradicionalmente conhecido como manutenção preditiva e preventiva.

8. O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa pró-ativa adequada (**ações default**)?

- ✓ Atividades default são tarefas que tratam o estado de falha e são escolhidas quando não é possível identificar uma tarefa pró-ativa efetiva. Ações default incluem busca da falha, reprojeto e rodar até falhar.



Adaptado de Seixas (s/d)

9. Qual é a **periodicidade** das tarefas?

Nesta etapa são determinados os planos de manutenção com os tempos de intervenção. Além disso, deve-se também considerar:

- ✓ A estruturação para implantação da metodologia.
- ✓ A caracterização de indicadores (confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade) para percepção do desempenho – antes e depois.

10. Existem **outras alternativas**?

1.1.3. O ASPECTO ECONÔMICO DA MANUTENÇÃO

Qualquer que seja o tipo de manutenção adotado, investimentos devem ser feitos, buscando-se reduzir os custos incidentes nos serviços ou produtos finais. Além disso, a manutenção eficiente e eficaz se traduz em redução dos custos internos da empresa, possibilidade de aumento da produção o que implica em aumento da arrecadação,

atendimento à demanda existente e futura, manutenção da fidelidade dos clientes existentes e conquista de outros mercados.

Para atingir esse propósito é necessário identificar os setores nos quais deve-se atuar para agregação de valores, localizando os pontos onde os custos podem ser controlados, inserindo a manutenção no contexto comercial da empresa e definindo como custo aquilo que o cliente interno paga e não apenas os valores contábeis relacionados.

Sob o ponto de vista de identificação do custo de manutenção, este se divide em custos diretos e indiretos, que segundo LEIBEL (2001) são:

- custos diretos: aqueles necessários para manter os equipamentos em operação (custos com mão-de-obra, sobressalentes, materiais de consumo e serviços de terceiros) e
- custos indiretos: aqueles relacionados com a estrutura gerencial e de apoio administrativo, incluindo gastos com análises e estudos de melhoria, engenharia de manutenção, supervisão etc.

Pode-se utilizar a técnica de Custeio Baseado em Atividade (*Activity Based Costing* – ABC) para identificar as causas dos custos e assim trabalhar com as atividades que consomem recursos. Os sistemas tradicionais de apropriação de custos baseiam-se na percepção de que esses são gerados pelo volume de produção, horas de mão-de-obra, horas de funcionamento das máquinas etc.

Identificando-se as atividades e os seus direcionadores de custos, torna-se possível representar o comportamento que agrega ou não valores ao produto.

1.2. DEPENDABILIDADE

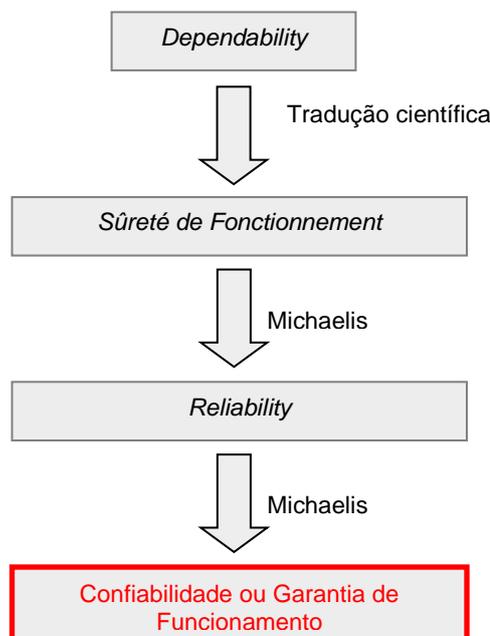
Um sistema é, em geral, constituído de um conjunto de partes que podem influenciar mais ou menos na operacionalidade do mesmo. Assim, o desempenho da operação do sistema, “depende” em maior ou menor grau da confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e a criticidade das partes que o constituem.

Segundo LEMOS *et al.* (2000), o termo "dependabilidade" do sistema em relação as suas partes, exprime bem a conotação da qualidade do serviço prestado. Essa definição é melhor detalhada pelo Grupo de Pesquisa em Tolerância a Falhas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: "..., é a qualidade de serviço e engloba

outros conceitos como confiabilidade, disponibilidade, segurança, performabilidade, manutenibilidade e testabilidade". Cabe neste ponto acrescentar algumas definições desse mesmo grupo de pesquisa:

- Confiabilidade: probabilidade de um sistema operar corretamente e de forma ininterrupta durante um intervalo de tempo;
- Disponibilidade: determina a probabilidade de um sistema de estar operando corretamente e disponível para realizar suas funções, durante certo período;
- Segurança: probabilidade de um sistema executar corretamente suas funções ou descontinuí-las de uma maneira segura sem comprometer a operação de outros sistemas;
- Performabilidade: probabilidade de um sistema em um determinado instante apresentar um desempenho igual ou superior a um nível pré-determinado durante um certo período de tempo;
- Manutenibilidade: probabilidade de um sistema que falhou poder ser recuperado dentro de certo intervalo de tempo e
- Testabilidade: facilidade de poder testar certos atributos de um sistema.

Cabe observar que o uso do termo Dependabilidade iniciou de *Dependability*, do inglês, para se chegar até a visão de confiabilidade e segurança observando-se os seguintes passos:



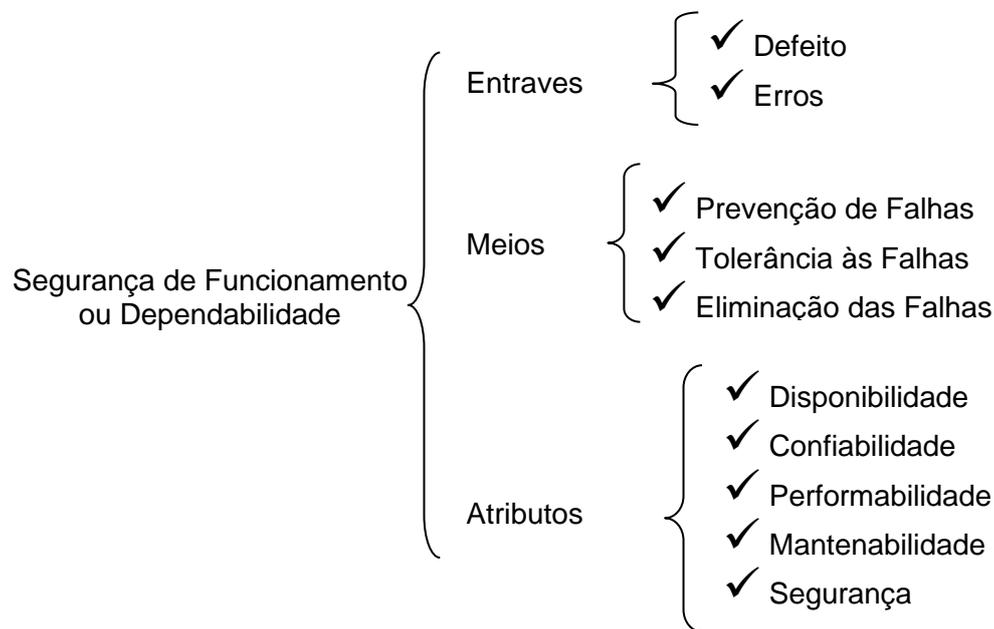
O desempenho e a dependabilidade são duas importantes características para a análise de sistemas. Usualmente, devem ser avaliadas separadamente, considerando

que a primeira assume que o sistema, e seus componentes, não irão falhar; e que a segunda baseia-se nas análises da falha e do reparo e na estrutura do sistema. Das (1998)

Segundo Avizienis *et al.* (2000) a dependabilidade, ou segurança do funcionamento, de um sistema pode ser dividida em três partes:

- ✓ Os atributos do sistema;
- ✓ Os meios de obtenção da segurança e;
- ✓ Os entraves para a obtenção da segurança de funcionamento.

A seguir está expressa a taxionomia¹ da dependabilidade.



1- Taxionomia: classificação ou sistemática

Sistemas que devem ser seguros, tais como transportes sobre trilhos, missões espaciais, controle do tráfego aéreo, devem ter alto grau de qualidade e desempenho, pois são sistemas com alta criticidade, necessidade de longa vida útil, alta disponibilidade e dificuldade de executar a manutenção devido ao regime ininterrupto de operação.

Para se identificar as características de qualidade e desempenho do sistema e das suas partes, torna-se necessário detalhar os conceitos de confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade e criticidade

1.2.1. CONFIABILIDADE

O conceito de confiabilidade está relacionado ao acontecimento de situações que prejudicam o funcionamento de um produto ou serviço e em consequência, ao usuário que o utiliza, podendo colocar vidas em risco, causar prejuízos econômicos-financeiros e impactos ambientais.

O termo “confiabilidade” teve vários enfoques durante o desenvolvimento dos sistemas produtivos.



A preocupação pela confiabilidade de sistemas se iniciou durante a Segunda Guerra Mundial por causa do tamanho e da complexidade dos sistemas utilizados. Antes deste período, o conceito de confiabilidade era intuitivo, subjetivo e qualitativo. Quando a confiabilidade é definida quantitativamente, ela é especificada, analisada e medida tornando-se um parâmetro de projeto que pode substituir outros como custo e desempenho. (DHILLON; SINGH, 1981, p.1)

Nos anos 1940, o matemático Robert Lusser desenvolveu a primeira equação associada à confiabilidade de um sistema em série (LAFRAIA, 2001, p.6) e nos EUA, as forças armadas desenvolveram estudos sobre reparo de equipamentos, custo de manutenção e falhas de equipamentos eletrônicos, criando-se um comitê de confiabilidade que em 1952 foi transformado em um grupo permanente, chamado de Grupo Consultor de Equipamentos Eletrônicos (AGREE). Em 1957 a AGREE publicou um relatório que produziu uma especificação para confiabilidade de equipamentos eletrônicos para a área militar (DHILLON, 1983, p.1).

Na década de 1950, com o surgimento das indústrias aeroespacial e eletrônica, em conjunto com a implantação da indústria nuclear, ocorreu um grande salto no desenvolvimento de metodologias de cálculo e aplicações da confiabilidade. (LAFRAIA, 2001, p.6)

No início da década de 1960, H.A.Watson desenvolveu a Análise de Árvore de Falhas, época onde ocorreu grande evolução nos estudos de confiabilidade em sistemas estruturais mecânicos e na utilização de hardware de computadores. Na década seguinte estudos se aprofundaram na área de confiabilidade de software computacional, tomando grande vulto em sistemas de energia de alta potência. (LAFRAIA, 2001, p.7)

De acordo com LAFRAIA (2001, p.7), a partir do início da década de 1980, os países detentores de tecnologia de ponta implantaram definitivamente as técnicas de análise da confiabilidade em diversos setores da engenharia, destacando-se as áreas de sistemas eletrônicos e computacionais, de energia de potência, nucleares, transportes etc..

A análise apurada da confiabilidade reforçou a necessidade da formação de equipes para estudá-la impondo a criação da Engenharia da Confiabilidade. Uma das funções dessas equipes é a definição de níveis de segurança a serem utilizados nos projetos, desde a sua concepção até a operação.

Segundo FERREIRA (2001), a engenharia de confiabilidade tem como responsabilidade o desenvolvimento de tarefas especiais enquanto um sistema está sendo planejado, construído, manufaturado, operado e melhorado e visam assegurar que o sistema execute sua função adequadamente durante a vida útil projetada.

Todos os sistemas, devido a erro no projeto, na execução da manutenção ou na operação, estão sujeitos a ocorrência de falhas. Assim, o objetivo principal da engenharia da confiabilidade é a minimização do ciclo da falha de qualquer evento que possa influenciar negativamente o cliente principal. Pode-se tentar minimizar este fenômeno por meio de aplicações de processos de controle de qualidade, impedindo que falhas resultem em erros (mascaramento) ou por meio da habilidade intrínseca de um sistema para continuar a execução de suas funções, mesmo diante da manifestação de erros.

Existem várias definições de confiabilidade, constatando-se em todas elas o envolvimento do fator tempo, principalmente no que diz respeito ao tempo de

disponibilidade do sistema e o tempo necessário para restabelecê-lo após a ocorrência de uma falha.

DHILLON (1983, p.4) define confiabilidade como a probabilidade de execução de uma dada função em um período desejado de tempo de operação e de acordo com condições especificadas.

Também pode ser definida como a probabilidade que um sistema, subsistema, ou item desempenhe de acordo com características especificadas durante um tempo determinado, quando utilizado da maneira projetada e para o propósito pretendido, dado que o sistema, subsistema, ou item está funcionando corretamente ao começo da missão. (FRANKEL, 1988, p.11)

IRESON (1988, p. 1.4) define a confiabilidade como a habilidade ou capacidade do produto de executar a função especificada no ambiente designado para uma duração mínima de tempo ou número mínimo de ciclos ou evento.

LAFRAIA (2001, p.11) visualiza a confiabilidade por um enfoque sistêmico, considerando-a como a probabilidade de que um item, equipamento ou sistema exerça sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas.

A ABNT-NBR 5462 (1994) define como a capacidade de um item de desempenhar uma função específica, sob condições e intervalo de tempo predeterminados.

Considerar-se-á Confiabilidade como a probabilidade de que uma unidade observada satisfaça as exigências necessárias à finalidade de uso, sem a ocorrência de falhas, de acordo com os limites preestabelecidos em projeto, mantendo suas características técnicas por um período determinado.

Em um sistema com n itens idênticos sendo testados ao longo de um período de tempo de comprimento t , $n_f(t)$ falharam e $n_s(t)$ não falharam. A confiabilidade $R(t)$ desse sistema é definida por DHILLON *et al.*(1981, p.27) como:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} \quad \text{ou} \quad (1)$$

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n} \quad (2)$$

E a probabilidade de falha do sistema no período de tempo considerado é dada por

$$F(t) = 1 - R(t) = \frac{n_f(t)}{n} \quad (3)$$

de onde obtém-se a função densidade de probabilidade de falhas

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}, \quad (4)$$

e a taxa de falha

$$\lambda(t) = \frac{1}{n_s(t)} \frac{dn_f(t)}{dt} = -\frac{n}{n_s(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad \text{ou} \quad (5)$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6)$$

Integrando (6) entre 0 e t, chega-se a $\int_0^t \lambda(t) dt = -\int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} dR(t)$ (7)

Sendo t o tempo esperado para operação.

A partir de (7) chega-se a: $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda(t-t_0)}$, considerando-se que tal item, equipamento ou sistema está na fase de vida útil, ou seja, com taxa de falhas constante. Utiliza-se a distribuição exponencial negativa para descrever a sua probabilidade.

O Tempo Médio Entre Falhas (TMEF) ou *Mean Time Between Failures* (MTBF) é expresso por:

$$TMEF = MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad \text{para itens reparáveis na fase onde a taxa de falhas é constante.}$$

e por:

$$TMPF = \frac{\sum_{i=1}^n TPF_i}{n}, \quad \text{para itens não reparáveis na fase onde a taxa de falhas é constante.}$$

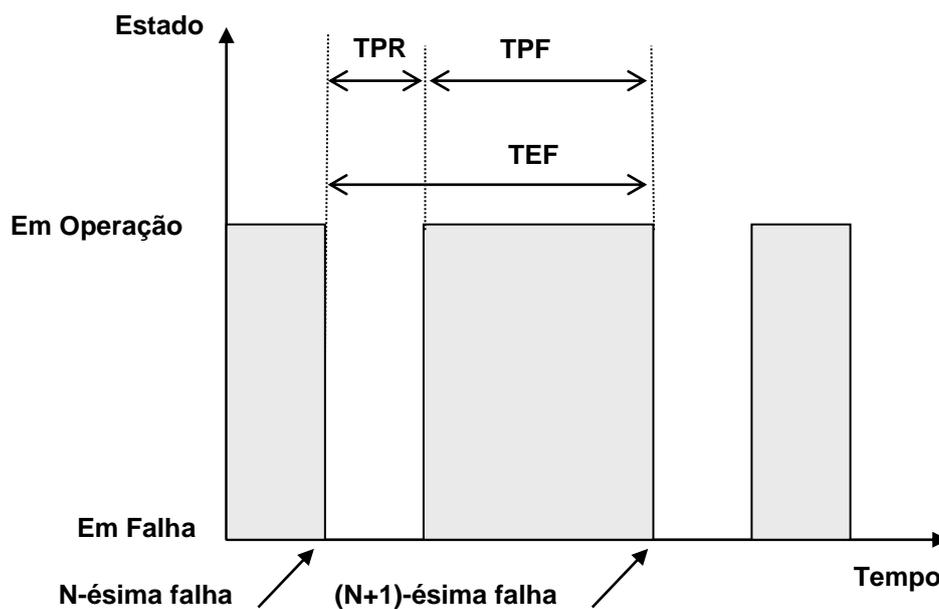
onde:

n é o número de vezes que os itens estiveram em operação normal e

TPF_i é o tempo de funcionamento do item após a falha i .

Para **componentes não reparáveis**, ou seja, que são descartados após a falha, utiliza-se o **Tempo Médio para Falhar (TMPF)** ou *Mean Time To Failure (MTTF)*.

O gráfico a seguir mostra os tempos entre falhas (TEF) e para falhar (TPF) por uma visão operativa do sistema. Também se expressa o tempo para reparo que será detalhado no próximo tópico onde se abordará a manutenibilidade. O próximo gráfico expõe esses tempos.



Obs.: para sistemas não-reparáveis utiliza-se o tempo até falhar.

Em processos de manutenção preventiva costuma-se fazer a planificação das intervenções com base em intervalos de tempos pré-estabelecidos. Estes intervalos, em algumas análises, são empíricos e não levam em consideração as distribuições dos tempos para falha dos componentes. A próxima expressão denota esta questão.

$$t\% = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{1}{1-p}\right) = TMEF \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)$$

Considerando-se uma distribuição exponencial dos tempos para falhar e sendo p uma porcentagem da população.

A análise da confiabilidade de sistemas complexos pode ser feita de forma estática utilizando-se os modelos de blocos de confiabilidade. É uma forma de análise preliminar, sendo usado para que se possam calcular as possíveis configurações do

projeto e também para determinar os níveis necessários de confiabilidade para os subsistemas, itens e componentes.

