



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
GERÊNCIA DE MANUTENÇÃO

Análise de Modo e Efeito de Falhas

2024

Organização da Apresentação

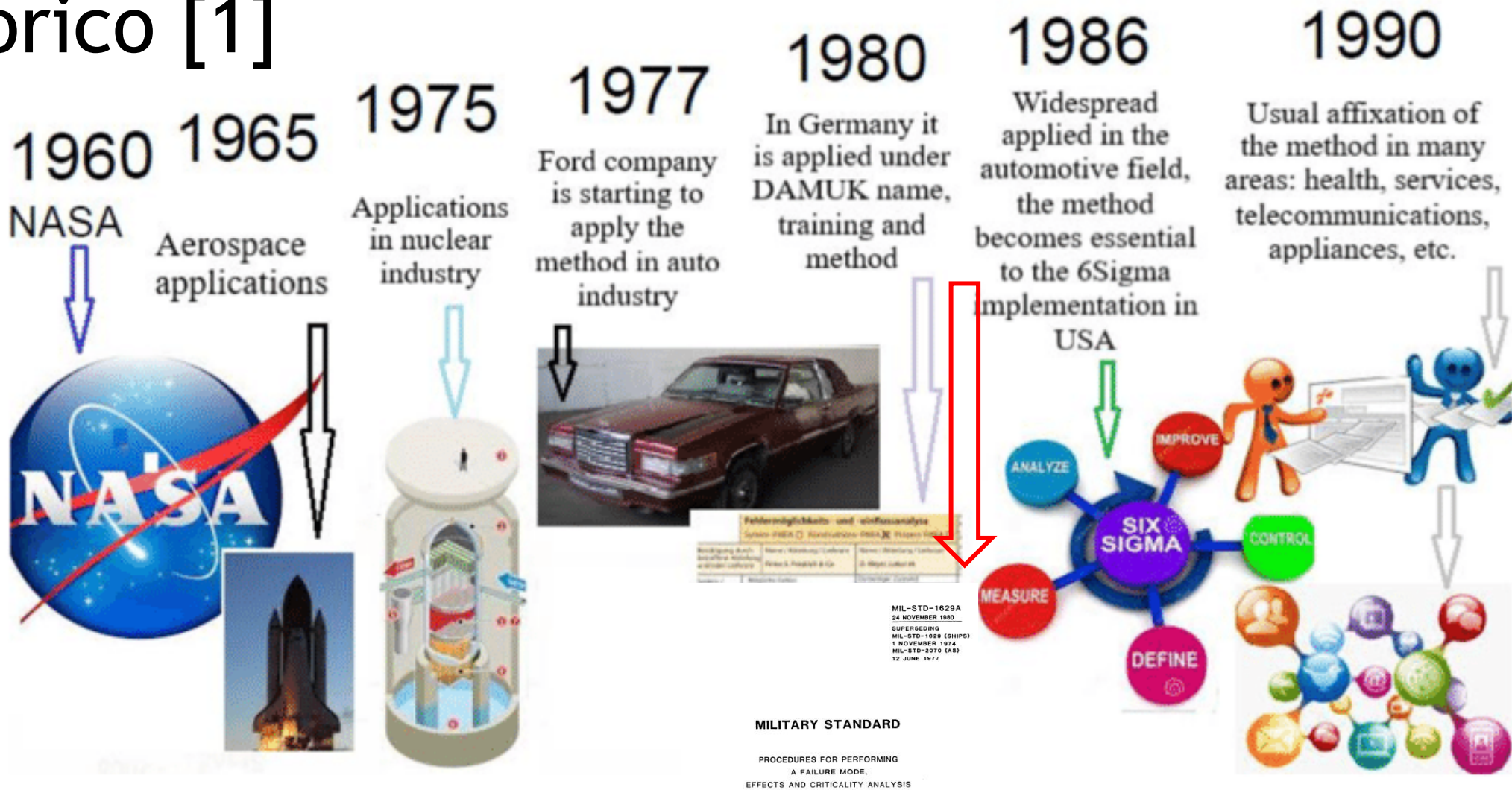
- Introdução
- Visão Geral
- Passo-a-passo
- Ferramentas relacionadas
- Referências

Introdução

Introdução

- Gerenciar riscos é essencial para qualquer organização, visando lidar com falhas de equipamentos e suas consequências na produção, segurança e meio ambiente.
- Por muitos anos, a análise de modo e efeito de falha (Failure Mode and Effect Analysis - FMEA) tem sido usada em muitos setores com essa finalidade.