A medida que o projeto progride na direção de seu estágio final, uma análise mais detalhada pode ser feita e, finalmente, protótipos são construídos com o intuito de se verificar a confiabilidade do projeto. Logo, pode-se representar um sistema completo dividindo-o em subsistemas, itens e componentes, onde se supõe que uma “caixa preta” pode estar em um dos dois estados: “operando” ou em “falha”.

As configurações básicas estão espostas a seguir.

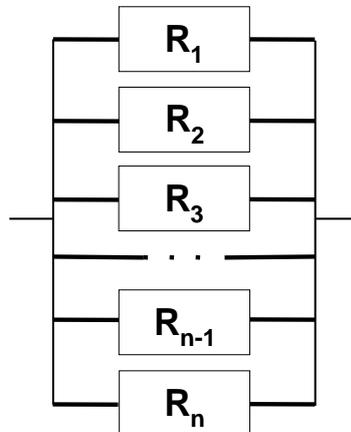
a) Configuração dos blocos em série:



$$R_{série} = \prod_{i=1}^n R_i$$

b) Configuração dos blocos em paralelo:

$$R_{paralelo} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$



c) Configuração dos blocos em redundância em *Standby*:

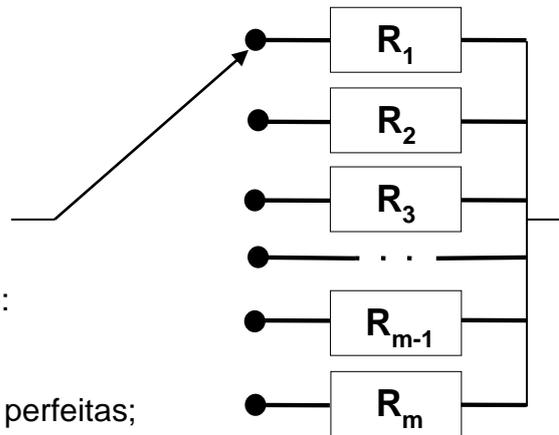
$$R_{stb} = \sum_{i=0}^n \frac{(\lambda t)^i \times e^{-\lambda t}}{i!}$$

Sendo $n = m - 1$

Observação:

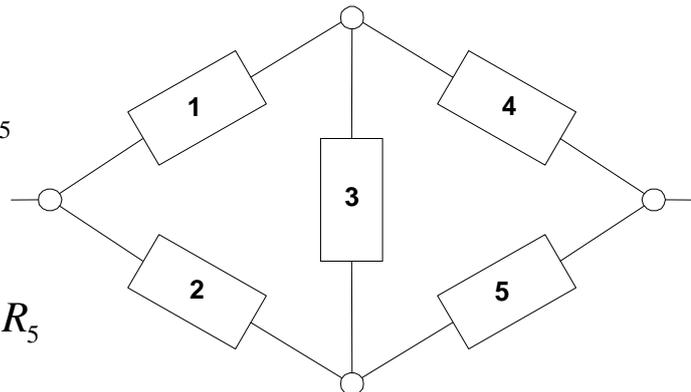
Esta expressão é válida quando:

- 1) O chaveamento é perfeito;
- 2) As unidades em paralelo são perfeitas;
- 3) A taxa de falhas é constante;
- 4) As unidades em *standby* estão perfeitas para utilização imediata;
- 5) As falhas são estatisticamente independentes.



d) Em ponte

$$R_{pt} = 2R_1R_2R_3R_4R_5 - R_2R_3R_4R_5 - R_1R_3R_4R_5 - R_1R_2R_4R_5 - R_1R_2R_3R_5 - R_1R_2R_3R_4 + R_1R_3R_5 + R_2R_3R_4 + R_1R_4 + R_2R_5$$



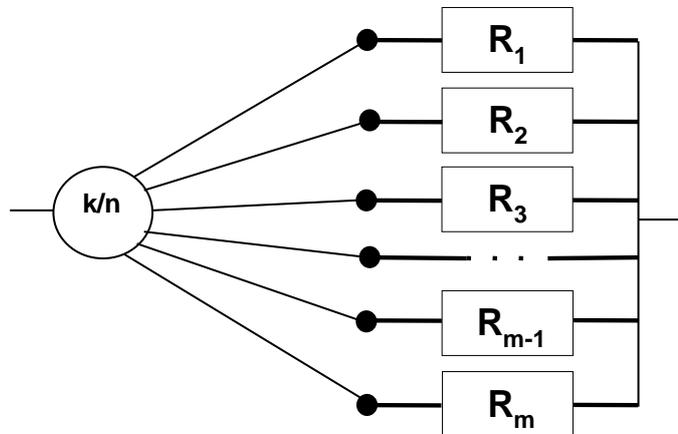
e) Configuração k/n

É utilizada onde um número “k” de unidades deve estar operando para o sucesso do sistema.

$$R_{k/n} = \sum_{i=k}^n C_i^n R^i (1-R)^{n-i}$$

Onde: $n \Rightarrow$ número total de unidades no sistema; $k \Rightarrow$ número de unidades requeridas para o sucesso do sistema

$C_i^n \Rightarrow$ combinação de "n", "i" a "i"



1.2.2. MANTENABILIDADE

A ABNT-NBR 5462 (1994) define-a como a facilidade de um item ser mantido ou recolocado no estado no qual ele pode executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante os procedimentos e meios prescritos.

Notou-se, após analisar MONCHY (1989), TEÓFILO (1989), FUZITA (1997) e LAFRAIA (2001), que todas as definições de manutenibilidade convergem para um padrão, qual seja:

Mantenibilidade de um item é a probabilidade desse ser mantido ou recolocado em condição operacional na qual possa realizar a função requerida, em limites de tempo desejados, quando a manutenção é feita sob dadas condições, com procedimentos e meios prescritos.

TEÓFILO (1989, p.52) relaciona a manutenibilidade com as ações tomadas pelos projetistas, na fase de concepção e na efetiva realização do projeto, com o intuito de incorporar ao sistema, subsistema ou equipamento, aspectos que contribuirão com uma manutenção mais fácil e segura.

O mesmo autor relaciona três objetivos que devem ser alcançados com a aplicação da engenharia de manutenibilidade:

1. Baixo tempo inoperável e em consequência, maior disponibilidade;
2. Capacidade de ser colocado em estado de operação quando retirado devido à falhas e

3. Capacidade de ser mantido em operação mediante a inibição de falhas.

A manutenibilidade de um sistema é expressa em termos de uma variável aleatória contínua definida pelo tempo necessário para a sua manutenção FUZITA (1997, p.43).

Seja τ o tempo necessário para reparar um sistema a partir do instante da falha, sua função densidade de probabilidade $m(t)$ é dada por:

$$m(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(t \leq \tau \leq t + \Delta t) / \Delta t$$

e sua função de distribuição acumulada é $M(t) = P(\tau \leq t) = \int_0^t m(\tau) d\tau$ chegando-se a $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ sendo t o tempo esperado para a manutenção.

O Tempo Médio para Reparo (TMPR) ou *Mean Time to Repair* (MTTR) de um sistema é dado por:

$$TMPR = \int_0^{\infty} t m(t) dt \text{ ou por } MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\mu}$$

onde:

λ_i : taxa de falha do i -ésimo item reparável ou substituível num sistema;

t_i : tempo necessário para reparar o sistema quando o i -ésimo item falha;

n : número de itens em reparo e

μ : taxa de reparo

1.2.3. DISPONIBILIDADE

Toda organização que investe em tecnologias para manutenção, melhorando o planejamento e o controle da mesma, tem como principal objetivo disponibilizar o sistema o maior tempo possível para o cliente.

A ABNT NBR 5462 (1994) define-a como a capacidade de um item estar em condições de executar certa função, em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

De acordo com TEÓFILO (1989, p. 73), disponibilidade de um sistema é a probabilidade de que num instante de tempo qualquer esse esteja operável.

IRESOON *et al.* (1988 p.15.27) classificam essa disponibilidade de três formas:

- Disponibilidade inerente (D_i): como a probabilidade de um sistema ou equipamento operar satisfatoriamente, quando utilizado sob determinadas circunstâncias, desconsiderando as manutenções preventivas e programadas, em uma situação ideal (sem restrições de equipamentos, peças, mão-de-obra, manuais etc.) em qualquer instante arbitrado. É expressa por:

$$D_i = \frac{\text{operação}}{\text{operação} + \text{reparo}} \therefore D_i = \frac{\text{TMPF}}{\text{TMPF} + \text{TMPR}}$$

Portanto, a disponibilidade inerente é influenciada diretamente pelo desempenho do item no sistema ($TMEF$) e pela qualidade da manutenção ($TMPR$).

- Disponibilidade alcançada (D_a): como a probabilidade de um sistema operar satisfatoriamente quando usado sob condições determinadas, em uma situação ideal (sem restrições de equipamentos, peças, mão-de-obra, manuais etc.), em qualquer instante de tempo arbitrado, desconsiderando os tempos de logística, administração e de não-operação. É expressa por:

$$D_a = \frac{MTBM}{MTBM + MAMT}$$

onde MTBM é o intervalo médio entre intervenções de manutenções corretiva e preventiva ou *Mean Time Between Maintenance*, calculada por:

$$MTBM = \frac{1}{\lambda_i \times f_i} ,$$

onde f_i é a frequência de ocorrência de falha do i -ésimo item.

- Disponibilidade operacional (D_o): como a probabilidade de um sistema operar satisfatoriamente, quando usado sob determinadas condições, em uma situação real em qualquer instante de tempo, calculada por:

$$D_o = \frac{MTBM + RT}{MTBM + RT + MDT} ,$$

onde:

RT (*Read Time*) é o tempo em que o sistema está em condições de funcionamento, mas fora de operação e

MDT (*Mean Down Time*) é o tempo médio fora de operação calculado por:

$$MDT = t + MWT + MLT + MAT ,$$

onde:

t é o tempo inicial de funcionamento do sistema;

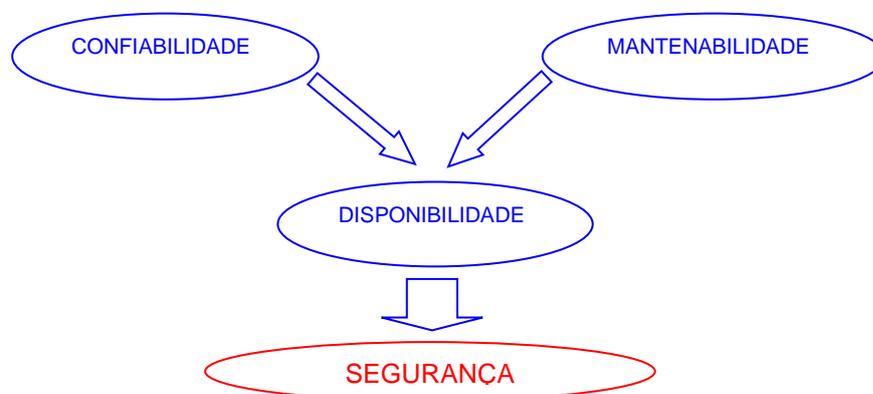
MWT (*Mean Waiting Time*) é o tempo médio de espera;

MLT (*Mean Logistic Time*) é o tempo médio de logística e

MAT (*Mean Administrative Time*) é o tempo médio administrativo.

1.2.4. CRITICIDADE

A criticidade de um item que compõe um sistema é uma medida de sua importância no funcionamento do mesmo. Baseia-se na análise das condições operacionais dos itens, objetivando a segurança e a operacionalidade do sistema.



As normas MIL-STD-1629A e BS 5760 definem "criticidade" como uma medida relativa das consequências e a frequência de ocorrência das falhas. Estas normas definem "análise de criticidade" como um procedimento para listar modos de falhar de forma hierarquizada combinando a influência da severidade e a probabilidade da ocorrência.

LAFRAIA (2001, p.110) define análise de criticidade ou análise de risco como o processo ou procedimento para identificar, caracterizar, quantificar e avaliar os riscos e seu significado.

Existem várias técnicas para avaliação da criticidade de sistemas, subsistemas e seus itens, podendo-se citar, os Métodos de Análise da Árvore de Falhas (*Failure Tree Analysis* – FTA), Modos de Falhas e Análise dos Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis* - FMEA), Modos de Falhas, Análise dos Efeitos e Análise de Criticidade (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* - FMECA), Análise Estatísticas da Falha,

entre outras. As técnicas FTA e FMECA serão objetos de capítulos no desenvolver deste material.

O Método de Análise da Árvore de Falhas foi desenvolvido por volta de 1960 por W.A.Watson da Bell Laboratories e aperfeiçoada pela Boeing Corporation. Consiste em um processo lógico que, partindo de um evento indesejado e pré-definido, busca as possíveis causas de tal evento. A elaboração da Árvore de Falhas trás uma série de benefícios como o domínio das características técnicas dos equipamentos que compõem o sistema, a identificação das falhas críticas (aquelas que podem paralisar ou degradar o nível de serviço do sistema), pode ser desenvolvida em diferentes níveis de complexidade, é ferramenta de fácil aprendizado, pois utiliza símbolos para caracterizar os diversos eventos e auxilia na determinação da causa de falhas e verifica a ligação entre as causas.

O Método de Análise dos Modos de Falhas e Análise dos Efeitos foi desenvolvido em 1949 pelas Forças Armadas Americanas com o intuito de analisar sistematicamente todos os possíveis modos potenciais de falhas de um sistema, assim como, identificar o efeito resultante de tais falhas sobre o sistema. Em outras palavras, serve para prevenir modificações ou trocas com alto custo, devido a deficiências quando da análise da confiabilidade e segurança durante o desenvolvimento do projeto.

Como variante do FMEA, o FMECA consiste de um método para examinar todos os modos de falhas de um sistema, seus efeitos potenciais no desempenho e na segurança, além da severidade desse efeito. A Análise de Criticidade leva em consideração a probabilidade de ocorrência da falha, podendo ser utilizada como uma ferramenta para priorização através de pesos calcados em critérios técnicos específicos.

De acordo com IRESON *et al.* (1988 p.18.12), SEIXAS (2001) e a norma MIL-STD-1629A, o desenvolvimento da FMECA é composto dos seguintes passos:

- 1.Descrição e representação gráfica do sistema: destacando-se as funções operacionais de cada item, as relações entre estas, a *performance* esperada, as restrições com o sistema e as características técnicas relevantes;
- 2.Identificação dos modos de falha: utiliza-se a representação gráfica para localizar os níveis superiores e nesses, identificar os modos de falha;
- 3.Identificação da causa das falhas, ações corretivas recomendadas e efeitos secundários;

- 4.Determinação do efeito das falhas em todos níveis identificados na representação gráfica;
- 5.Identificação das formas para detecção e monitoramento dos modos de falhas;
- 6.Determinação de um peso para representar a severidade do efeito da falha: medida qualitativa de uma potencial consequência na operação do sistema;
- 7.Determinação de um peso para representar a probabilidade de ocorrência da falha;
- 8.Determinação de um peso para representar a probabilidade de detecção da falha antes que o sistema seja afetado;
- 9.Cálculo do índice de risco (IR) de uma FMECA ou Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number - RPM*);
- 10.Ações preventivas recomendadas: devem ser registradas as ações preventivas para o planejamento da manutenção e
- 11.Efeitos das ações corretivas: devem ser analisadas para mobilização logística dos recursos para execução das ações corretivas.

No passo 1 utilizam-se algumas técnicas gráficas para facilitar a análise e interpretação do sistema e seus itens. Pode-se utilizar o diagrama hierarquizado, o funcional ou o lógico de confiabilidade, sendo o último mais utilizado quando necessita-se avaliar matematicamente as relações de confiabilidade entre os subsistemas e seus itens.

Em referência à severidade do efeito da falha, IRESON *et al.* (1988 p.18.12) classificam as falhas do sistema como:

- Catastróficas: podem provocar morte (funcionários ou usuários) ou perda da operacionalidade do sistema;
- Críticas: podem causar sérios ferimentos em funcionários e usuários ou provocar sérios danos ao sistema com possibilidade de degradação do nível de serviço;
- Marginais: podem causar pequenos ferimentos em funcionários e usuários, pequenos danos ao sistema com possibilidade de degradação do nível de serviço e;
- Negligenciáveis: não podem causar ferimentos ou danos para o sistema, necessitando apenas de uma ação corretiva.

A norma BS-5760 classifica a severidade do efeito da falha, conforme exposto a seguir:

- Severidade 5: quando a falha provoca destruição ou degradação definitiva do equipamento, com parada da capacidade funcional do equipamento e possibilidade de perda de vidas humanas;
- Severidade 4: quando a falha danifica o equipamento, provocando de 40% a 80% de perda da capacidade do sistema e provoca grandes ferimentos a funcionários e usuários e danos a longo prazo;
- Severidade 3: quando há degradação importante da funcionalidade do equipamento com aumento substancial do trabalho do operador, 10% a 40% de perda da capacidade do sistema e possibilidade de pequenos ferimentos com facilidade de recuperação das pessoas;
- Severidade 2: quando a falha provoca pequena degradação da condição funcional do equipamento, perda abaixo de 10% da capacidade do sistema e possibilidade de pequenos ferimentos à pessoas e;
- Severidade 1: quando a falha não provoca efeito na capacidade funcional do equipamento e do sistema nem possibilidade de ferimento em pessoas.

SEIXAS (2001) e LAFRAIA (2001, p.112) determinam pesos para classificar a severidade do efeito das falhas segundo a interferência desta no sistema:

- Negligenciável: não interfere no funcionamento do sistema, passando despercebido pelo usuário;
- Baixa: tem um leve efeito sobre o sistema, podendo haver leve deterioração do desempenho;
- Moderada: o modo de falha pode provocar insatisfação do usuário/cliente;
- Alta: pode provocar a parada do sistema, sem violar a segurança ou normas regulamentares do governo e;
- Muito alta: pode afetar a segurança do sistema ou não cumpre com as normas regulamentares do governo.

Em referência à frequência das ocorrências do modo de falha, IRESON *et al.* (1988 p.18.15) a classificam como:

- Nível A: frequente;
- Nível B: razoavelmente provável;
- Nível C: ocasional;

- Nível D: remota e;
- Nível E: improvável.

SEIXAS (2001) e LAFRAIA (2001, p.112) classificam a probabilidade de ocorrência de falha como remota, baixa, moderada, alta e muito alta.

SEIXAS (2001) classifica a probabilidade de detecção da falha em relação aos procedimentos de monitoramento:

- Muito alta (pesos 1 ou 2): quando os procedimentos de monitoramento adotados certamente detectarão o modo potencial da falha;
- Alta (pesos 3 ou 4): quando os procedimentos de monitoramento adotados tem boa chance de detectarem o modo potencial da falha;
- Moderada (pesos 5 ou 6): quando os procedimentos de monitoramento adotados certamente detectarão o modo potencial da falha;
- Baixa (pesos 7 ou 8): quando os procedimentos de monitoramento adotados provavelmente não detectarão o modo potencial da falha;
- Muito baixa (peso 9): quando os procedimentos de monitoramento adotados terão muito baixa probabilidade de detectar o modo potencial da falha e;
- Certeza de não detecção (peso 10): quando os procedimentos de monitoramento adotados certamente não detectarão o modo potencial da falha.

O cálculo do Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number* - RPN), segundo LAFRAIA (2001 p.113) é efetuado pela seguinte expressão:

$$RPN = PSF \times PPOF \times PPDF$$

sendo:

PSF o peso que representa a severidade do efeito da falha sobre o sistema;

PPOF o peso que representa a probabilidade de ocorrência da falha e;

PPDF o peso que representa a probabilidade de detecção da falha antes do sistema ser afetado.

Com este índice pode-se criar uma lista hierarquizada de criticidade dos componentes, isto é, podem ser estabelecidas prioridades para atuação das medidas corretivas nos modos de falha.

2. PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA CRITICIDADE

Este procedimento visa subsidiar a análise sobre a contribuição de componentes, de certo sistema, quanto ao seu funcionamento. Ele baseia-se no conhecimento técnico das partes que compõem o sistema, bem como na implicação das falhas dessas partes no seu funcionamento global. Para facilitar a visualização e análise das partes que compõem o sistema será adotada a técnica de diagramação hierarquizada.

Foram consideradas as propostas da FMECA em relação a caracterização de três propriedades de cada parte do sistema: severidade dos efeitos da falha e probabilidades de ocorrência e de detecção da mesma. Essas propriedades irão compor o Índice de Risco, que será utilizado para valorar a criticidade das partes.

Após a aplicação do procedimento, o resultado será uma lista hierarquizada pelo índice de risco, indicando as partes mais críticas do sistema e, portanto, que devem ser priorizadas para intervenção.

2.1. FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO

O procedimento proposto está representado de forma gráfica pelo fluxograma da FIG. 12 a seguir. Mas adiante estão detalhados os seus passos, mostrando como se obter tal lista hierarquizada.

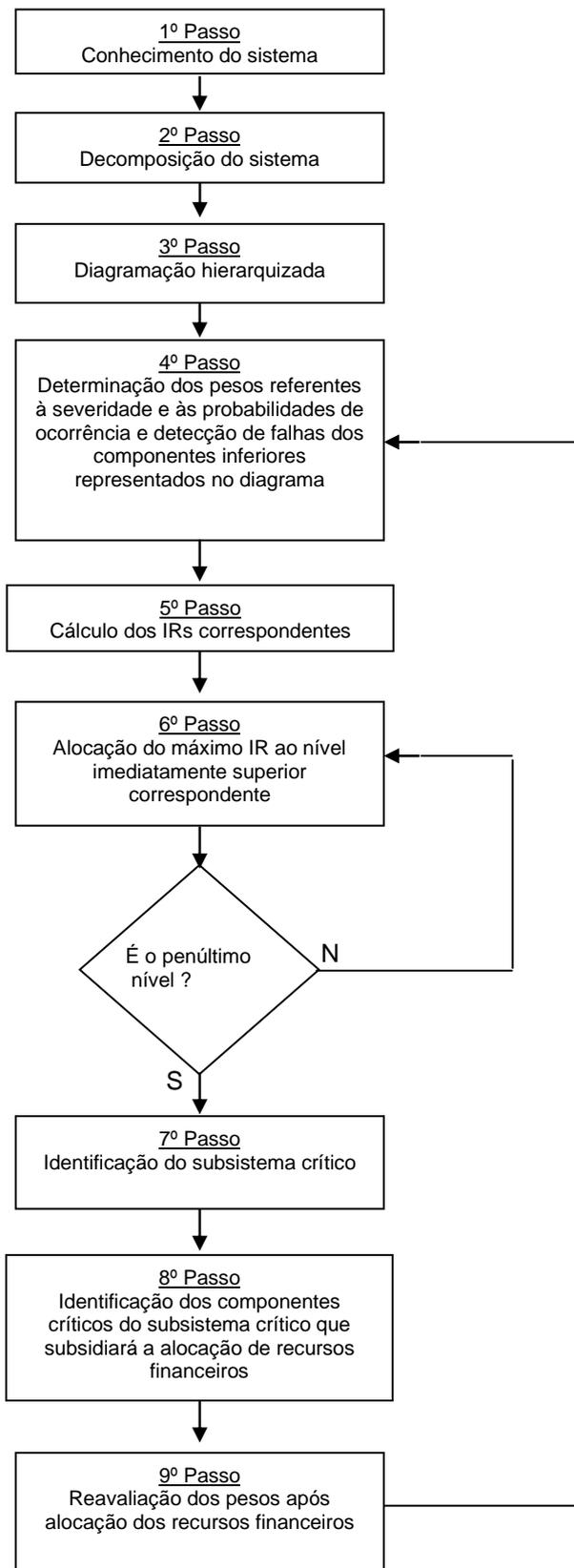


FIG. 12 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO

1º Passo – Conhecimento do sistema

Definição dos objetivos e metas operacionais do sistema sob análise, contemplando suas importâncias ambiental e social.

2º Passo – Decomposição do sistema

Decomposição do sistema e definição de cada um dos seus subsistemas e respectivos componentes, com suas características técnicas e operacionais. Caracterização das possíveis falhas, suas consequências ou severidades e probabilidades de ocorrência e detecção das mesmas.

As severidades das falhas e as probabilidades de ocorrência e de detecção das mesmas são classificadas conforme proposto nas TAB. 1, 2 e 3 a seguir.

TAB.1 CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE DOS EFEITOS DAS FALHAS

Classificação	Severidade
Nenhuma	A falha não tem efeito real no sistema não afetando o usuário
Leve	A falha causa leves transtornos ao cliente não afetando o nível de serviço do sistema
Baixa	A falha causa pequenos transtornos ao cliente afetando pouco o nível de serviço do sistema
Moderada	A falha causa relevantes transtornos ao cliente afetando o nível de serviço do sistema
Média	A falha causa relevantes transtornos ao cliente deixando-o desconfortável, degradando o nível de serviço do sistema
Média/Alta	A falha causa irritação ao cliente deteriorando sensivelmente o nível de serviço
Alta	A falha causa alto grau de insatisfação ao cliente devido ao nível de deterioração do nível de serviço. Não envolve riscos à segurança dos usuários nem descumprimento dos requisitos legais
Muito Alta	A falha envolve alto risco à segurança dos equipamentos e leve risco à segurança dos usuários, não causando descumprimento de requisitos legais
Altíssima	A falha envolve alto risco à segurança operacional e dos usuários causando descumprimento legal de requisitos legais.
Grave	A falha promove acidente com graves proporções.

TAB. 2 CLASSIFICAÇÃO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DAS FALHAS

Classificação da Probabilidade de Ocorrência		Taxa de Falhas
Remota	A falha é improvável	<1 falha em 10 ⁶ horas
Baixa	Poucas falhas	1 falha entre 10 ⁶ e 20.000 horas
		1 falha entre 20.000 e 4.000 horas
Moderada	Falhas ocasionais	1 falha entre 4.000 e 1.000 horas
		1 falha entre 1.000 e 400 horas
		1 falha entre 400 e 80 horas
Alta	Falhas repetitivas	1 falha entre 80 e 40 horas
		1 falha entre 40 e 20 horas
Muito Alta	Falhas quase inevitáveis	1 falha entre 20 e 8 horas
		1 falha entre 8 e 2 horas

TAB. 3 CLASSIFICAÇÃO DA PROBABILIDADE DE DETECTAR AS FALHAS

Classificação da Probabilidade de Detecção	
Muito Alta	A falha é detectada durante o projeto, fabricação, montagem ou na operação
Alta	A falha é detectada durante a fabricação, montagem ou na operação
Média/Alta	A falha é detectada pela montagem ou pelos processos de controle na operação
Moderada	A falha é detectada pelos processos de controle na operação
Média	Existe 50% de chance da falha ser detectada na operação
Média/Baixa	Há possibilidade de detecção da falha pelos processos de controle na operação
Baixa	Há alguma possibilidade de detecção da falha pelos processos de controle operacionais
Muito Baixa	É improvável a detecção da falha pelos processos de controle na operação
Baixíssima	Os sistemas de controle na operação não estão apropriados para detecção da falha
Não detectável	A falha não será detectada com certeza

3º Passo – Diagramação hierarquizada

Elaboração de um diagrama hierarquizado que possibilite estabelecer o relacionamento gráfico entre as partes que compõem o sistema, facilitando a visualização dos subsistemas e seus componentes.

A FIG. 13 a seguir apresenta um exemplo de representação gráfica hierarquizada de um sistema com três subsistemas e seus componentes.

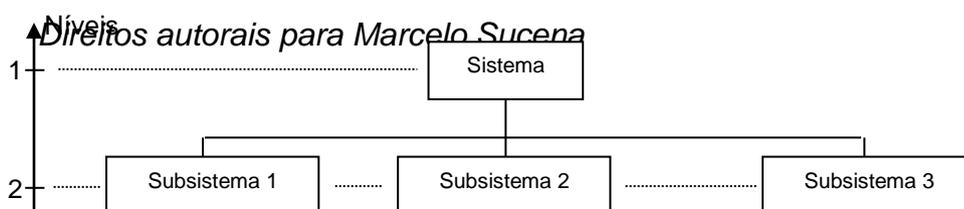


FIG.13 EXEMPLO DE ESTRUTURA GRÁFICA HIERARQUIZADA

Neste diagrama, ficam definidos quatro níveis: nível superior ou 1º nível correspondente ao sistema propriamente dito, o 2º nível corresponde a três subsistemas, o 3º nível corresponde às áreas dos subsistemas e o 4º nível corresponde às subáreas do 3º subsistema.

Também ficam definidos três ramos que correspondem a cada subsistema e seus componentes, cada um desses representados graficamente por retângulos.

4º Passo – Determinação dos pesos

A determinação dos pesos referentes às classificações efetuadas no 2º passo relativas à severidade das falhas e as probabilidades de ocorrência e detecção das mesmas, deve começar pelo ramo que apresenta maior número de níveis.

No caso do diagrama da FIG. 7 deve-se começar pelos componentes denominados subáreas (3.1.1, 3.1.2 e 3.2.1 a 3.2.3) do nível 4 do ramo 3. Os pesos a serem alocados são os propostos nas TAB. 4, 5 e 6, respectivamente.

TAB.4 PESOS QUE REPRESENTAM A SEVERIDADE DOS EFEITOS DAS FALHAS

Classificação	Pesos
Nenhuma	1
Leve	2
Baixa	3
Moderada	4
Média	5
Média/Alta	6
Alta	7
Muito Alta	8
Altíssima	9
Grave	10

TAB.5 PESOS QUE REPRESENTAM A PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DAS FALHAS

Classificação	Taxa de Falhas	Pesos
Remota	<1 falha em 10 ⁶ horas	1
Baixa	1 falha entre 10 ⁶ e 20.000 horas	2
	1 falha entre 20.000 e 4.000 horas	3
Moderada	1 falha entre 4.000 e 1.000 horas	4
	1 falha entre 1.000 e 400 horas	5
	1 falha entre 400 e 80 horas	6
Alta	1 falha entre 80 e 40 horas	7
	1 falha entre 40 e 20 horas	8
Muito Alta	1 falha entre 20 e 8 horas	9
	1 falha entre 8 e 2 horas	10

TAB.6 PESOS QUE REPRESENTAM A PROBABILIDADE DE DETECTAR AS FALHAS

Classificação	Pesos
Muito Alta	1
Alta	2
Média/Alta	3
Moderada	4
Média	5
Média/Baixa	6
Baixa	7
Muito Baixa	8
Baixíssima	9
Não detectável	10

Para a determinação desses pesos, podem ser utilizadas metodologias como a Ad Hoc e a Delphi.

A metodologia Ad Hoc, chamada também de espontânea ou reunião de especialistas, consiste em reunir técnicos das áreas com o objetivo de indicar o peso a ser alocado a um determinado quesito baseado na experiência individual. BRANDÃO (1996, p.62) e ECOM (2002).

O método Delphi, também conhecido como técnica Delfos, criado na década de 50 nos Estados Unidos da América, consiste em fazer consulta a diversos especialistas, sem deslocá-los do local de trabalho e sem promover reuniões. As informações obtidas são resumidas e enviadas novamente aos especialistas para nova avaliação, objetivando um resultado mais homogêneo. BRANDÃO (1996, p.63) e ECOM (2002)

Quando o sistema encontra-se em operação há algum tempo, os pesos das probabilidades de ocorrência e de detecção das falhas podem ser determinados avaliando-se os dados estatísticos disponíveis.

Tomando-se o exemplo exposto na FIG. 13, arbitraram-se os pesos que representam a severidade e as probabilidades de ocorrência e de detecção das falhas para as subáreas do 4º nível do 3º ramo conforme TAB. 7 a seguir.

TAB. 7 EXEMPLOS DOS PESOS ALOCADOS NAS SUBÁREAS DO 4º NÍVEL DO 3º RAMO REPRESENTADOS NA FIG.13

Nível 2	Nível 3	Nível 4	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	PSF	PPOF	PPDF
X			SUBSISTEMA 3			
	X		ÁREA 3.1			
		X	SUBÁREA 3.1.1	10	3	1
		X	SUBÁREA 3.1.2	6	2	1
	X		ÁREA 3.2			
		X	SUBÁREA 3.2.1	5	2	2
		X	SUBÁREA 3.2.2	10	2	2
		X	SUBÁREA 3.2.3	3	8	4

Onde PSF, PPOF, PPDF são pesos que representam a severidade da falha no sistema, a probabilidade de ocorrência e de detecção da falha.

5º Passo – Cálculo do índice de risco

Calcular, para cada componente, o índice de risco (*IR*) proposto pelo FMECA, dado por:

$$IR = PSF \times PPOF \times PPDF$$

sendo:

PSF o peso que representa a severidade do efeito da falha sobre o sistema;

PPOF o peso que representa a probabilidade de ocorrência da falha e

PPDF o peso que representa a probabilidade de detecção da falha antes do sistema ser afetado.

De acordo com os pesos exemplificados e expostos na TAB. 7, pode-se calcular o IR. Esses valores estão demonstrados na TAB. 8.

TAB. 8 ÍNDICES DE RISCO CALCULADOS PARA AS SUBÁREAS DO 4º NÍVEL DO 3º RAMO REPRESENTADOS NA FIG.7

Nível 2	Nível 3	Nível 4	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	PSF	PPOF	PPDF	IR
X			SUBSISTEMA 3				
	X		ÁREA 3.1				
		X	SUBÁREA 3.1.1	10	3	1	30
		X	SUBÁREA 3.1.2	6	2	1	12
	X		ÁREA 3.2				
		X	SUBÁREA 3.2.1	5	2	2	20
		X	SUBÁREA 3.2.2	10	2	2	40
		X	SUBÁREA 3.2.3	3	8	4	96

6º Passo – Alocação do máximo IR no nível imediatamente superior correspondente

Dentre os componentes avaliados, identifica-se o maior valor do IR e aloca-se o mesmo no componente do nível imediatamente superior correspondente.

Tomando-se os índices de risco calculados para as subáreas do exemplo da FIG. 13, aloca-se o máximo IR no nível imediatamente superior, conforme exposto a seguir: nas subáreas 3.1.1 e 3.1.2 os índices de risco calculados são 30 e 12, respectivamente. O máximo IR entre estas subáreas é 30, alocando-o na área 3.1. A mesma análise será adotada para a área 3.2 que receberá o índice de risco igual a 96.

Com os índices de risco determinados para as áreas 3.1 e 3.2, pode-se avaliar o máximo IR entre elas e alocar este valor no componente imediatamente superior, ou seja, subsistema 3. Estes valores estão expostos na TAB. 9.

TAB. 9 ÍNDICE DE RISCO ALOCADO NO NÍVEL IMEDIATAMENTE SUPERIOR

Engenharia de Produção
GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

Nível 2	Nível 3	Nível 4	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	PSF	PPOF	PPDF	IR
X			SUBSISTEMA 3				96
	X		ÁREA 3.1				30
		X	SUBÁREA 3.1.1	10	3	1	30
		X	SUBÁREA 3.1.2	6	2	1	12
	X		ÁREA 3.2				96
		X	SUBÁREA 3.2.1	5	2	2	20
		X	SUBÁREA 3.2.2	10	2	2	40
		X	SUBÁREA 3.2.3	3	8	4	96

Deve-se repetir este passo em todos os ramos até chegar ao penúltimo nível ou nível dos subsistemas.

No exemplo em questão, deve-se ainda avaliar o máximo IR entre as áreas do 3º nível para os ramos 1 e 2, individualmente, até chegar aos valores dos índices de risco dos subsistemas 1 e 2.

7º Passo – Identificação do subsistema crítico

Utilizando-se os valores dos índices de risco calculados e alocados nos subsistemas localizados no penúltimo nível do diagrama hierarquizado, destaca-se o maior IR, identificando-se o subsistema mais crítico que deverá ser então o foco de atenção para alocação dos recursos financeiros.

8º Passo – Identificação dos componentes críticos do subsistema crítico

Com o subsistema crítico identificado e com os índices de risco alocados em todos os componentes dos níveis, gera-se uma lista hierarquizada pelo índice de risco, que será utilizada pelo gestor dos recursos financeiros para identificar o(s) ponto(s) nevrálgico(s) do sistema, subsidiando à alocação dos recursos.