Histórico [1]



MIL-STD-1629A
24 NOVEMBER 1980
SUPERSEDING
MIL-STD-1629 (SHIPS)
1 NOVEMBER 1974
MIL-STD-2070 (A8)
12 JUNE 1977

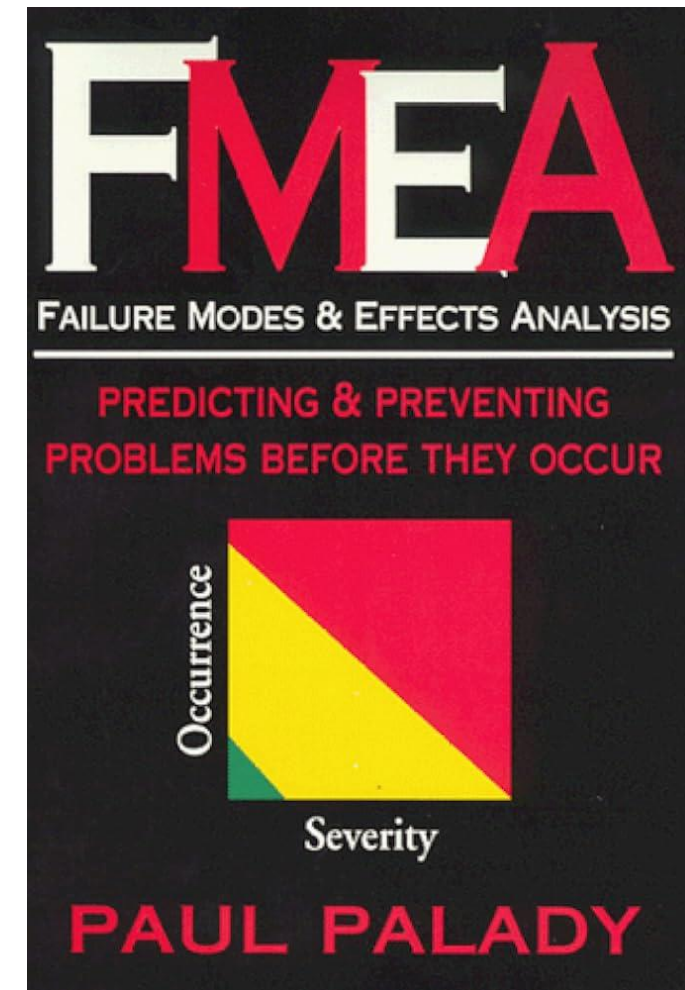
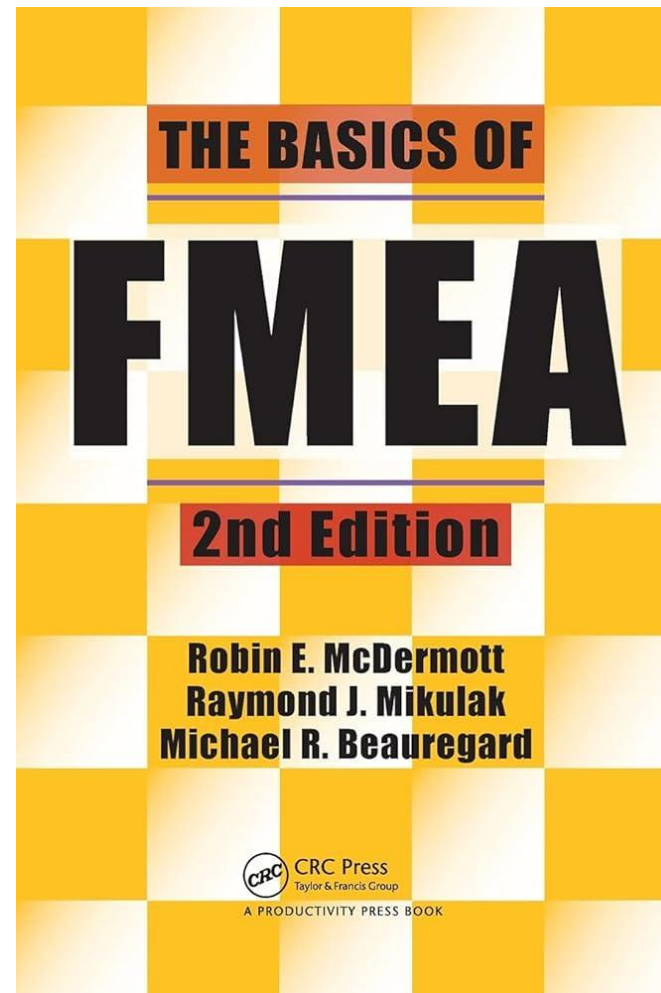
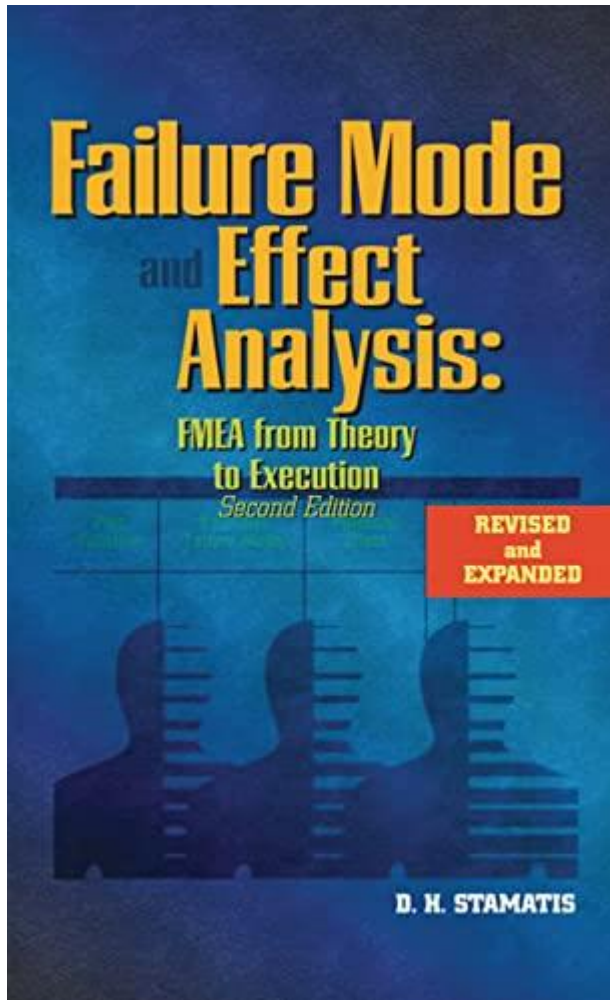
MILITARY STANDARD
PROCEDURES FOR PERFORMING
A FAILURE MODE,
EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS



MIL-STD-1629A

Histórico

- Vários livros sobre o assunto foram lançados nos 90's:



O que é FMEA?

- Segundo Ben-Daya [2], FMEA é uma metodologia sistemática destinada a realizar as seguintes atividades:
 - 1. Identificar e reconhecer falhas potenciais, incluindo suas causas e efeitos;
 - 2. Avaliar e priorizar modos de falha identificados; e
 - 3. Identificar e sugerir ações capazes de eliminar ou reduzir a chance de falhas potenciais ocorrerem.

O que é FMEA?

- Para Viana [3], o FMEA (Failure Mode and Effects Analysis - Análise do Modo e Efeitos de Falhas) consiste num método para análise de falhas em processos e produtos, com o **objetivo de prever efeitos indesejados**, possibilitando a tomada de decisão de forma antecipada, **identificando e priorizando ações que impeçam a existência efetiva destes efeitos**.

O que é FMEA?

- Uma vez implementado, um FMEA eficaz identifica ações corretivas necessárias para evitar que falhas cheguem ao cliente, visando garantir o maior rendimento, qualidade e confiabilidade possíveis.
- Os engenheiros sempre analisaram processos e produtos para identificar falhas potenciais, mas o FMEA padroniza uma abordagem e estabelece uma linguagem comum que pode ser usada tanto dentro quanto entre empresas.

O que é FMEA?

- A partir do uso do FMEA, Viana [3] afirma que a equipe poderá responder:
 - I – Quais são os modos de falhas possíveis de ocorrer?**
 - II – Quais componentes do sistema, ou subsistema, serão afetados por esses modos de falhas?**
 - III – Quais os efeitos das falhas ao sistema, ou subsistema, em termos de danos físicos, segurança, perda financeira e qualidade final do produto?**
 - IV – Qual ação, ou ações, pode ser tomada para evitar a ocorrência da falha?**

Benefícios do FMEA

1. Aumento a satisfação do cliente - pois melhora a segurança e a confiabilidade e mitigando o efeito adverso dos problemas antes que eles cheguem ao cliente.
2. Melhora a eficiência do desenvolvimento de produtos em termos de tempo e custo.
3. Documenta, prioriza e comunica riscos potenciais tornando os problemas explícitos para os membros da equipe de FMEA, gerência e clientes.
4. Reduz as chances de falhas catastróficas que podem resultar em ferimentos e/ou efeitos adversos no ambiente.
5. Otimiza os esforços de manutenção sugerindo tarefas de manutenção preventiva aplicáveis e eficazes para modos de falha potenciais.