Em relação ao exemplo exposto na FIG.13, considerando que após a análise dos índices de risco do 2º nível efetuada no 7º passo, o subsistema 3 teve o maior valor, chega-se a lista hierarquizada dos componentes deste ramo conforme a TAB. 10 a

seguir. Entre esses componentes destaca-se que o denominado “subárea 3.2.3” apresenta maior índice de risco e portanto é o mais crítico do subsistema 3

TAB. 10 LISTA HIERARQUIZADA DO SUBSISTEMA CRÍTICO (SUBSISTEMA 3)

DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	IR
SUBÁREA 3.2.3	96
SUBÁREA 3.2.2	40
SUBÁREA 3.1.1	30
SUBÁREA 3.2.1	20
SUBÁREA 3.1.2	12

9º Passo – Reavaliação após alocação dos recursos financeiros

Alocando recursos aos componentes críticos, o correspondente IR será diminuído, podendo por repetição do procedimento, encontrar novos componentes a serem priorizados pela manutenção.

2.2. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

Com a finalidade de mostrar a aplicabilidade do procedimento proposto desenvolveu-se um estudo de caso em um sistema de Transporte Urbano Sobre Trilhos (TUST) genérico (FIG.14). Considera-se, nesta aplicação, que os passos 1 e 2 do procedimento já foram efetuados. Os diagramas hierarquizados, objeto do 3º passo estão expostos a seguir.

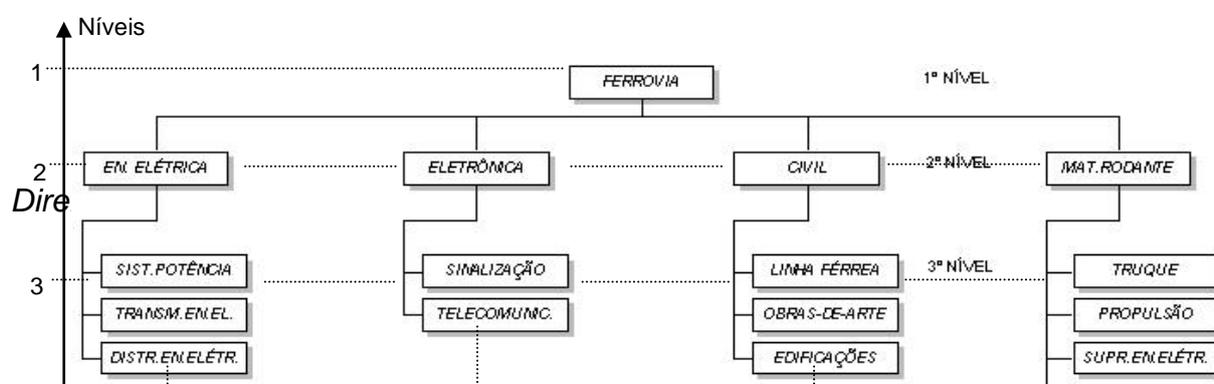


FIG.14 ESTRUTURA GRÁFICA HIERARQUIZADA DO TUST

As figuras FIG.15 a 23 detalharão o 3º nível dos quatro ramos representados na anterior.

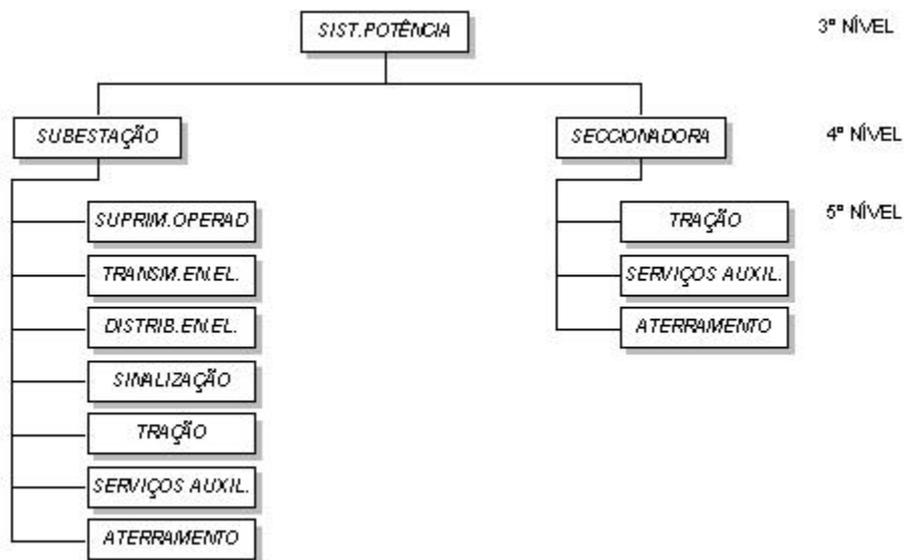


FIG.15 DIAGRAMA DA ÁREA SISTEMA DE POTÊNCIA – 1º RAMO

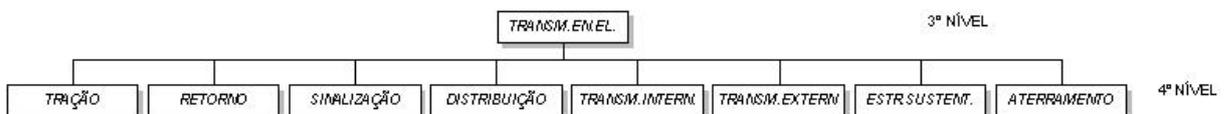


FIG.16 DIAGRAMA DA ÁREA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - 1º RAMO

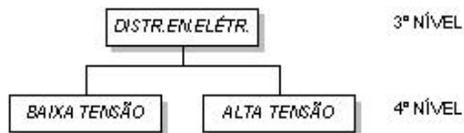


FIG.17 DIAGRAMA DA ÁREA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - 1º

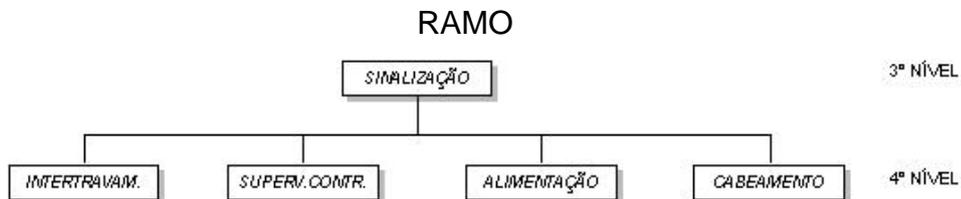


FIG.18 DIAGRAMA DA ÁREA SINALIZAÇÃO – 2º RAMO



FIG.19 DIAGRAMA ÁREA TELECOMUNICAÇÕES – 2º RAMO

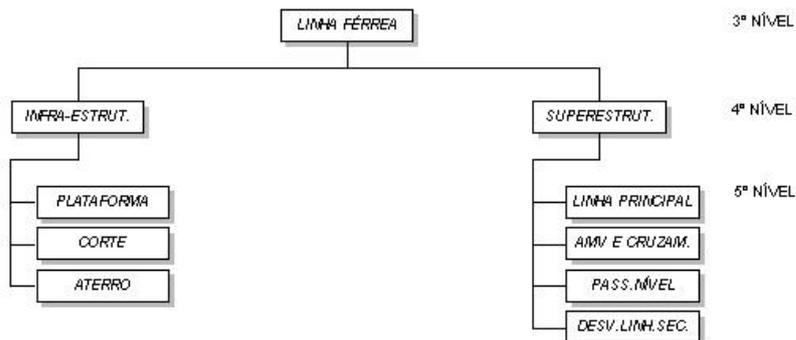


FIG.20 DIAGRAMA DA ÁREA LINHA FÉRREA – 3º RAMO

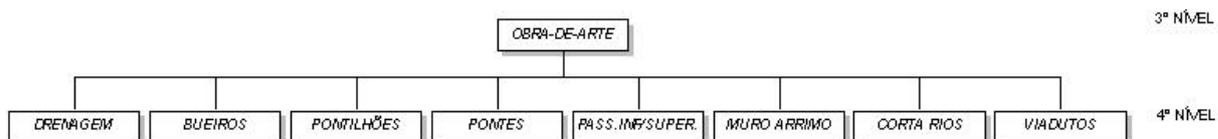


FIG.21 DIAGRAMA DA ÁREA OBRAS-DE-ARTE – 3º RAMO

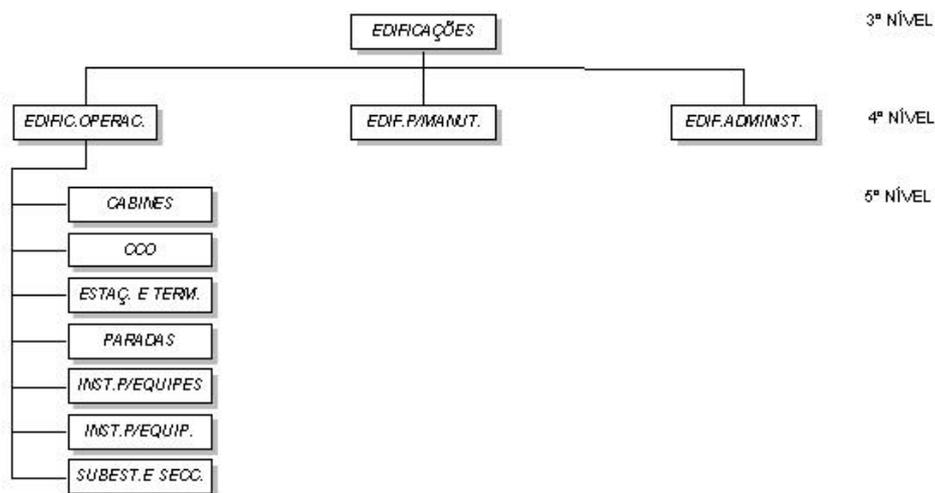


FIG.22 DIAGRAMA DA ÁREA EDIFICAÇÕES – 3º RAMO

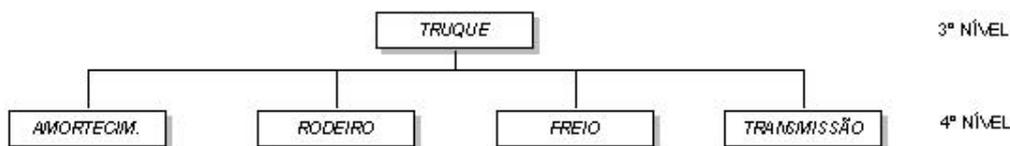


FIG.23 DIAGRAMA DA ÁREA TRUQUE – 4º RAMO

O 4º passo do procedimento inicia-se pela análise do diagrama hierarquizado identificando o ramo com maior número de níveis. Observando o diagrama da FIG, 9 verifica-se que os componentes de partida para a alocação dos pesos que representam a severidade das falhas e as probabilidades de ocorrência e de detecção das mesmas, localizam-se no nível 5 do 3º ramo (FIG.16). Estes componentes denominam-se Setores Cabines, Centro de Controle Operacional, Estações e Terminais, Paradas, Instalações para Equipes, Instalações para Equipamentos e Subestações e Seccionadoras ligados a Subárea Edificações Operacionais.

Utilizando-se o método *Ad Hoc*, os técnicos consultados determinaram os pesos correspondentes à severidade das falhas e as probabilidades de ocorrência e de detecção das mesmas, na subárea edificações operacionais, conforme exposto na TAB. 11.

TAB. 11 RESULTADO DA ALOCAÇÃO DE PESOS NOS SETORES DA SUBÁREA EDIFICAÇÕES OPERACIONAIS (5º NÍVEL DO 3º RAMO)

Código	Nível 4	Nível 5	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	PSF	PPOF	PPDF
SA	X		EDIFICAÇÕES OPERACIONAIS			
SE		X	CABINES	4	1	1
SE		X	CENTRO DE CONTROLE OPERACIONAL	8	1	1
SE		X	ESTAÇÕES E TERMINAIS	2	1	1
SE		X	PARADAS	2	1	1
SE		X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPES	1	1	1
SE		X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPAMENTOS	3	1	1
SE		X	SUBESTAÇÕES E SECCIONADORAS	8	1	1

Onde SA e SE são subárea e setor, respectivamente.

De posse desses pesos, os índices de risco dos componentes foram calculados conforme o 5º passo do procedimento. Esses valores estão representados na TAB.12 a seguir.

TAB.12 CÁLCULOS DOS ÍNDICES DE RISCO

Código	Nível 4	Nível 5	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	PSF	PPOF	PPDF	IR
SA	X		EDIFICAÇÕES OPERACIONAIS				
SE		X	CABINES	4	1	1	4
SE		X	CENTRO DE CONTROLE OPERACIONAL	8	1	1	8
SE		X	ESTAÇÕES E TERMINAIS	2	1	1	2
SE		X	PARADAS	2	1	1	2
SE		X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPES	1	1	1	1
SE		X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPAMENTOS	3	1	1	3
SE		X	SUBESTAÇÕES E SECCIONADORAS	8	1	1	8

No 6º passo deve-se avaliar os índices de risco entre os setores sob análise, destacando-se o maior, alocando-o no componente imediatamente superior. O máximo valor de IR avaliado foi 8, alocando esse valor em Edificações Operacionais, conforme demonstrado na TAB. 13.

TAB.13 MÁXIMO ÍNDICE DE RISCO ALOCADO NO NÍVEL IMEDIATAMENTE SUPERIOR

Código	Nível 4	Nível 5	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	PSF	PPOF	PPDF	IR
AS	X		EDIFICAÇÕES OPERACIONAIS				8
SE		X	CABINES	4	1	1	4
SE		X	CENTRO DE CONTROLE OPERACIONAL	8	1	1	8
SE		X	ESTAÇÕES E TERMINAIS	2	1	1	2
SE		X	PARADAS	2	1	1	2
SE		X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPES	1	1	1	1
SE		X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPAMENTOS	3	1	1	3
SE		X	SUBESTAÇÕES E SECCIONADORAS	8	1	1	8

Repetindo o 6º passo do procedimento até chegar ao penúltimo nível, ou seja, nível dos subsistemas, obtiveram-se os índices de risco para cada um dos componentes do nível imediatamente superior.

O resumo de todos os componentes do sistema de TUST representados nos diagramas das figuras 8 a 17, os pesos alocados nos componentes do último nível de cada ramo e os índices de risco calculados e alocados nos níveis imediatamente superiores, além dos códigos, descrição e localização dos componentes no nível do diagrama hierárquico, estão representados na TAB.14 a seguir.

TAB. 14 REPRESENTAÇÃO TABULAR DOS NÍVEIS HIERÁRQUICOS

Código	N2	N3	N4	N5	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	PSF	POPF	PPDF	IR
SS	X				ENERGIA ELÉTRICA (RAMO 1)				400
A		X			SISTEMA DE POTÊNCIA				50
SA			X		SUBESTAÇÕES				50
SE				X	SUPRIMENTO DA OPERADORA	8	2	1	16
SE				X	TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	10	2	1	20
SE				X	DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	5	2	1	10
SE				X	SINALIZAÇÃO	10	2	1	20
SE				X	TRAÇÃO	10	5	1	50
SE				X	SERVIÇOS AUXILIARES	1	3	1	3
SE				X	ATERRAMENTO	5	1	2	10
SA			X		SECCIONADORAS				20
SE				X	TRAÇÃO	10	2	1	20
SE				X	SERVIÇOS AUXILIARES	1	3	1	3
SE				X	ATERRAMENTO	5	1	2	10
A		X			TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA				400
SA			X		TRAÇÃO	10	8	5	400
SA			X		RETORNO	4	3	8	96
SA			X		SINALIZAÇÃO	8	3	5	120
SA			X		DISTRIBUIÇÃO	3	3	5	45
SA			X		TRANSMISSÃO INTERNA	3	3	5	45
SA			X		TRANSMISSÃO EXTERNA	3	3	5	45
SA			X		ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO	10	1	8	80
SA			X		ATERRAMENTO	1	3	8	24
A		X			DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA				30
SA			X		BAIXA TENSÃO ELÉTRICA	1	10	3	30
SA			X		ALTA TENSÃO ELÉTRICA	5	2	2	20
SS	X				ELETRÔNICA (RAMO 2)				27
A		X			SINALIZAÇÃO				24
SA			X		INTERTRAVAMENTO	8	1	1	8
SA			X		SUPERVISÃO E CONTROLE	8	1	1	8
SA			X		ALIMENTAÇÃO	8	2	1	16

Engenharia de Produção
GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

SA			X		CABEAMENTO	8	3	1	24
A		X			TELECOMUNICAÇÕES				27
SA			X		TELEFONIA	4	2	3	24
SA			X		RÁDIO-COMUNICAÇÃO	4	2	3	24
SA			X		MEIO FÍSICO DE TRANSMISSÃO DE INFORMAÇÃO	10	3	1	27
SA			X		MULTIPLEX	9	2	1	18
SA			X		SONORIZAÇÃO	2	4	3	24
SA			X		BILHETAGEM AUTOMÁTICA	2	3	1	6
SA			X		CRONOMETRIA	2	3	3	18
SA			X		PAINÉL INFORMATIVO	2	4	3	24
SS	X				CIVIL (RAMO 3)				336
A		X			LINHA FÉRREA				336
SA			X		INFRAESTRUTURA				5
SE				X	PLATAFORMA	2	1	1	2
SE				X	CORTE	5	1	1	5
SE				X	ATERRO	1	1	1	1
SA			X		SUPERESTRUTURA				336
SE				X	LINHA PRINCIPAL	7	8	6	336
SE				X	APARELHO DE MUDANÇA DE VIA E CRUZAMENTO	7	8	6	336
SE				X	PASSAGEM DE NÍVEL	4	6	6	144
SE				X	DESVIOS E LINHAS SECUNDÁRIAS	2	6	5	60
A		X			OBRAS-DE-ARTE				84
SA			X		DRENAGEM	5	3	4	60
SA			X		BUEIROS	7	3	4	84
SA			X		PONTILHÕES	7	3	4	84
SA			X		PONTES	7	3	4	84
SA			X		PASSAGENS INFERIORES E SUPERIORES	2	2	3	12
SA			X		MURO DE ARRIMO	2	1	3	6
SA			X		CORTA RIOS	7	1	4	28
SA			X		VIADUTOS	7	3	4	84
A		X			EDIFICAÇÕES				8
SA			X		EDIFICAÇÕES OPERACIONAIS				8
SE				X	CABINES	4	1	1	4
SE				X	CENTRO CONTR. OPERACIONAL	8	1	1	8
SE				X	ESTAÇÕES E TERMINAIS	2	1	1	2

Engenharia de Produção
GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

SE				X	PARADAS	2	1	1	2
SE				X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPES	1	1	1	1
SE				X	INSTALAÇÕES PARA EQUIPAMENTOS	3	1	1	3
SE				X	SUBESTAÇÕES SECCIONADORAS	8	1	1	8
SA			X		EDIFICAÇÕES PARA MANUTENÇÃO	1	1	1	1
SA			X		EDIFICAÇÕES ADMINISTRATIVAS	1	1	1	1
SS	X				MATERIAL RODANTE (RAMO 4)				630
A		X			TRUQUE				270
SA			X		AMORTECIMENTO	5	3	1	15
SA			X		RODEIRO	8	3	3	72
SA			X		FREIO	9	6	5	270
SA			X		TRANSMISSÃO	7	1	1	7
A		X			PROPULSÃO	10	7	9	630
A		X			SUPRIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	10	7	7	490
A		X			SUPRIMENTO TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO	9	6	6	324
A		X			FRENAGEM	10	7	9	630
A		X			SINALIZAÇÃO	7	6	5	210
A		X			CLIMATIZAÇÃO	5	7	6	210
A		X			CONTROLE AUTOMÁTICO DO TREM	6	3	8	144
A		X			CAIXA	2	2	2	8
A		X			ENGATES	8	2	5	80
A		X			RÁDIO SONORIZAÇÃO	9	4	10	360
A		X			PORTAS DO SALÃO	6	9	8	432

Onde o código identifica se o descrito é um subsistema (SS), área (A), subárea (SA) ou um setor (SE), Ni, i = 2..5, representa o nível descrito no diagrama hierarquizado, PSF, PPOF, PPDF são pesos que representam a severidade da falha no sistema, a probabilidade de ocorrência e de detecção da falha, respectivamente e IR representa o índice de risco correspondente.

Baseando-se nos dados obtidos, determinaram-se, para os subsistemas, os índices de risco expostos na TAB. 15.

TAB. 15 ÍNDICES DE RISCO DOS SUBSISTEMAS

DESCRIÇÃO DOS SUBSISTEMAS	IR
ENERGIA ELÉTRICA	400
ELETRÔNICA	27
CIVIL	336
MATERIAL RODANTE	630

No 7º passo do procedimento deve-se destacar o máximo IR entre os subsistemas. Tomando-se os dados da TAB. 15, nota-se que o subsistema que apresenta maior índice de risco é o Material Rodante, caracterizando-o como o mais crítico, devendo ser atendido prioritariamente em termos de manutenção com a alocação de recursos financeiros necessários.

No 8º passo deve-se gerar uma lista hierarquizada pelo índice de risco de todos os componentes que compõem o subsistema crítico. Os componentes do subsistema Material Rodante bem como os seus componentes com os índices de risco estão representados na TAB. 16.

TAB. 16 LISTA HIERARQUIZADA PELO ÍNDICE DE RISCO DOS COMPONENTES DO SUBSISTEMA MATERIAL RODANTE (4º RAMO)

DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	IR
PROPULSÃO	630
FRENAGEM	630
SUPRIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	490
PORTAS DO SALÃO	432
RÁDIO SONORIZAÇÃO	360
SUPRIMENTO E TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO	324
FREIO	270
SINALIZAÇÃO	210
CLIMATIZAÇÃO	210
CONTROLE AUTOMÁTICO DO TREM	144
ENGATES	80
RODEIRO	72
AMORTECIMENTO	15
CAIXA	8
TRANSMISSÃO	7

Engenharia de Produção

GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

Avaliando-se os dados da TAB. 16, destacam-se os dois primeiros componentes da lista hierarquizada. Os componentes Propulsão e Frenagem apresentam os maiores índices de risco, qualificando-os como os mais críticos do subsistema Material Rodante. Sendo assim, o gestor dos recursos financeiros os destacará como prioritários para a manutenção. Caso essa possa ser realizada, os índices de risco destes componentes serão reduzidos.

A seguir, serão apresentadas as TAB. 17 a 19 com as listas hierarquizadas dos demais subsistemas, em ordem decrescente de índice de risco.

TAB. 17 LISTA HIERARQUIZADA PELO ÍNDICE DE RISCO DOS COMPONENTES DO SUBSISTEMA ENERGIA ELÉTRICA (1º RAMO)

DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	IR
TRAÇÃO (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	400
SINALIZAÇÃO (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	120
RETORNO (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	96
ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	80
TRAÇÃO (SUBESTAÇÃO)	50
DISTRIBUIÇÃO (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	45
TRANSMISSÃO INTERNA (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	45
TRANSMISSÃO EXTERNA (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	45
BAIXA TENSÃO ELÉTRICA (DISTR. ENERG. ELÉTRICA)	30
ATERRAMENTO (TRANSM.ENERG.ELÉTRICA)	24
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SUBESTAÇÃO)	20
SINALIZAÇÃO (SUBESTAÇÃO)	20
TRAÇÃO (SECCIONADORA)	20
ALTA TENSÃO ELÉTRICA (DISTR. ENERG. ELÉTRICA)	20
SUPRIMENTO DA OPERADORA (SUBESTAÇÃO)	16
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SUBESTAÇÃO)	10
ATERRAMENTO (SUBESTAÇÃO)	10
ATERRAMENTO (SECCIONADORA)	10
SERVIÇOS AUXILIARES (SUBESTAÇÃO)	3
SERVIÇOS AUXILIARES (SECCIONADORA)	3

TAB. 18 LISTA HIERARQUIZADA PELO ÍNDICE DE RISCO DOS COMPONENTES DO SUBSISTEMA CIVIL (3º RAMO)

DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	IR
LINHA PRINCIPAL	336
APARELHO DE MUDANÇA DE VIA E CRUZAMENTO	336
PASSAGEM DE NÍVEL	144
BUEIROS	84
PONTILHÕES	84
PONTES	84
VIADUTOS	84
DESVIOS E LINHAS SECUNDÁRIAS	60
DRENAGEM	60
CORTA RIOS	28
PASSAGENS INFERIORES E SUPERIORES	12
CENTRO CONTR. OPERACIONAL	8
SUBESTAÇÕES E SECCIONADORAS	8
MURO DE ARRIMO	6
CORTE	5
CABINES	4
INSTALAÇÕES PARA EQUIPAMENTOS	3
PLATAFORMA	2
ESTAÇÕES E TERMINAIS	2
PARADAS	2
ATERRO	1
INSTALAÇÕES PARA EQUIPES	1
EDIFICAÇÕES PARA MANUTENÇÃO	1
EDIFICAÇÕES ADMINISTRATIVAS	1

TAB. 19 LISTA HIERARQUIZADA PELO ÍNDICE DE RISCO DOS COMPONENTES DO SUBSISTEMA ELETRÔNICA (2º RAMO)

DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	IR
MEIO FÍSICO DE TRANSMISSÃO DE INFORMAÇÃO	27
CABEAMENTO	24
TELEFONIA	24
RÁDIO-COMUNICAÇÃO	24
SONORIZAÇÃO	24
PAINÉL INFORMATIVO	24
MULTIPLEX	18
CRONOMETRIA	18
ALIMENTAÇÃO	16
INTERTRAVAMENTO	8
SUPERVISÃO E CONTROLE	8
BILHETAGEM AUTOMÁTICA	6

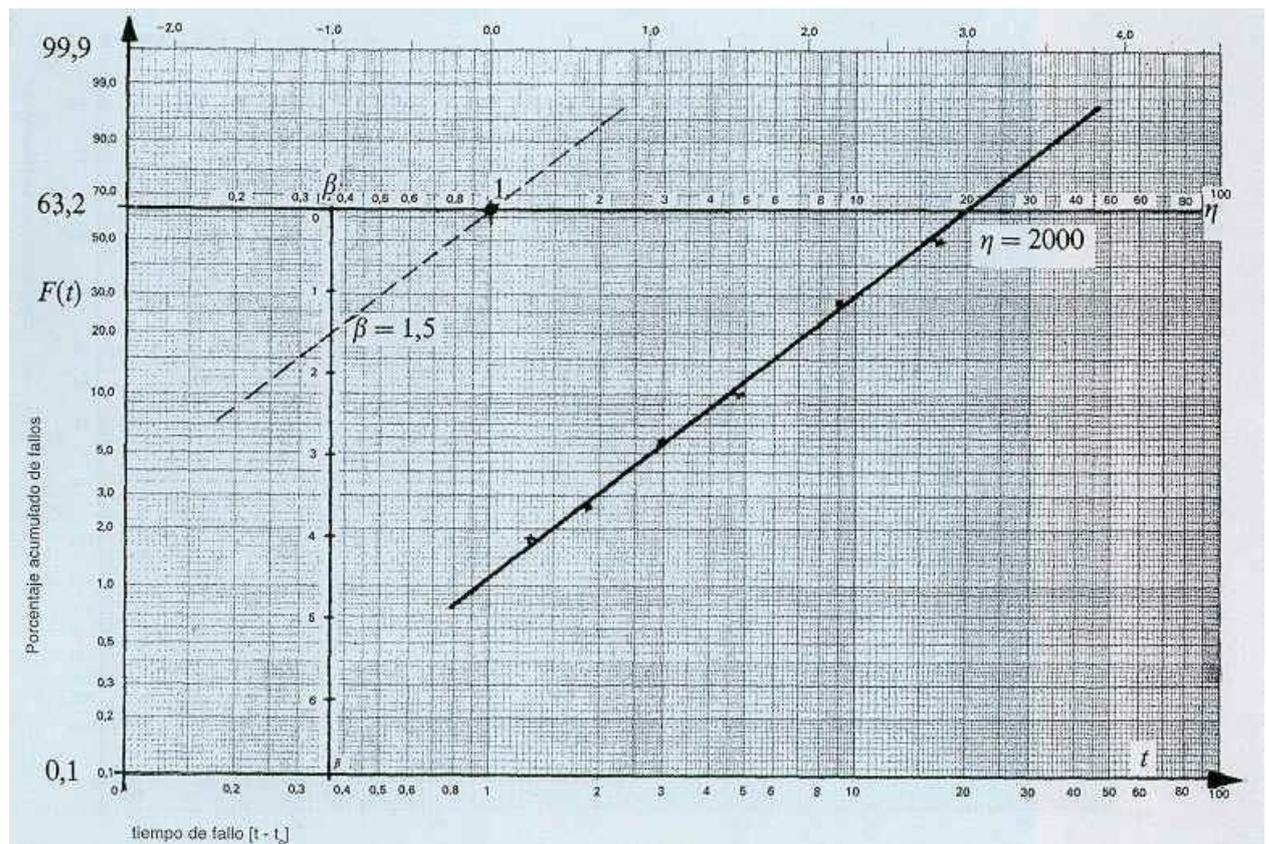
O 9º passo determina que se deve avaliar os índices de risco após a alocação dos recursos financeiros, proporcionando a reavaliação da criticidade dos componentes do sistema.

3. DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Existe ainda outra distribuição de probabilidades muito utilizada na engenharia da manutenção: a distribuição de Weibull. Ela foi proposta originalmente pelo físico Ernest Hjalmar Wallodi Weibull que nasceu em 18 de junho de 1887, na Suécia. Ele publicou vários trabalhos na área de engenharia dos materiais, inclusive estudos sobre resistência de materiais, fadiga e ruptura em sólidos e propriedades de esferas e de rolos.

Esta distribuição de probabilidade que leva seu nome foi estudada a partir de seu artigo *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*, publicado no *Journal of Applied Mechanics*, em 1951, baseando-se nos estudos sobre a resistência de aços.

Antes do advento da informática, a distribuição de Weibull era analisada segundo a folha de Weibull, exposta a seguir.



Uma vantagem da aplicação da distribuição de Weibull em aplicações práticas deve-se ao fato dela apresentar uma grande variedade de formas, todas com uma

Direitos autorais para Marcelo Sucena Página 65 de 96

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta}$$

propriedade básica: a função taxa de falha é monótona. Isto significa que ela pode ser crescente, decrescente ou constante.

A probabilidade de falhar um componente é dada por:

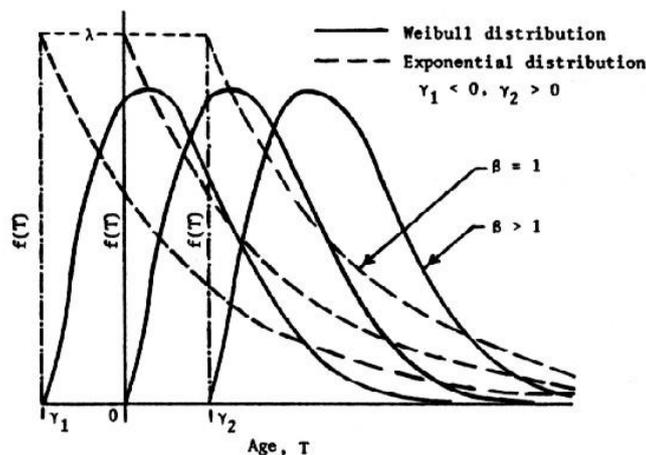
Considerando que $t \geq t_0$ e $\beta > 0$.

A confiabilidade de um componente é dada por: $R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta}$

A taxa de falhas instantânea é expressa por: $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}$

Mas, qual é o significado dos parâmetros t_0 , η e β da Distribuição de Weibull?

- ✓ t_0 - Vida Mínima ou Confiabilidade Intrínseca - tempo de operação no qual o equipamento passa a apresentar falhas, ou seja, intervalo de tempo que o equipamento não apresenta falhas. Em muitos casos típicos de desgaste, transcorre um intervalo de tempo (t_0) significativo até que ocorram as primeiras falhas. Alguns consideram t_0 como γ chamado de “parâmetro de localização”. Este parâmetro não tem influência na curva apenas a desloca ao longo do tempo, entrando na fórmula subtraindo o tempo. A figura a seguir demonstra o deslocamento da curva na abscissa com a variação de γ .

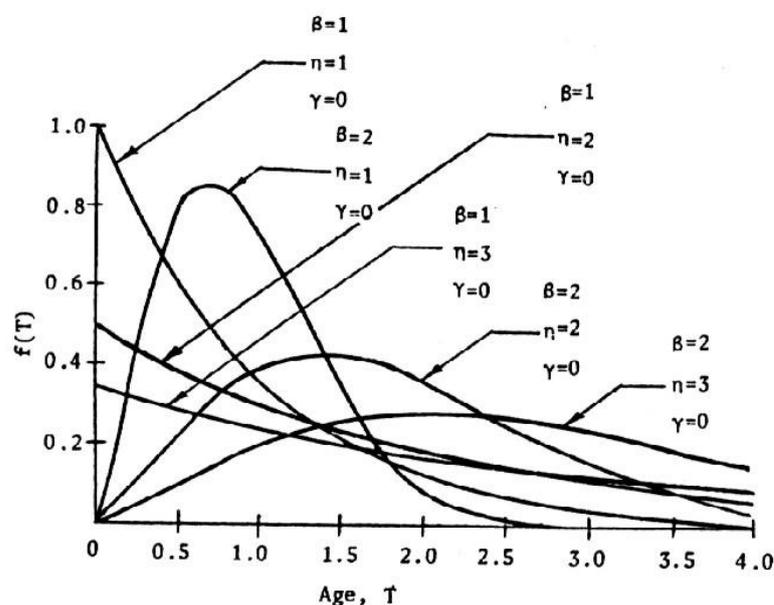


Fonte: Machado Neto, Vicente **Distribuição de Weibull**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Material de Aula de Confiabilidade, 2003.

- ✓ η - Vida Característica ou Parâmetro de Escala
Intervalo de tempo entre t_0 e t no qual ocorrem 63,2% das falhas, restando, portanto, 36,8% de itens sem falhar.

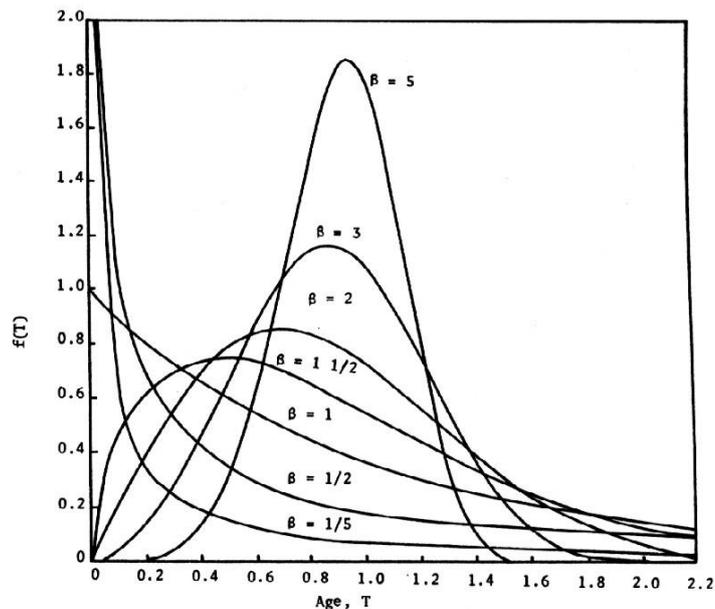
Quando $t - t_0 = \eta$, $R(t) = e^{-1} = 0,368 = 36,8\%$.

Variando-se η tem-se o mesmo efeito na curva que representa a distribuição de probabilidades similar a uma mudança de escala na abscissa. Aumentando-se o η , com β e γ constantes, na curva tem-se o efeito de esticar para fora, com isso o pico da curva diminuirá; com η reduzido, mantendo-se β e γ constantes, a curva que representa a distribuição se estreita, deslocando-se para esquerda aumentando o pico da curva. η tem a mesma unidade que t . Verifique esta variação de η na próxima figura.



Fonte: Machado Neto (2003).

- ✓ β - Fator de Forma (indica a forma da curva e a característica das falhas).
 - $\beta < 1$ - mortalidade infantil
 - $\beta = 1$ - falhas aleatórias (taxa de falhas constante).
 - $\beta > 1$ - falhas por desgaste.



Fonte: Machado Neto (2003).

Para se determinar esses parâmetros e, conseqüentemente, calcular a confiabilidade podem-se utilizar os conceitos de Regressão Linear Simples.

Considerando-se a tabela a seguir, que apresenta os resultados de medidas de tempos para falhar (TPF) de certo equipamento, em dias, calcule os parâmetros da distribuição de Weibull.