Visão Geral

Visão geral

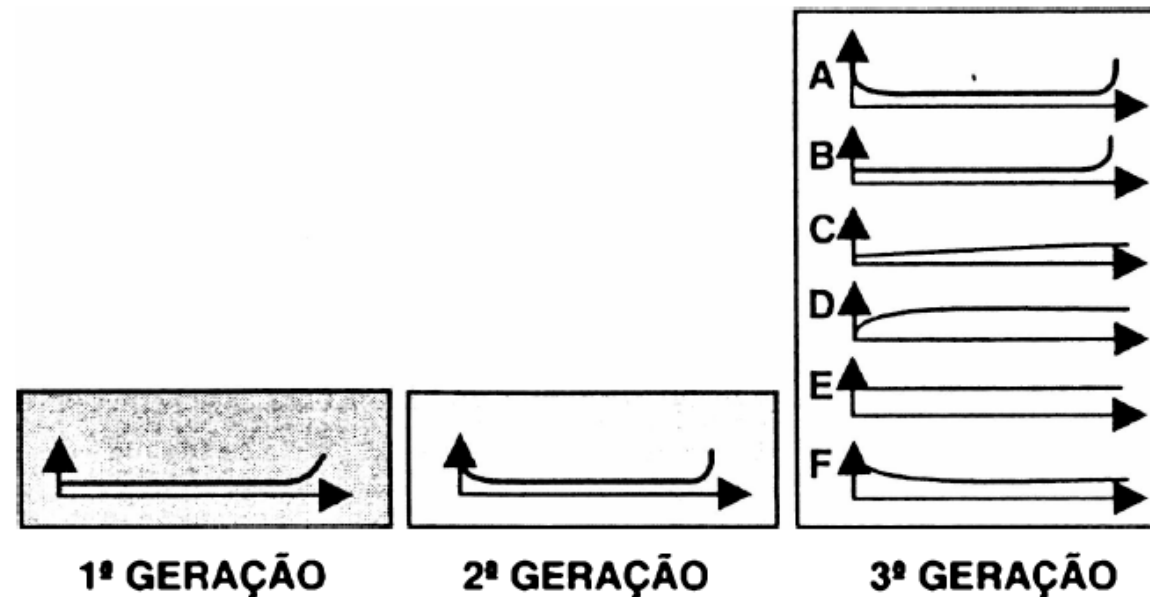
- Geralmente, existem quatro tipos de FMEA:
 - FMEA de sistema, que foca em funções globais do sistema produtivo;
 - FMEA de projeto de produtos, que foca em componentes e subsistemas;
 - FMEA de processo, que foca em processos de fabricação e montagem; e
 - FMEA de serviço, que foca em funções de serviço.

Visão geral

- Idealmente, as FMEAs são conduzidas nos estágios de projeto do produto ou desenvolvimento do processo.
- No entanto, conduzi-las em produtos e processos existentes também pode gerar benefícios, como em RCM para desenvolver um programa de manutenção preventiva eficaz.
- Antes de falar mais sobre essa metodologia, alguns conceitos precisam ser lembrados.

Visão geral

- A Seção 3.1 do MIL-STD-1629A faz as seguintes definições:
 - Modo de falha: a maneira pela qual uma falha é observada. Geralmente, descreve a forma com que a falha ocorre.



Gerações da manutenção.

Visão geral

- A Seção 3.1 do MIL-STD-1629A faz as seguintes definições:
 - Causa da falha: os processos físicos ou químicos, defeitos de projeto, defeitos de qualidade, aplicação incorreta de peças ou outros processos que são a razão básica para a falha ou que iniciam o processo físico pelo qual a deterioração prossegue para a falha.
 - Efeito da falha: a(s) consequência(s) que um modo de falha tem na operação, função ou status de um item.

Visão geral

- De forma resumida, um FMEA envolve a realização das seguintes atividades:
 - 1. Identificar e reconhecer falhas potenciais, incluindo suas causas e efeitos;
 - 2. Avaliar e priorizar modos de falha identificados; e
 - 3. Identificar e sugerir ações que podem eliminar ou reduzir a chance de falhas potenciais ocorrerem.

Visão geral

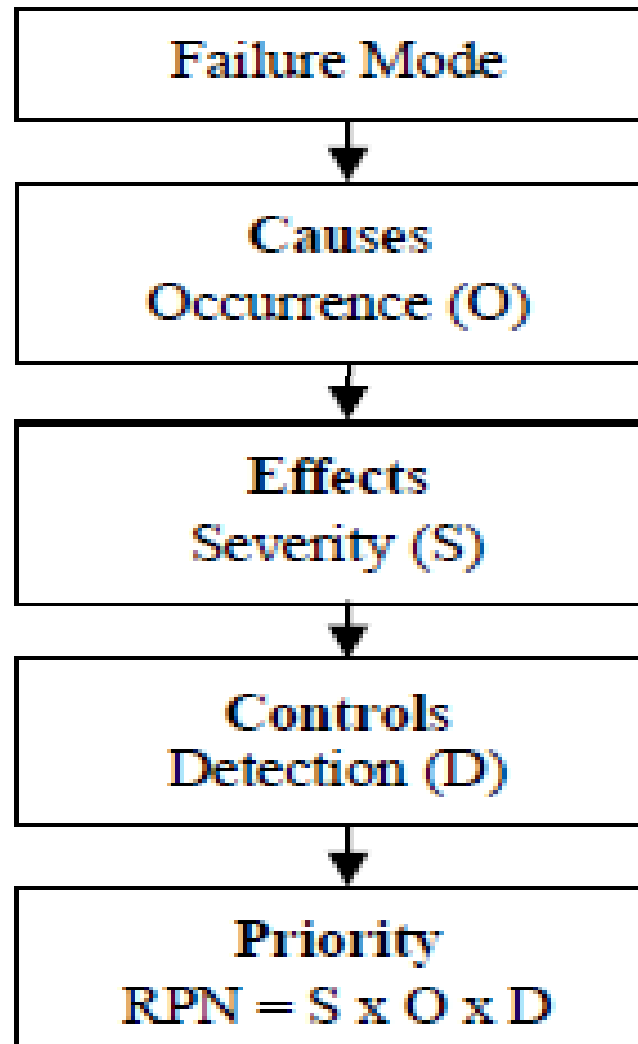
- Identificar modos de falha conhecidos e potenciais é uma tarefa importante na FMEA. Usando dados e conhecimento do processo ou produto, cada modo de falha potencial e efeito é classificado em termos de cada um dos três fatores a seguir com o objetivo de priorizar a tomada de ações:
 - Severidade ou gravidade: considera a consequência da falha;
 - Ocorrência ou frequência: a probabilidade da falha ocorrer; e
 - Detecção ou detectabilidade: a probabilidade da falha ser detectada antes que o impacto do efeito seja percebido.

Visão geral

- Para indicar a prioridade dos modos de falha identificados, esses três fatores são combinados em um número chamado número de prioridade de risco (NPR):
 - Número de prioridade de risco (NPR) = Severidade x Ocorrência x Detecção

Visão geral

- Resumo das importantes tarefas do FMEA:



Visão geral

- Os modos de falha não são iguais e precisam ser priorizados classificando-os de acordo com o número de prioridade de risco do mais alto para o menor.
- Um diagrama de Pareto pode ser usado para visualizar as diferenças entre as várias classificações.
- Com isso, a próxima tarefa importante da FMEA é concentrar recursos limitados em questões críticas de projeto e/ou processo para melhorar a confiabilidade, qualidade e segurança.

Passo-a-passo

FMEA

- Segundo Ben-Daya [2], o FMEA é uma metodologia proativa que segue as seguintes etapas típicas:
 1. Seleção de um processo de alto risco.
 2. Revisão do processo: esta etapa geralmente envolve uma equipe cuidadosamente selecionada que inclui pessoas com várias responsabilidades de trabalho e níveis de experiência. O objetivo de uma equipe FMEA é trazer uma variedade de perspectivas e experiências para o projeto.
 3. Brainstorming de causas em potencial.
 4. Identificação das causas raiz dos modos de falha.

FMEA

5. Levantamento dos efeitos potenciais das causas.
6. Atribua classificações de gravidade, ocorrência e detecção para cada efeito.
7. Calcule o número de prioridade de risco (NPR) para cada efeito.
8. Priorize os modos de falha para ação usando NPR.
9. Tome medidas para eliminar ou reduzir os modos de falha de alto risco.
10. Calcule o NPR resultante à medida que os modos de falha são reduzidos ou eliminados como um meio de monitorar o produto ou processo melhorado e redesenhado.

FMEA

- Etapa 6: A atribuição de classificações de ocorrência e detecção de gravidade geralmente é feita em uma escala de 1 a 10 usando tabelas semelhantes às mostradas a seguir, que são apresentadas por Ben-Daya[2].

Table 4.1. Typical occurrence evaluation criteria

| Probability of Failure | Possible failure rates | Ranking |
|---|-------------------------------|----------------|
| Very high: failure is almost inevitable | ≥ 1 in 2 | 10 |
| | 1 in 3 | 9 |
| High: repeated failures | 1 in 8 | 8 |
| | 1 in 20 | 7 |
| Moderate: occasional failures | 1 in 80 | 6 |
| | 1 in 400 | 5 |
| | 1 in 2,000 | 4 |
| Low: relatively few failures | 1 in 15,000 | 3 |
| | 1 in 150,000 | 2 |
| Remote: failure is unlikely | ≤ 1 in 1,500,000 | 1 |

Table 4.2. Typical severity evaluation criteria

| Effect | Criteria: severity of effect | Ranking |
|-----------------------------|--|---------|
| Hazardous – without warning | Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe operation and/or involves noncompliance with regulations without warning | 10 |
| Hazardous – with warning | Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe operation and/or involves noncompliance with regulations with warning | 9 |
| Very high | Product/item inoperable, with loss of primary function | 8 |
| High | Product/item operable, but at reduced level of performance. Customer dissatisfied | 7 |
| Moderate | Product/item operable, but may cause rework/repair and/or damage to equipment | 6 |
| Low | Product/item operable, but may cause slight inconvenience to related operations | 5 |
| Very low | Product/item operable, but possesses some defects (aesthetic and otherwise) noticeable to most customers | 4 |
| Minor | Product/item operable, but may possess some defects noticeable by discriminating customers | 3 |
| Very minor | Product/item operable, but is in noncompliance with company policy | 2 |
| None | No effect | 1 |