48	86	30	39	29	9	23	23	39	6
37	80	50	60	10	72	7	47	29	38
31	24	17	50	64	11	22	6	21	49
48	40	29	15	43	18	34	25	52	18
34	77	31	76	45	37	29	38	32	6

Para se determinar os coeficientes angular e linear da reta de regressão, pode-se seguir o seguinte roteiro:

- 1 – Coletar os dados de TPF (Tempo Para Falhar) do componente – tabela anterior.
- 2 – Calcular a amplitude do ROL (tabela com os dados em ordem crescente ou decrescente: $R = \text{Maior Valor Observado} - \text{Menor Valor Observado}$)

3 – Calcular a quantidade de classes (Regra de Sturges):

$$K = 1 + 3,3 \log N,$$

sendo N a quantidade de observações da amostra.

4 – Calcular a amplitude do intervalo da classe: $h = R / K$

5 – Colocar o número de ordem, sequencial, de cada classe, ou seja, de 1 até K , na primeira coluna de uma tabela.

6 – Colocar em duas colunas da planilha os limites inferior e superior de cada intervalo da classe.

7 – Colocar em uma terceira coluna o valor médio de cada intervalo.

8 – Determinar e colocar em uma quarta coluna a frequência das classes (F_i). F_i é a quantidade de dados que estão contidos na classe.

9 – Calcular e colocar em uma quinta coluna a frequência acumulada (F_a). F_a é a soma de todas as observações inferiores ao limite superior de um dado intervalo de classe.

10 – Calcular e colocar em uma sexta coluna a frequência relativa simples observada (F_{rso}). F_{rso} é a relação entre frequência da classe e a quantidade total de observações: $F_{rso} (\%) = F_i / N$.

11 - Calcular e colocar em uma sétima coluna a frequência relativa acumulada observada (F_{rao}). F_{rao} é a relação entre a frequência absoluta e a quantidade total de observações: $F_{rao} (\%) = F_a / N$. Neste caso, F_{rao} será denominado $F(t)$.

Obs.: Caso algum $F(t)$ seja igual a 1, deve-se fazer $Y = 0$, senão acarretará em erro de cálculo de $Y = \text{Ln} \{ - \text{Ln} [1 - F(t)] \}$

12 – Na oitava coluna calcular os valores de Y baseando-se em $\text{Ln} \{ - \text{Ln} [1 - F(t)] \}$.

13 – Nas próximas colunas, devem-se calcular tantos valores de X quantos forem os valores estipulados de t_0 . Os valores de X são calculados por $\text{Ln} (t - t_0)$. Para cada variável independente X , com a variável dependente Y , deve-se efetuar a regressão linear para determinar os coeficientes de Weibull conforme o que segue:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \implies \text{Ln} \{ - \text{Ln} [1 - F(t)] \} = \beta \cdot \text{Ln} (t) - \beta \cdot \text{Ln} (\eta)$$

$$Y = a + bX$$

$$\eta = e^{-\frac{b}{\beta}}$$

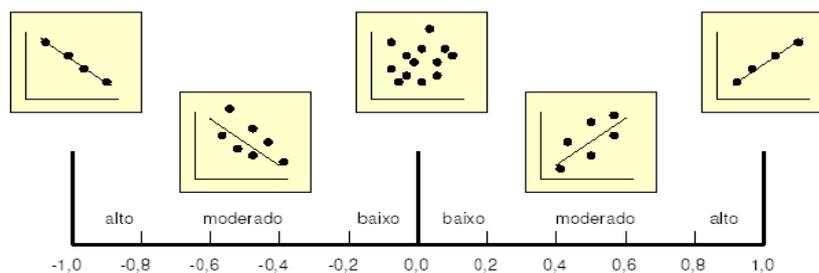
Observações

- Os coeficientes da reta de regressão (angular e linear) são:

$$a = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum X^2 - n\bar{X}^2} \qquad b = \bar{Y} - a\bar{X}$$

- O maior valor de t₀ deve ser menor que o menor TPF, pois Ln (t - t₀) retornaria erro caso t = t₀.
- Para cada t₀ e, conseqüentemente, para cada X, devem-se calcular os Coeficientes de Correlação de Pearson (r) de cada regressão. O maior r será aquele que fornecerá os parâmetros **β** e **η** da distribuição de Weibull.
- O Coeficiente de Correlação de Pearson (r) varia de -1 a 1 e é calculado por:

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$



Exemplo até o item 11:

Maior Valor	86
Menor Valor	6
Amplitude do ROL (R)	80
Quant. de Observações	50
Quant.de Classes (K)	6.61
Amplit.do Interv.da Classe (h)	12.11
K considerado	7
h considerado	12

Engenharia de Produção
GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

Ordem	Classes			Valor Médio (t)	Fi	Fa	Frso	F(t) = Frao
	≥		<					
1		6	18	12	9	9	0,18	0,18
2		18	30	24	12	21	0,24	0,42
3		30	42	36	13	34	0,26	0,68
4		42	54	48	9	43	0,18	0,86
5		54	66	60	2	45	0,04	0,9
6		66	78	72	3	48	0,06	0,96
7		78	90	84	2	50	0,04	1

Exemplo até o item 13:

$t_0(1)$	0
$t_0(2)$	1
$t_0(3)$	2
$t_0(4)$	3
$t_0(5)$	4
$t_0(6)$	5

Y	Valores de X					
	Ln (t-t ₀ 1)	Ln (t-t ₀ 2)	Ln (t-t ₀ 3)	Ln (t-t ₀ 4)	Ln (t-t ₀ 5)	Ln (t-t ₀ 6)
-1,617	2,485	2,398	2,303	2,197	2,079	1,946
-0,607	3,178	3,135	3,091	3,045	2,996	2,944
0,131	3,584	3,555	3,526	3,497	3,466	3,434
0,676	3,871	3,850	3,829	3,807	3,784	3,761
0,834	4,094	4,078	4,060	4,043	4,025	4,007
1,169	4,277	4,263	4,248	4,234	4,220	4,205
0,000	4,431	4,419	4,407	4,394	4,382	4,369
$\Sigma = 0,585$	25,920	25,698	25,464	25,217	24,952	24,667

Engenharia de Produção

GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

Dados para o Cálculo da Regressão												
Y ²	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	X ₄ ²	X ₅ ²	X ₆ ²	X ₁ Y	X ₂ Y	X ₃ Y	X ₄ Y	X ₅ Y	X ₆ Y
2,615	6,175	5,750	5,302	4,828	4,324	3,787	-4,019	-3,878	-3,724	-3,553	-3,363	-3,147
0,369	10,100	9,831	9,555	9,269	8,974	8,670	-1,931	-1,905	-1,878	-1,849	-1,820	-1,789
0,017	12,842	12,640	12,435	12,226	12,011	11,792	0,468	0,464	0,460	0,456	0,452	0,448
0,457	14,986	14,824	14,658	14,491	14,320	14,147	2,617	2,603	2,588	2,574	2,558	2,543
0,696	16,764	16,626	16,487	16,346	16,203	16,059	3,415	3,401	3,387	3,372	3,357	3,342
1,367	18,290	18,170	18,050	17,928	17,804	17,679	5,000	4,983	4,967	4,950	4,933	4,915
0,000	19,632	19,526	19,419	19,311	19,202	19,092	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σ=5,521	98,788	97,368	95,906	94,398	92,840	91,225	5,550	5,668	5,800	5,949	6,118	6,313

Resultados das Regressões				
	β (a - coef. angular)	b (coef.linear)	η (dias)	r
X1	1,203	-4,369	37,837	0,862
X2	1,163	-4,186	36,572	0,865
X3	1,122	-3,997	35,278	0,868
X4	1,079	-3,805	33,952	0,870
X5	1,034	-3,605	32,584	0,873
X6	0,988	-3,399	31,165	0,876

$\beta < 1$ - mortalidade infantil.

η - Intervalo de tempo entre t_0 e t no qual ocorrem 63,2% das falhas.

4 - Modos de Falhas, Análise dos Efeitos e Análise de Criticidade (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis - FMECA*)

Normas Associadas à FMEA/FMECA:

- MIL-STD-785/Task 204: procedimento para desenvolvimento da FMECA em equipamentos ou sistemas.
- MIL-STD-1543: *Reliability Program Requirements for Space and Launch Vehicles*
- BS (*British Standards*) 5760-5: *Guide to failure modes, effects and criticality analysis (FMEA and FMECA)*
- NASA NHB 5300.4: *Reliability Program Provisions for Aeronautical and Space*
- IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) - STD-352-1975/ANSI N411.4: *IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Protection Systems*
- IEC (*International Electrotechnical Commission*) 60812: *Procedures for failure mode and effect analysis FMEA*
- SAE (*The Society of Automotive Engineers*) J-1739: *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)*
- SAE ARP-5580: *Recommended failure modes and effects analysis (FMEA) practices for non-automobile applications*
- ESA - ECSS-Q-30-02A: *Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)*.
- O Grupo de normas QS 9000: desenvolvido pelas Chrysler Corporation, Ford Motor Company e a General Motors Corporation, que qualifica os fornecedores, inclui a utilização da FMEA.

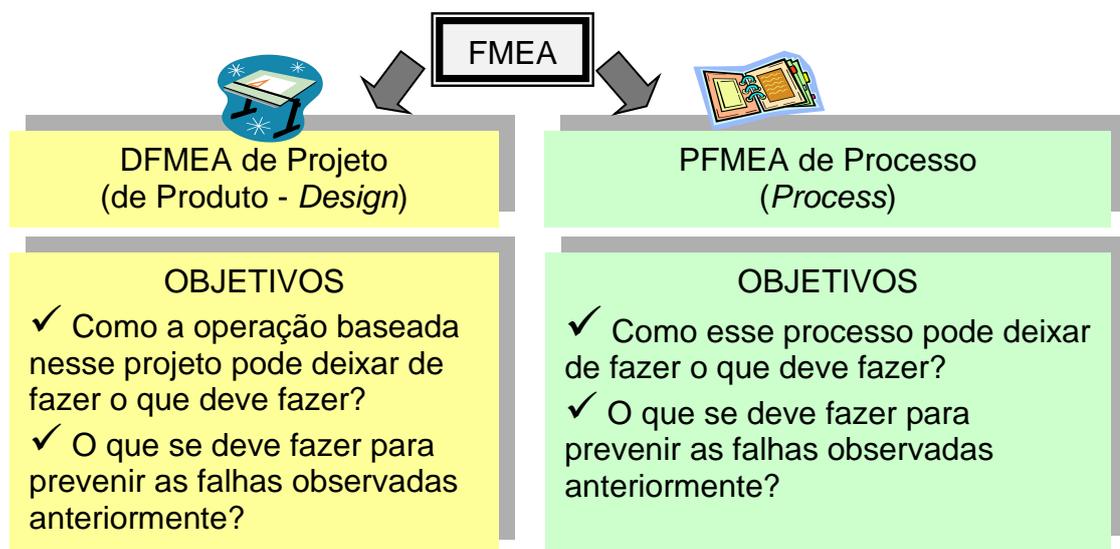
O FMECA é utilizado para:

- Analisar sistematicamente, em nível qualitativo, todos os possíveis modos potenciais de falhas de um sistema;
- Identificar as causas e os efeitos de cada modo de falha;
- Priorizar os modos de falha quanto à sua criticidade;
- Documentar o estudo, criando um referencial técnico.

O FMECA tem as seguintes características:

- É Pró-ativo;
- É um método baseado na subjetividade e no conhecimento de especialistas;
- Pode ser aplicada em GRUPO ou por intermédio de análise INDIVIDUAL.
- Tem sido empregado em aplicações específicas tais como análises de fontes de risco em engenharia de segurança e na indústria de alimentos.

FMEA pode ser desenvolvida para um projeto ou para análise de processos. Quanto a isso, o objetivo de cada está expresso na próxima figura.



O FMEA de Projeto (Produto) subsidia os riscos de falhas, pois:

- ✓ Ajuda na avaliação objetiva dos requerimentos e das alternativas de projeto;
- ✓ Facilita a manufatura e a montagem;
- ✓ Aumenta a probabilidade de que todos os modos potenciais de falhas e seus respectivos efeitos serão analisados;
- ✓ Fornece um referencial que auxilia na avaliação e implementação de futuras alterações ou desenvolvimentos em cima do projeto base.

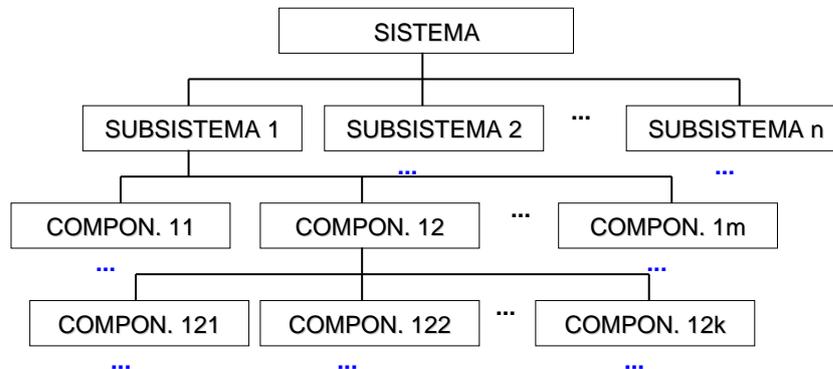
O FMEA de Processo considera as falhas no planejamento e execução do processo, ou seja, o objetivo desta análise é evitar falhas do processo, tendo como base as não conformidades do produto com as especificações do projeto.

Os 5 conjuntos de elementos básicos que compõem o FMEA são:

1. Planejamento inicial: objetivos, formação da equipe etc.;

1.1. Definir o Sistema e Seus Requisitos:

- ✓ Estabelecer o nível para análise;
- ✓ Determinar a hierarquização do sistema (subsistemas, componentes de 3º nível, componentes de 4º nível etc.);



A quantidade de níveis depende do nível de detalhamento

- ✓ Estabelecer os objetivos operacionais (primários e secundários);
- ✓ Estabelecer os limites dos esforços ambientais e operacionais;
- ✓ Delinear as fases operacionais;
- ✓ Caracterizar as condições de operação que definem o sucesso do sistema;
- ✓ Caracterizar as macro-funções do sistema e suas interfaces (texto, plantas, diagramas, esquemas etc.);
- ✓ Qualificar os resultados indesejados;
- ✓ Identificar os fatores relevantes de desempenho e eficiência.

1.2. Analisar Funcionalmente o Sistema

- ✓ Detalhar as funções do sistema;
- ✓ Decompor o sistema em blocos operacionais principais e definir as suas funções e recursos;
- ✓ Detalhar as atividades de manutenção refletindo a manutenibilidade do componente em relação a funcionalidade do sistema;
Obs.: estes dados servirão para subsidiar a criação de indicadores de desempenho e a definição do apoio logístico para atendimento da manutenção.
- ✓ Indicar as condições ambientais;
- ✓ Registrar os tempos necessários para as atividades, a necessidade de equipamentos etc.;

✓ Definir as interfaces entre os blocos.

2. Modos de Falha (MF)/Causa/Efeitos

Como pode falhar?

Por que falha?

O que acontece quando falha?

2.1. Identificar os Modos de Falha

Identificar todos os modos de falhas potenciais, tanto no componente como nas interfaces.

Devem ser identificados e descritos os seus efeitos no próprio, na função imediata (nível superior) do sistema e na operação do sistema.

2.2. Determinar a Causa das Falhas

Esta fase envolve a análise do processo ou produto de modo a identificar a(s) causa(s) responsáveis pela ocorrência de qualquer falha particular.

Técnica para auxiliar: Diagrama de Ishikawa - Diagrama de Causa e Efeito.

Na medida do possível, lista-se cada causa/mecanismo de falha que possa ser concebido. Exemplo:

Modo de Falha	Efeito da Falha (local)	Causa da Falha
Rolamento travado	Parada do veículo	- especificação errada do lubrificante - manutenção preventiva postergada - qualidade do rolamento utilizado etc.

2.3. Determinar os Efeitos das Falhas

Os efeitos potenciais de falha são definidos como aqueles defeitos, resultantes dos modos de falha, que são percebidos pelo cliente interno e/ou externo.

Os efeitos devem ser avaliados em todos os níveis da hierarquia do sistema e não somente no elemento funcional sob análise.

Da mesma forma, deve-se considerar os efeitos nos processos subsequentes, analisando se o consumidor da próxima cadeia poderá ser afetado.

Exemplos: ruído, operação errada, condição visual, olfativa e auditiva desagradável, instabilidade, operação intermitente, falta de operação etc..

3. Identificar os MF críticos

Índice de Risco (IR): Severidade, Probabilidades de Ocorrência e de Detecção

3.1. Identificar os Meios para Detectar as Falhas

No contexto da FMECA, refere-se ao controle do processo em uso, o qual pode detectar a ocorrência de falhas ou defeitos.

Entretanto, quando a FMECA está dirigida para o projeto, isto se refere a existência de qualquer característica de projeto, tais como indicadores, equipamentos de medição ou procedimentos de verificação que irão resultar na detecção de modos potenciais de falha.

3.2. Definir a Severidade dos Modos de Falhas

Severidade no FMECA refere-se à gravidade do efeito ou impacto de um modo particular de falha.

São associadas às classificações de valores numéricos, ou pesos, que quantificarão cada análise.

Classificação	Severidade	Pesos
Nenhuma	A falha não tem efeito real no sistema não afetando o usuário	1
Leve	A falha causa leves transtornos ao cliente não afetando o nível de serviço do sistema	2
Baixa	A falha causa pequenos transtornos ao cliente afetando pouco o nível de serviço do sistema	3
Moderada	A falha causa relevantes transtornos ao cliente afetando o nível de serviço do sistema	4
Média	A falha causa relevantes transtornos ao cliente deixando-o desconfortável, degradando o nível de serviço do sistema	5
Média/Alta	A falha causa irritação ao cliente deteriorando sensivelmente o nível de serviço	6
Alta	A falha causa alto grau de insatisfação ao cliente devido ao nível de deterioração do nível de serviço. Não envolve riscos à segurança dos usuários nem descumprimento dos requisitos legais	7
Muito Alta	A falha envolve alto risco à segurança dos equipamentos e leve risco à segurança dos usuários, não causando descumprimento de requisitos legais	8
Altíssima	A falha envolve alto risco à segurança operacional e dos usuários causando descumprimento legal de requisitos legais.	9
Grave	A falha promove acidente com graves proporções.	10

3.3. Definir a Frequência dos Modos de Falhas

Neste passo analisar-se-á a frequência com que ocorrem as falhas.