Table 4.3. Typical detection evaluation criteria

| Detection | Criteria: likelihood of detection by design control | Ranking |
|----------------------|--|---------|
| Absolute uncertainty | Design control will not and/or can not detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode; or there is no design control | 10 |
| Very remote | Very remote chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 9 |
| Remote | Remote chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 8 |
| Very low | Very low chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 7 |
| Low | Low chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 6 |
| Moderate | Moderate chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 5 |
| Moderately high | Moderately high chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 4 |
| High | High chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 3 |
| Very high | Very high chance the design control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 2 |
| Almost certain | Design control will almost certainly detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode | 1 |

FMEA

- Uma maneira típica de documentar o processo FMEA consiste no uso de tabelas como as mostradas a seguir:

FMEA

- Modelo de formulário [2]:

Table 4.4. Documentation of FMEA

| Potential failure mode(s) | Potential effects of failure mode | Severity | Potential causes of failure | Occurrence | Present detection systems | Detection | Risk Priority Number (RPN) | Results | | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------------|------------|---------------------------|-----------|----------------------------|--------------------|----------|------------|-----------|-----|
| | | | | | | | | Recommended action | Severity | Occurrence | Detection | RPN |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

FMEA

- Modelo de formulário [3]:

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------------|--|------------------|--------|----------|---------------------|-------------------|-------------|----------|-----|------------------|---------|-----------------------|---|---|-----|
| EMPRESA X | | FMEA – Análise do Modo e Efeito da Falha | | | | | revisão | 0 | | | | | | | | |
| | | | | | | | data | 22/07/09 | | | | | | | | |
| | | (X) MANUTENÇÃO () OPERAÇÃO () SISTEMAS | | | | | resp. | ABC | | | | | | | | |
| Identificação | | Local | U 431 | Setor | Britagem | Sistema | Primário | Equipamento | Britador | TAG | 431-BT-02 | | | | | |
| SUB ITEM | COMPONENTE/ PROCESSO | FUNÇÃO | POSSÍVEIS FALHAS | | | CONTROLES ATUAIS | ÍNDICES ATUAIS | | | | AÇÕES CORRETIVAS | | ÍNDICES MELHORADOS | | | |
| | | | MODO | EFEITO | CAUSAS | | F | G | D | NPR | Recomendada | Adotada | F | G | D | NPR |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

Limitações do NPR

- A análise do NPR tem suas limitações. Em particular:
 - Diferentes conjuntos de gravidade, ocorrência e detecção podem produzir o mesmo NPR, embora as implicações de risco possam ser totalmente diferentes;
 - Gravidade, ocorrência e detecção recebem a mesma importância (peso) nos cálculos de NPR.

Ferramentas relacionadas

Análise da causa raiz

- A Análise de Causa Raiz (Root Cause Analysis - RCA) é um método passo a passo usado para analisar falhas e problemas até a causa raiz. Cada falha de equipamento acontece por uma série de razões. Há uma progressão definida de ações e consequências que levam a uma falha.
- Uma investigação RCA rastreia a trilha de causa e efeito da falha final de volta à causa raiz para determinar o que aconteceu, por que aconteceu e, mais importante, descobrir o que fazer para reduzir a probabilidade de que aconteça novamente.

Análise da causa raiz

- O processo de analisar a causa raiz das falhas e agir para eliminar essas causas é uma das ferramentas mais poderosas para melhorar a confiabilidade e o desempenho da planta. As etapas do processo de investigação de falhas são discutidas na sequência.

1. Definição do problema e coleta de dados

- Exemplo de informações que devem ser coletadas consiste em:
 - condições antes, durante e depois da ocorrência;
 - envolvimento do pessoal (incluindo tomada de ações);
 - fatores ambientais;
 - e outras informações relevantes para a condição ou problema.

Table 4.5. Questions that help define the problem and gather data

| Category | Questions |
|----------|--|
| What | <ul style="list-style-type: none"> • What happened? • What are the symptoms? • What is the complaint? • What went wrong? • What is the undesirable event or behavior? |
| When | <ul style="list-style-type: none"> • When did it occur: what date and what time? • During what phase of the production process? |
| Where | <ul style="list-style-type: none"> • What plant? • Where did it happen? • What process? • What production stream? • What equipment? |
| How | <ul style="list-style-type: none"> • How was the situation before the incident? • What happened during the incident? • How is the situation after the incident? • What is the normal operating condition? • Is there any injury, shutdown, trip, or damage? • How frequent is the problem? • How many other processes, equipments or items affected by this incident? |

1. Definição do problema e coleta de dados

- As respostas para as perguntas exigem:
 - a revisão de registros, relatórios, desenhos e documentos de equipamentos ou instalação;
 - realização de entrevistas com operadores, equipe de manutenção, engenheiros e encarregados da planta, e consultoria de especialistas sobre possíveis consequências de ações corretivas;
 - Visita ao equipamento ou instalação com falha;
 - consulta ao fabricante do equipamento, revisão do sistema de informações computadorizado, etc.

2. Barreiras de controle

- Barreiras de controle são dispositivos administrativos ou físicos que são empregados para proteger funcionários ou equipamentos e aumentar a segurança e o desempenho do sistema da máquina.
- O objetivo de verificar barreiras de controle em um processo de investigação de falhas é determinar se todas as barreiras de controle pertinentes à falha sob investigação estão presentes e são eficazes.

2. Barreiras de controle

- Exemplos de barreiras de controle físico incluem:
 - recursos de segurança projetados;
 - barreiras e vedações contra incêndio;
 - proteção contra falhas de aterramento;
 - portas trancadas;
 - válvulas, freios e controles;
 - Isolamento;
 - sistema redundante;
 - sistema de desligamento de emergência.


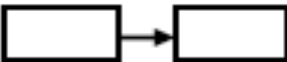
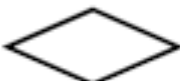
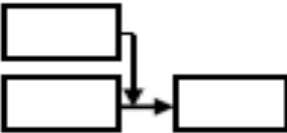


2. Barreiras de controle







- Exemplos de barreiras de controle administrativo incluem:
 - Alarmes;
 - regras e procedimentos de segurança;
 - certificação de operadores e engenheiros;
 - métodos de comunicação;
 - políticas e procedimentos;
 - autorizações de trabalho;
 - Padrões;
 - treinamento e educação.

3. Gráfico de eventos e fatores causais

- O gráfico ou diagrama de eventos e fatores causais é uma ferramenta de análise pela qual eventos, relações, condições, mudanças, barreiras e fatores causais são mapeados em uma linha do tempo usando uma representação padrão.

3. Gráfico de eventos e fatores causais

| Item | Symbol | Description |
|-------------------|---|--|
| Event |  | An action that occurs during some activity |
| Primary event |  | The action directly leading up to or following the primary effect |
| Undesirable event |  | An undesirable event (failure, conditions deviation, malfunction, or inappropriate action) that was critical for the situation |
| Secondary event |  | An action that impacts the primary event but is not directly involved in the situation |
| Terminal event |  | The end point of the analysis |
| Condition |  | Circumstances pertinent that may have influenced and/or changed the course of events, or caused the undesirable event |

| Item | Symbol | Description |
|---------------------------|---|---|
| Presumptive event |  | An action that is assumed because it appears logical in the sequence but cannot be proven |
| Causal factor |  | A factor that shaped the outcome of the situation, the root cause of the problem |
| Presumptive causal factor |  | A factor that is assumed as it appears to logically affect the outcome |
| Change |  | A change in the condition of the situation after an event have occurred |
| Barrier |  | Physical or administrative barrier to prevent an unwanted situation |
| Failed barrier |  | Physical or administrative barrier that failed to prevent an unwanted situation |

4. Análise de causa e efeito

- Após o mapeamento de toda a ocorrência, os investigadores têm uma boa posição para identificar os fatores causais.
- O diagrama ajudará a mostrar a relação de causa e efeito entre os fatores, mesmo se significativamente removidos uns dos outros no sistema.

5. Identificação da causa raiz

- Após identificar todos os fatores causais, a equipe inicia a identificação da causa raiz. Para isso, recorre-se ao uso de um diagrama “espinha de peixe”.
- Este diagrama estrutura o processo de raciocínio dos investigadores, ajudando-os a responder a perguntas sobre o porquê um fator causal específico existe ou ocorreu. Para cada evento, provavelmente haverá uma série de fatores causais. Para cada fator causal, provavelmente haverá uma série de causas raiz.

6. Avaliação da eficácia das ações corretivas

- A etapa final do processo é gerar recomendações para ações corretivas, levando em consideração as seguintes perguntas:
 - O que pode ser feito para evitar que o problema aconteça novamente?
 - Como a solução será implementada?
 - Quem será responsável por isso? e
 - Quais são os riscos de implementar a solução?

7. Geração de relatórios

- É importante relatar e documentar o processo RCA, incluindo uma discussão sobre ações corretivas, gestão e pessoal envolvido. Informações de interesse para outras instalações também devem ser incluídas no relatório. Esse documento inclui:
 - Definição do problema;
 - Gráfico de eventos e fatores causais;
 - Análise de causa e efeito;
 - Causa(s) raiz do problema;
 - Solução do problema; e
 - Plano de implementação com responsabilidades claras e acompanhamento.