São associadas às classificações valores numéricos, associados à taxa de falhas, que quantificarão cada análise.

Classificação da Probabilidade de Ocorrência	Pesos	Taxa de Falhas
--	-------	----------------

Engenharia de Produção

GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

Remota	A falha é improvável	1	<1 falha em 10 ⁶ horas
Baixa	Poucas falhas	2	1 falha entre 10 ⁶ e 20.000 horas
		3	1 falha entre 20.000 e 4.000 horas
Moderada	Falhas ocasionais	4	1 falha entre 4.000 e 1.000 horas
		5	1 falha entre 1.000 e 400 horas
		6	1 falha entre 400 e 80 horas
Alta	Falhas repetitivas	7	1 falha entre 80 e 40 horas
		8	1 falha entre 40 e 20 horas
Muito Alta	Falhas quase inevitáveis	9	1 falha entre 20 e 8 horas
		10	1 falha entre 8 e 2 horas

3.4. Definir a Probabilidade de Detecção dos Modos de Falhas

Refere-se a probabilidade que as características de projeto e os procedimentos de verificação irão detectar modos potenciais de falha a tempo de prevenir uma falha em nível de sistema. Quando esta análise está orientada para o processo, refere-se a probabilidade de que um conjunto de controles de processo tem condições de detectar e isolar uma falha antes que esta se transfira para o processo subsequente ou para o cliente/consumidor final.

Classificação da Probabilidade de Detecção		Pesos
Muito Alta	A falha é detectada durante o projeto, fabricação, montagem ou na operação	1
Alta	A falha é detectada durante a fabricação, montagem ou na operação	2
Média/Alta	A falha é detectada pela montagem ou pelos processos de controle na operação	3
Moderada	A falha é detectada pelos processos de controle na operação	4
Média	Existe 50% de chance da falha ser detectada na operação	5
Média/Baixa	Há possibilidade de detecção da falha pelos processos de controle na operação	6
Baixa	Há alguma possibilidade de detecção da falha pelos processos de controle operacionais	7
Muito Baixa	É improvável a detecção da falha pelos processos de controle na operação	8
Baixíssima	Os sistemas de controle na operação não estão apropriados para detecção da falha	9
Não detectável	A falha não será detectada com certeza	10

Determinar o IR: $IR = \text{Peso da Severidade} \times \text{Peso da Frequência} \times \text{Peso de Detecção}$

4. Analisar e Hierarquizar os MF críticos

A criticidade de um componente que compõe um sistema é uma medida de sua importância no funcionamento do mesmo. Baseia-se na análise das condições operacionais dos componentes, objetivando a segurança e a operacionalidade do sistema.

As normas MIL-STD-1629A e BS 5760 definem "criticidade" como uma medida relativa das consequências e a frequência de ocorrência das falha. Estas normas definem "análise de criticidade" como um procedimento para listar modos de falha, de forma hierarquizada, combinando a influência da severidade e a probabilidade da ocorrência.

Lafraia (2001) define "análise de criticidade" ou análise de risco como o processo ou procedimento para identificar, caracterizar, quantificar e avaliar os riscos e seu significado.

Cada um dos modos de falha identificados deve ser avaliado em termos da pior consequência potencial que possa resultar em uma classificação em termos de categoria de severidade. Ou seja, um determinado modo de falha pode ter várias consequências, e o mesmo deverá ser classificado pela classificação da consequência mais crítica de todas.

5. Controle e acompanhamento

Para a decisão sobre as alterações práticas baseadas nas propostas do FMEA utilizar outras técnicas para ratificar a mudança, tal como avaliações estatísticas.

OBSERVAÇÕES IMPORTANTES:

1. O FMEA não substitui o trabalho da Engenharia de Manutenção;
2. Nem todos os MF devem ter a atenção;
3. O FMEA não é ferramenta para elaboração de projeto IDEAL;
4. Os pesos relacionados com SEVERIDADE, PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA E DE DETECÇÃO devem ser reavaliados a cada intervenção que mude a estrutura anterior;
5. Um IR baixo pode indicar necessidade de intervenção CORRETIVA ao invés de PREVENTIVA;
6. Para desenvolvimento do FMEA é necessário mais que UMA reunião para consenso;
7. É fundamental a formação de equipe ECLÉTICA.

Principais Aplicações do FMEA:

Engenharia de Produção

GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

- ✓ Para diminuir a probabilidade da ocorrência de falhas em projetos de novos produtos;
- ✓ Para diminuir a probabilidade de falhas potenciais em produtos ou processos já em operação;
- ✓ Para aumentar a confiabilidade de produtos ou processos já em operação por meio da análise das falhas que já ocorreram (histórico);
- ✓ Para diminuir os riscos de erros e aumentar a qualidade em procedimentos administrativos.

Dificuldades encontradas para o desenvolvimento do FMEA:

- ✓ Relacionar CAUSAS E EFEITOS;
- ✓ Dificuldade de acesso aos dados pelas equipes;
- ✓ Restrição quanto a exposição de problemas;
- ✓ Restringir a tendência para decisões precipitadas;
- ✓ Monitorar os resultados após a implementação.

Vantagens para o desenvolvimento da FMEA:

- ✓ Proporcionar uma visão sistêmica do complexo;
- ✓ Otimização das atividades das equipes de manutenção;
- ✓ Aperfeiçoamento dos Recursos Humanos;
- ✓ Melhora a percepção dos riscos;
- ✓ Subsidia a alocação de recursos;
- ✓ Redução de custos de produção e de manutenção;
- ✓ Melhoria Contínua (Qualidade Total).

O formulário é preenchido para todos os componentes do sistema que podem falhar e para todos os possíveis modos de falha de cada componente.

Também deverá contemplar uma curta exposição dos pontos mais fracos do projeto que foram descobertos como resultado da elaboração do FMEA. Um exemplo de formulário FMEA está demonstrado a seguir.

1) Número da FMEA:	2) Item:
--------------------	----------

Engenharia de Produção GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

3) Modelo / Ano:	4) Responsável pela análise:
5) Equipe da FMEA :	6) Data limite para a análise:
7) Data do final da análise:	8) Data ou periodicidade da revisão:
9) Página ___ de ___	

Item e Função	Modo de Falha	Efeito(s) da Falha	Sever.	Causa(s) da Falha	Freq.	Controle Atual	Detecção	RPN	Ação Recom.	Respons./ Data de Conclusão

1) Número do FMEA

Número do documento que será usado para arquivo e rastreabilidade do documento.

2) Item sob Análise

Identificação do sistema/subsistema/componente sob análise.

3) Modelo / Ano

Indicação do modelo(s) e o ano que irá utilizar ou ser afetado pelo projeto (FMEA de projeto) em análise.

4) Responsável

Indicação da pessoa e/ou área responsável.

5) Equipe

Indicar as pessoas que compõem a equipe.

6) Data Limite

Indicar a data limite para a finalização da análise.

7) Data Final

Indicar a data que terminou a análise.

8) Data ou periodicidade da revisão

Indicar a data ou a periodicidade para nova análise.

9) Página atual e o total de páginas

Indicar qual a numeração da página atual e o total de páginas da análise.

A análise do FMEA deve contemplar principalmente:

- ✓ Os componentes de alto risco;
- ✓ As atividades a serem desenvolvidas para providenciar ações corretivas;
- ✓ As considerações especiais de teste, pontos de inspeção de qualidade, ações de manutenção preventiva, restrições operacionais, vida útil e outras informações pertinentes;

- ✓ As atividades necessárias para minimizar o risco de falha.

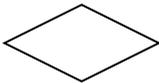
5. ÁRVORE DE FALHAS (*Failure Tree Analysis – FTA*)

Consiste em um processo lógico e dedutivo que, partindo de um evento indesejado e pré-definido (evento topo), buscam-se as possíveis causas de tal evento (pensamento reverso). Quanto às vantagens desta técnica podem-se destacar as seguintes:

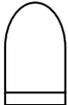
- ✓ Visa melhorar a confiabilidade de produtos e de processos por intermédio da análise sistemática de possíveis falhas e suas consequências, orientando na adoção de medidas corretivas ou preventivas.
- ✓ A elaboração da Árvore de Falhas trás uma série de outros benefícios, tais como o aumento do domínio das características técnicas dos equipamentos que compõem o sistema, a identificação da sequência das falhas críticas e a melhor interação entre os integrantes das equipes de projeto, operação e manutenção. Ou seja, há geração de conhecimento!
- ✓ É aplicável tanto para a análise de um projeto quanto para sistemas que já estão em operação.
- ✓ Pode ser utilizada para avaliação qualitativa (determinação das falhas básicas) e quantitativa (cálculo da probabilidade de ocorrência do evento).
- ✓ Pode ser desenvolvida em diferentes níveis de complexidade.
- ✓ É de interpretação simples por pessoas distantes do assunto sob análise.
- ✓ É uma ferramenta de fácil aprendizado, pois utiliza símbolos para caracterizar os diversos eventos e auxilia na determinação da causa de falhas e verifica a ligação entre as causas.
- ✓ Os eventos interagem para produzir outros eventos, que são relacionados através de operadores lógicos simples (AND, OR etc.).
- ✓ É uma técnica *top-down*, pois se deve partir de eventos gerais para eventos mais específicos.

Os símbolos utilizados para elaboração da árvore de falhas são:

Engenharia de Produção
GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

<p>Evento básico</p> 	<p>Um evento básico corresponde tipicamente a um evento de falha de um componente ou a um erro humano, para o qual, de um modo geral, o analista dispõe de dados básicos de falhas (taxa de falhas, tempo médio de reparo etc.). Representa o final do processo de análise dedutiva, formando, assim, a base da FT.</p>
<p>Evento não-desenvolvido</p> 	<p>É utilizado quando o evento é de consequência insuficiente ou a informação relevante não está disponível. Um evento não desenvolvido é um evento para o qual o analista não tem interesse em continuar o processo dedutivo, seja porque as causas do evento decorrem de falhas de componentes situados fora da fronteira definida para a análise, ou porque aquele evento já foi analisado em uma FT à parte.</p>
<p>Evento externo</p> 	<p>Significa um evento que é normalmente esperado que ocorra como por exemplo uma mudança de fase num sistema dinâmico; portanto, o símbolo mostra eventos que não são falhas.</p>
<p>Evento intermediário</p> 	<p>Ocorrem porque uma ou mais causas antecedentes agem através das portas lógicas.</p>
<p>Transferência para dentro</p> 	<p>Indica que a árvore será desenvolvida posteriormente no correspondente símbolo de transferência para fora. Transfere para...</p>
<p>Transferência para fora</p> 	<p>Indica que esta parte da árvore deverá ser anexada ao correspondente símbolo de transferência para dentro. Recebe de...</p>
<p>Porta Lógica OU</p> 	<p>Evento de saída que ocorre somente <u>se um ou mais dos eventos de entrada ocorrerem.</u></p>
<p>Porta Lógica OU exclusivo</p> 	<p>É uma derivação da porta OU, especial, onde o evento de saída ocorre somente <u>se exatamente um dos eventos de entrada ocorre.</u></p>
<p>Porta Lógica E</p> 	<p>O evento de saída ocorre somente <u>se todos os eventos de entrada ocorrerem.</u></p>

Engenharia de Produção GERÊNCIA DA MANUTENÇÃO

Porta Lógica E Prioridade 	O evento de saída ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrem, numa sequência ordenada especificada que normalmente é mostrada dentro de uma elipse desenhada do lado direito da porta.
Porta Lógica K de n 	É uma porta lógica cuja saída ocorre se de n entradas pelo menos k ocorrem; o caso 1 de n se torna um OU e n de n se torna um E.
Porta Lógica Inibidora (Condicional) 	A saída ocorre quando uma entrada única atende a alguma condição (entrada condicional) que é geralmente colocada numa elipse ou retângulo ao lado direito da porta inibidora.
NOT 	Contrário ao original

A CONSTRUÇÃO DE UMA ÁRVORE DE FALHAS É UM MISTO DE ARTE E DE CIÊNCIA.

Passos para elaboração de uma FTA:



Detalhes desses passos, a seguir:

Definir o Sistema

- ✓ Caracterizar o sistema e definir as suas funções;
- ✓ Avaliar a operação do sistema (controles, interfaces etc.);
- ✓ Identificar os procedimentos operacionais do sistema;
- ✓ Identificar os procedimentos de teste e de manutenção do sistema; Analisar as especificações técnicas (limites operacionais, necessidade de monitoração etc.) dos componentes do sistema.

Definir o Evento Topo

- ✓ Geralmente está relacionado com alguma situação crítica;
- ✓ Deve-se preocupar com a sua seleção:
 - Não pode ser muito geral, pois a análise pode se tornar dispersa (pouco valor prático) e
 - Não pode ser muito específico, pois a análise pode não fornecer uma visão suficientemente ampla do problema.

Construir a Árvore

- ✓ Determinar o Evento Topo ();
- ✓ Determinar os Fatores Contribuintes ();
- ✓ Elaboração da Diagramação Lógica (  ...);
- ✓ Determinação das Falhas Básicas ();
- ✓ Simplificação Booleana;
- ✓ Aplicação dos Dados Quantitativos;
- ✓ Determinação da Probabilidade de Ocorrência.

Validar a Árvore de Falhas

- ✓ O objetivo da validação da árvore de falhas é avaliar a precisão e a veracidade das suas informações.
- ✓ Geralmente é efetuada por um analista que não tenha participado da sua elaboração.

Regras da Álgebra de Boole:

Tipo de Porta	Forma Algébrica para as saídas A e B	Processamento		Resultado
		A	B	
OR	A+B	0	0	0 (F)
		0	1	1 (V)
		1	0	1 (V)
		1	1	1 (V)
AND	A.B	0	0	0 (F)
		0	1	0 (F)
		1	0	0 (F)
		1	1	1 (V)
NOT	A`	0		1 (V)
		1		0 (F)
NOR	(A + B)`	0	0	1 (V)
		0	1	0 (F)
		1	0	0 (F)
		1	1	0 (F)
NAND	(A . B)`	0	0	1 (V)
		0	1	1 (V)
		1	0	1 (V)
		1	1	0 (F)
XOR	(A+B).(A.B)` = A⊕B OU Exclusivo	0	0	0 (F)
		0	1	1 (V)
		1	0	1 (V)
		1	1	0 (F)
XNOR	((A + B) . (A . B))`	0	0	1 (V)
		0	1	0 (F)
		1	0	0 (F)
		1	1	1 (V)

Propriedades da Álgebra de Boole

1 - Lei Comutativa:

$$X \cdot Y = Y \cdot X$$

$$X + Y = Y + X$$

2 - Lei Associativa:

$$X(YZ) = (XY)Z$$

$$X+(Y+Z) = (X+Y)+Z$$

3 - Lei Idempotente:

$$XX = X$$

$$X+X = X$$

4 - Lei de Absorção:

$$X(X+Y) = X$$

$$X+XY = X$$

5 - Lei Distributiva:

$$X(Y+Z) = X \cdot Y + X \cdot Z$$

$$(X+Y) \cdot (X+Z) = X+Y \cdot Z$$

6 - Complementar:

$$X \cdot \bar{X} = 0$$

$$X + \bar{X} = 1$$

7 - Teorema de "De Morgan":

$$\overline{X \cdot Y} = \bar{X} + \bar{Y}$$

$$\overline{X + Y} = \bar{X} \cdot \bar{Y}$$

8 - De uso freqüente:

$$X + \bar{X} \cdot Y = X + Y$$

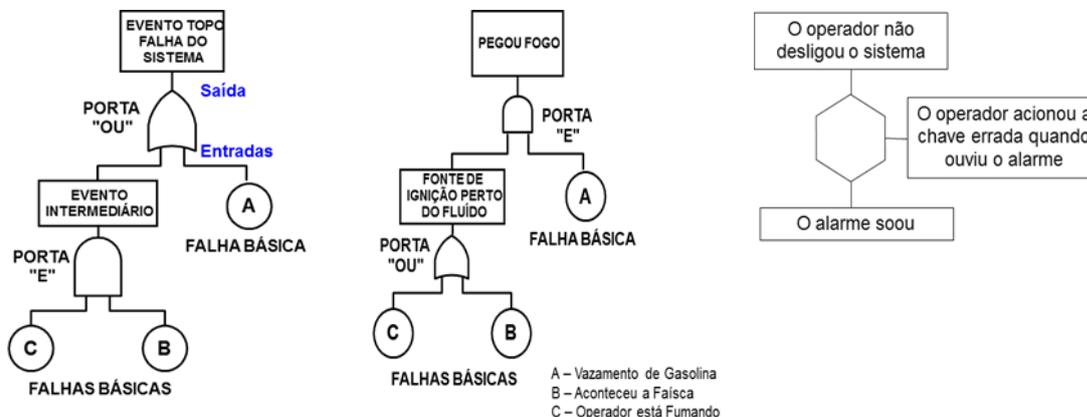
$$\bar{X}(X + \bar{Y}) = \bar{X} \cdot \bar{Y}$$

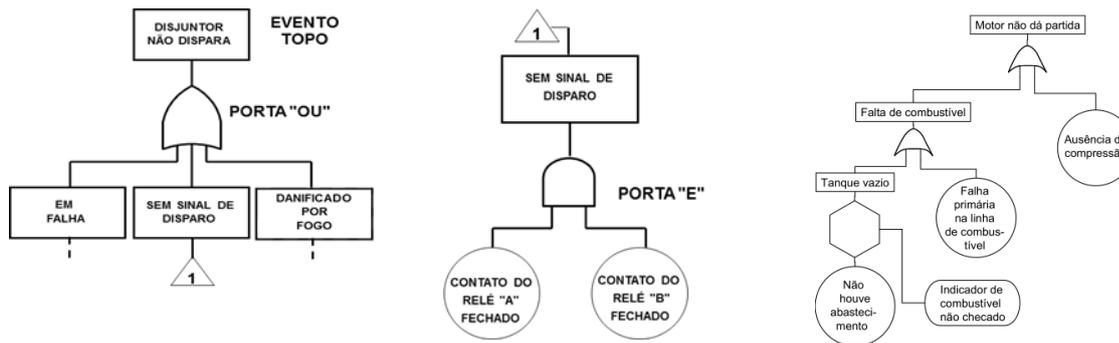
Comparação entre FTA e FMEA:

Melhor para ...	FTA	FMEA
Analisar falhas Múltiplas	X	
Analisar falhas Isoladas		X
Evitar a Análise de Falhas não-críticas	X	
Identificar os Eventos de Alto Nível Causado por Eventos de Nível mais Baixo	X	
Ter uma Abrangência Maior ao Analisar a Falha		X
Ter Menos Restrições e ser mais Fácil de Seguir	X	
Identificar Influências Externas	X	
Identificar Características Críticas		X
Prover um Formato para Validação dos Planos		X
Análise Quantitativa	X	
Não há Necessidade de se Garantir que a Falha de Cada Componente seja Analisada		X
Informação é limitada às Características do Sistema e as suas Funções Básicas	X	
Informações de Projeto Detalhadas em Desenhos e Especificações		X
Avaliar as Alternativas de Projeto	X	
Avaliar Redundâncias	X	
Avaliar a Integridade do Projeto, incluindo: detecção de falhas e failure-safe		X
Análises Dedutivas de Cima para Baixo	X	
Análise Indutivas de Baixo para Cima		X

Fonte: Lafraia (2001)

Exemplos:



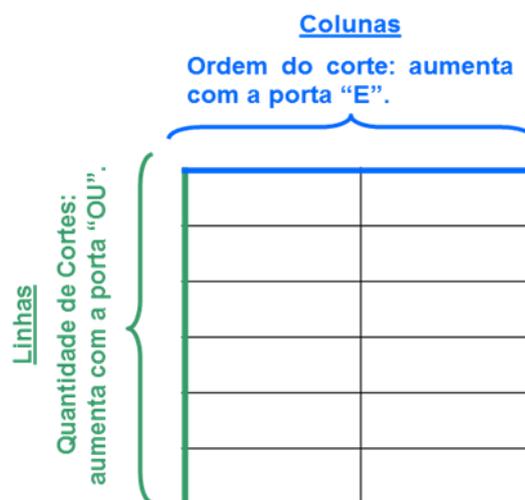


Corte Mínimo (Algoritmo de Vesely-Fussel):

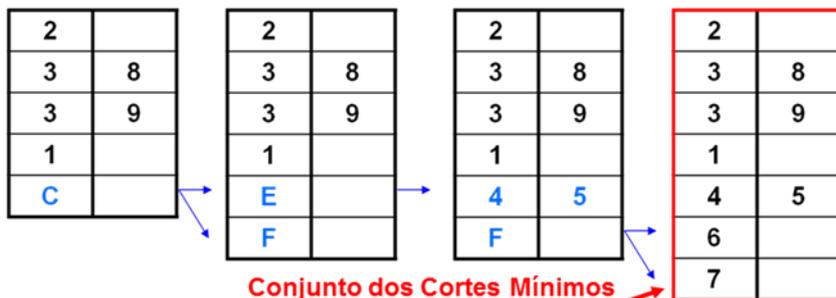
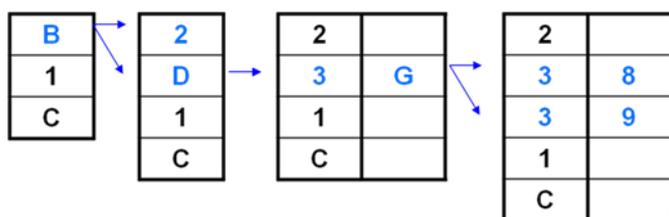
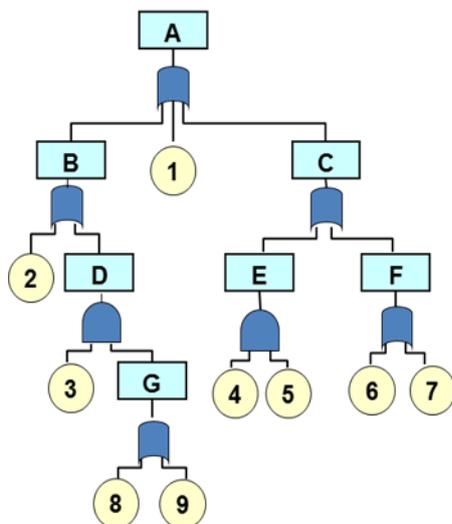
A determinação dos cortes mínimos viabiliza a análise qualitativa da árvore de falhas. Denomina-se “corte” de uma árvore de falhas a um conjunto de falhas básicas cuja ocorrência implica na ocorrência do evento topo. Denomina-se “corte mínimo” quando o corte não puder ser reduzido sem perder a sua condição de corte. Os cortes mínimos são os pontos fracos do sistema sob análise.

Para se avaliar os cortes mínimos pode-se utilizar o Algoritmo de Vesely-Fussel, desenvolvido por Jerry Fussel e Willian Vesely, que pode ser utilizado para eventos não repetidos. Para isso, seguem-se os seguintes passos:

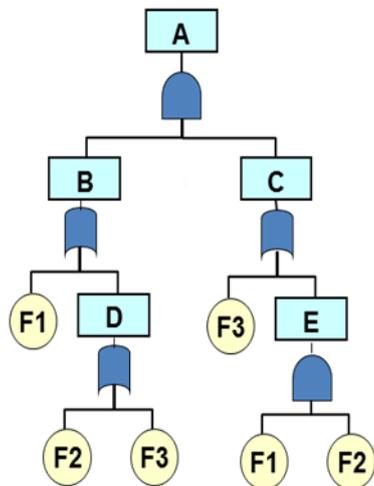
- ✓ Parte-se da primeira porta antes do evento topo;
- ✓ Para Portas tipo “E” aumenta-se o “tamanho” de um corte mínimo e para Portas tipo “OU” aumenta-se a “quantidade” de um corte mínimo (figura a seguir);
- ✓ Deve-se substituir cada porta pelas suas entradas até que todas as portas tenham sido substituídas.



Exemplo:



4 cortes mínimos de 1ª ordem e 3 de 2ª ordem.



Análise Top-Down

$$A = B.C; B = F1+D; D = F2+F3;$$

$$C = F3+E; E = F1.F2$$

$$A = (F1+D) . (F3+E)$$

$$A = F1.F3 + F1.E + D.F3 + D.E$$

$$A = F1.F3 + F1(F1.F2) + F3(F2+F3) + (F2+F3)(F1.F2)$$

$$A = F1.F3 + F1.F1.F2 + F2.F3 + F3.F3 + F2.F2.F1 + F3.F1.F2$$

Lei Idempotente

Análise Top-Down

$$A = B.C; B = F1+D; D = F2+F3;$$

$$C = F3+E; E = F1.F2$$

$$A = (F1+D) . (F3+E)$$

$$A = F1.F3 + F1.E + D.F3 + D.E$$

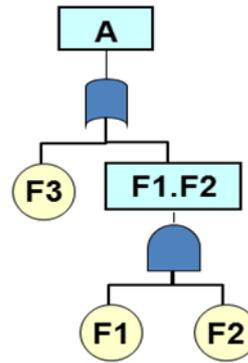
$$A = F1.F3 + F1(F1.F2) + F3(F2+F3) + (F2+F3)(F1.F2)$$

$$A = F1.F3 + F1.F1.F2 + F2.F3 + F3.F3 + F2.F2.F1 + F3.F1.F2$$

$$A = \mathbf{F1.F3} + \mathbf{F1.F2} + \mathbf{F2.F3} + \mathbf{F3} + \mathbf{F2.F1} + \mathbf{F3.F1.F2}$$

De acordo com a Lei de Absorção ():
 $F1.F3 + F2.F3 + F1.F2.F3 + F3 = \mathbf{F3}$. Sendo assim:

$$\mathbf{A = F3 + F1.F2}$$



A análise quantitativa pode ser efetuada independentemente da análise qualitativa. Considerar-se-á na análise quantitativa, as taxas de falha e de reparo como constantes.

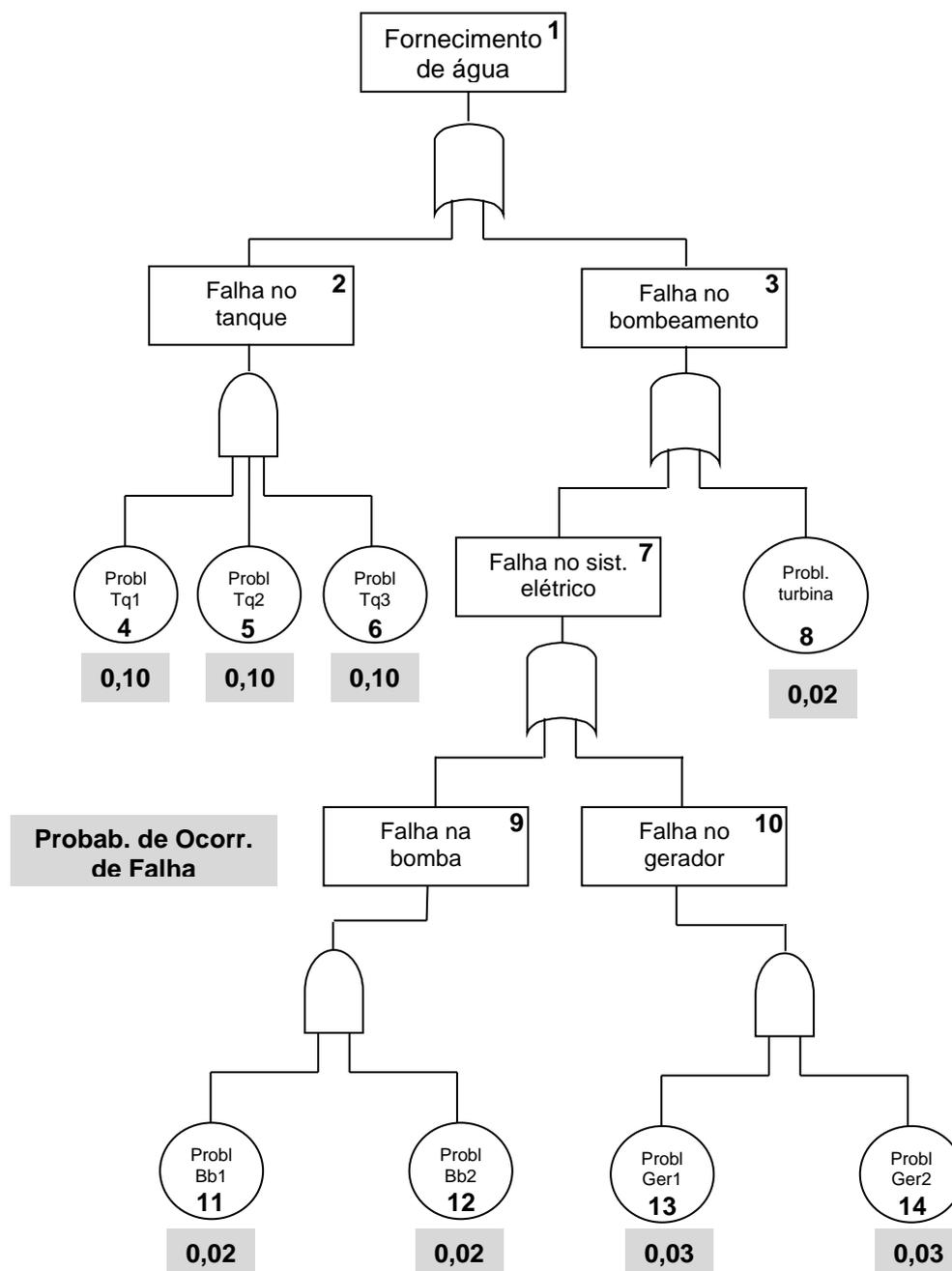
Para Porta Lógica E:
$$P(O) = \prod_{i=1}^n P(E_i)$$

Sendo P(O) a probabilidade de ocorrência do evento resultante (saída) e P(E) a probabilidade de ocorrência das causas resultantes (hierarquia inferior).

Para Porta Lógica OU:
$$P(O) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(E_i))$$

Criticidade: matematicamente corresponde ao produto da probabilidade de ocorrência da causa básica pela probabilidade condicional de ocorrência do evento topo, dado que a causa básica tenha ocorrido, ou seja, Criticidade = $P(E_i).P(H/E_i)$.

Exemplo de avaliação quantitativa.



Cálculos para determinação das probabilidades dos níveis superiores:

Porta E: $P(10) = P(13) \cdot P(14) = 0,0009$

Porta E: $P(9) = P(11) \cdot P(12) = 0,0004$

Porta OU: $P(7) = 1 - [(1 - P(9)) \cdot (1 - P(10))] = 0,0013$

Porta OU: $P(3) = 1 - [(1 - P(7)) \cdot (1 - P(8))] = 0,0212$

Porta E: $P(2) = P(4) \cdot P(5) \cdot P(6) = 0,0010$

Porta OU: $P(1) = 1 - [(1 - P(2)) \cdot (1 - P(3))] = 0,0222$

Exemplos de cálculos da criticidade:

Para o evento 9, observa-se que como existem 2 bombas em paralelo, caso uma delas falhe, por exemplo a bomba 1 (causa básica 11), não haverá interrupção do funcionamento do sistema. Mas, a partir deste momento, a probabilidade deste evento acontecer passará de 0,04% para 2%, que é a probabilidade da causa básica 12. Calculando-se todas as demais probabilidades, chega-se ao evento topo com 4,15%.

Portanto, a criticidade da bomba é $0,02 \cdot 0,0415 = 0,00083$

Para a turbina, que tem 2% de probabilidade de falhar, por ela não apresentar redundância, ou seja, outra turbina em paralelo, quando ela falhar o sistema para de funcionar, independente do evento 7. Por isso, a probabilidade condicional de falha do evento 3 e, conseqüentemente do sistema, dado que a turbina falhou, é de 100%. Portanto a criticidade da turbina é $0,02 \cdot 1 = 0,02$.

BIBLIOGRAFIA

Antunes, Paula; Santos, Rui e Lobo, Gonçalo. **Estudo Sobre Sector Eléctrico e Ambiente**, 4º Relatório – Centro de Economia Ecológica e Gestão do Ambiente, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1994. Rio de Janeiro. NBR5462, **Confiabilidade e Manutenibilidade** - terminologia. Rio de Janeiro, 37p.

Avižienis, Algirdas; Laprie; Jean-Claude e Randell, Brian. Fundamental Concepts of Dependability, *In: Third Information Survivability Workshop (ISW-2000)*, IEEE Computer Society, Boston, Massachusetts, USA, 2000.

Brandão, Gláucia Brito. **Transportes e o Meio Ambiente no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia – IME, 107 p., Rio de Janeiro, 1996.

British Standard Institution. **BS 5760: Reliability of Systems, Equipment and Components-Part 5. Guide to Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)**. 1991.

Department of Defense - United States of America. **Military Standard MIL-STD-785A: Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production**. 1978.

Department of Defense - United States of America. **Military Standard MIL-STD-1629A: Procedures For Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis**. 1980.

Dhillon B.S. e Singh C. **Engineering Reliability – New Techniques and Applications**. Editora John Wiley & Sons, ISBN 0-471-05014-8, USA, 1981.

Dhillon B.S. **Reliability Engineering in Systems Design and Operation**. Editora Van Nostrand Reinhold Company, ISBN 0-442-27213-8, USA, 1983.

ECOM - Ecologia E Comunicação. **Vocabulário Básico de Meio Ambiente**. Disponível em <http://www.meioambiente.gov.br>, Capturado em 15/09/2002.

Ferreira, Fábio Ricardo. **Aplicação RCM na KODAK da Amazônia: IV Seminário Brasileiro de Confiabilidade na Manutenção**. São Paulo, 2001.

Frankel, E.G.. **Systems Reliability and Risk Analysis**. Editora Kluwer Academic Publishers, 429p. ISBN 90-247-3665-X, Netherlands, 1988.

Hamaoka, Ricardo Eiji e Silva, Paulo Afonso Lopes. **Otimização de Sistemas Logísticos: Metodologia Aplicada à Unidade de Manutenção de Aviação do Exército Brasileiro**. Instituto Militar de Engenharia - Departamento de Engenharia de Sistemas, 2000, Disponível em <http://www.ipanema.ime.eb.br/RelTec/2000/Rt052-00.pdf>, Capturado em 17/07/2002.

IRESON, W.G. e COOMBS C.F. Jr.. **Handbook of Reliability Engineering and Management**. Editora McGraw-Hill, ISBN 0-07-032039-X, USA, 1988.

Lafraia, João Ricardo Barusso. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 374 pgs, Editora Qualitymark, ISBN 85-7303-294-4, Rio de Janeiro, 2001.

Leibel, Alexandre. **Custos na Manutenção**. Universidade Federal de São João Del-Rei, 1º Encontro de Manutenção da FUNREI, Disponível em <http://www.funrei.br/demec/eman1/artigos.htm>, Capturado em 23/05/2002, 2001.

LEMONS, Rogério de e VERÍSSIMO, Paulo, **Confiança no Funcionamento: Proposta para uma Terminologia em Português**, Disponível em <http://www.cs.ukc.ac.uk/people/staff/rdl/CoF/> e <http://www.cs.ukc.ac.uk/people/staff/rdl/CoF/node4.html>, Capturado em 19/07/2002, 2001.

Machado Neto, Vicente **Distribuição de Weibull**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Material de Aula de Confiabilidade, 2003.

Monchy, François. **A Função Manutenção: Formação para a Gerência da Manutenção Industrial**. 422 pgs, Editora Durban / Ebras, São Paulo, 1989.

SANTOS, Horta. **Manutenção Preditiva**. Volume 1, Núcleo de Treinamento Tecnológico – NTT, 1990.

SEIXAS, Eduardo de Santana. **Failure Mode and Effect Analysis – FMEA**. Qualytek - Qualidade, Tecnologia e Sistemas LTDA, 2001.

Tavares, Lourival Augusto. **PCM - Planejamento e Controle da Manutenção**, Rio de Janeiro, 1997.

Teófilo, Luiz Carlos. **Um Modelo de Avaliação da Manutenção de um Veículo Ferroviário**. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia – IME, 1989.

Wyrebski, Jerzy. **Manutenção Produtiva Total – Um Modelo Adaptado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Disponível em <http://www.eps.ufsc.br/disserta98/jerzy/>, Capturado em 14/01/2002, 1997.