Diagrama de Pareto

- Usado para classificar os modos de falha para ação usando NPR e para identificar a causa raiz.
- Um Diagrama de Pareto é um gráfico de barras feito de uma série de barras cujas alturas refletem a frequência de problemas ou causas. As barras são organizadas em ordem decrescente de altura da esquerda para a direita. Isso significa que os fatores representados pelas barras altas à esquerda são relativamente mais significativos do que aqueles à direita.
- Essa distribuição ajuda a separar os problemas para que os recursos e esforços sejam focados onde mais importa, visando a maximização de retorno.

Diagrama de Pareto

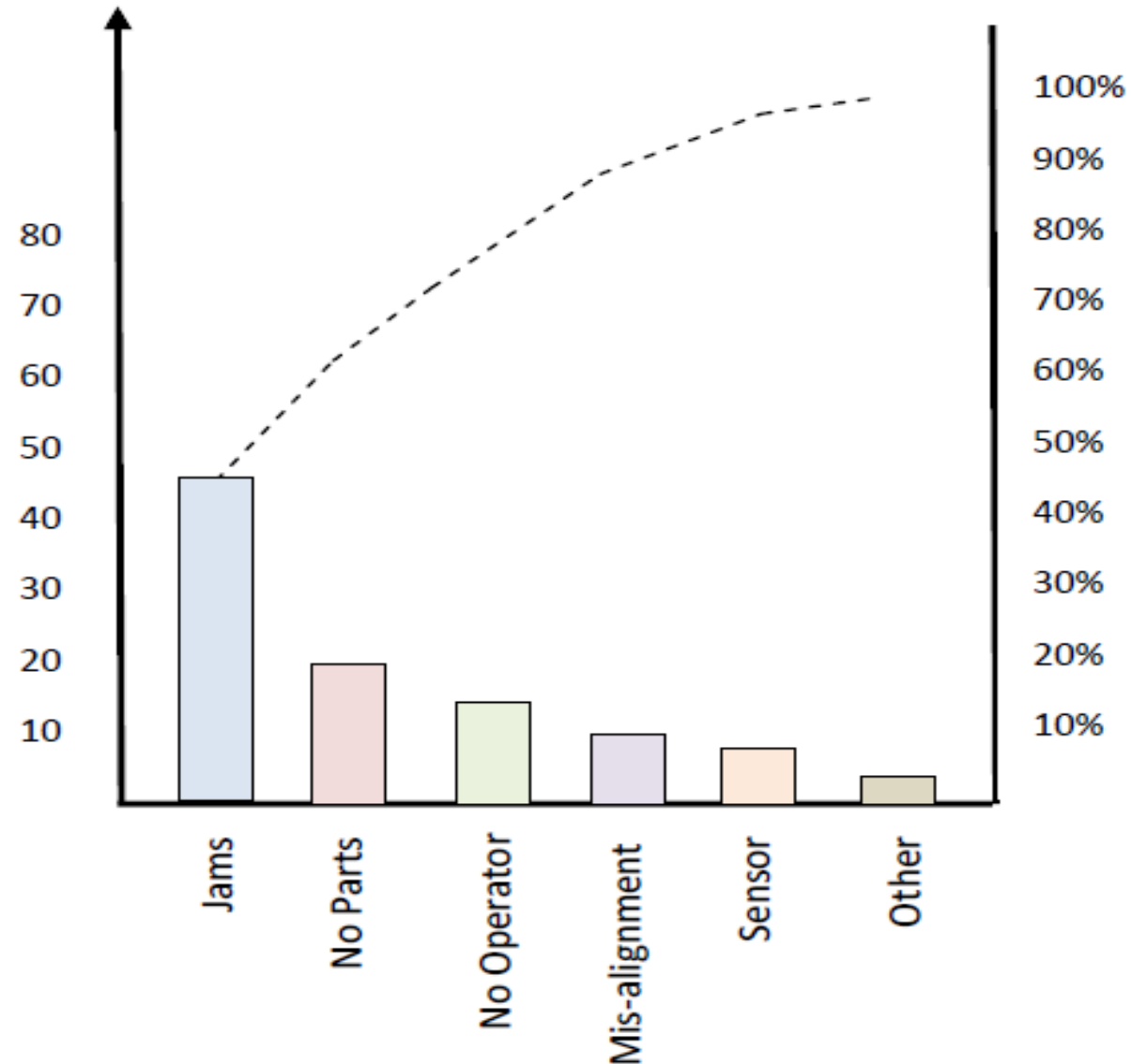


Diagrama de Causa e Efeito

- Usado para **identificação da causa raiz no RCA**.
- Ilustra graficamente a relação entre um determinado resultado e todos os fatores que influenciam o resultado.
- Esse tipo de diagrama também é chamado de “diagrama espinha de peixe” ou de “diagrama de Ishikawa”.

Diagrama de Causa e Efeito

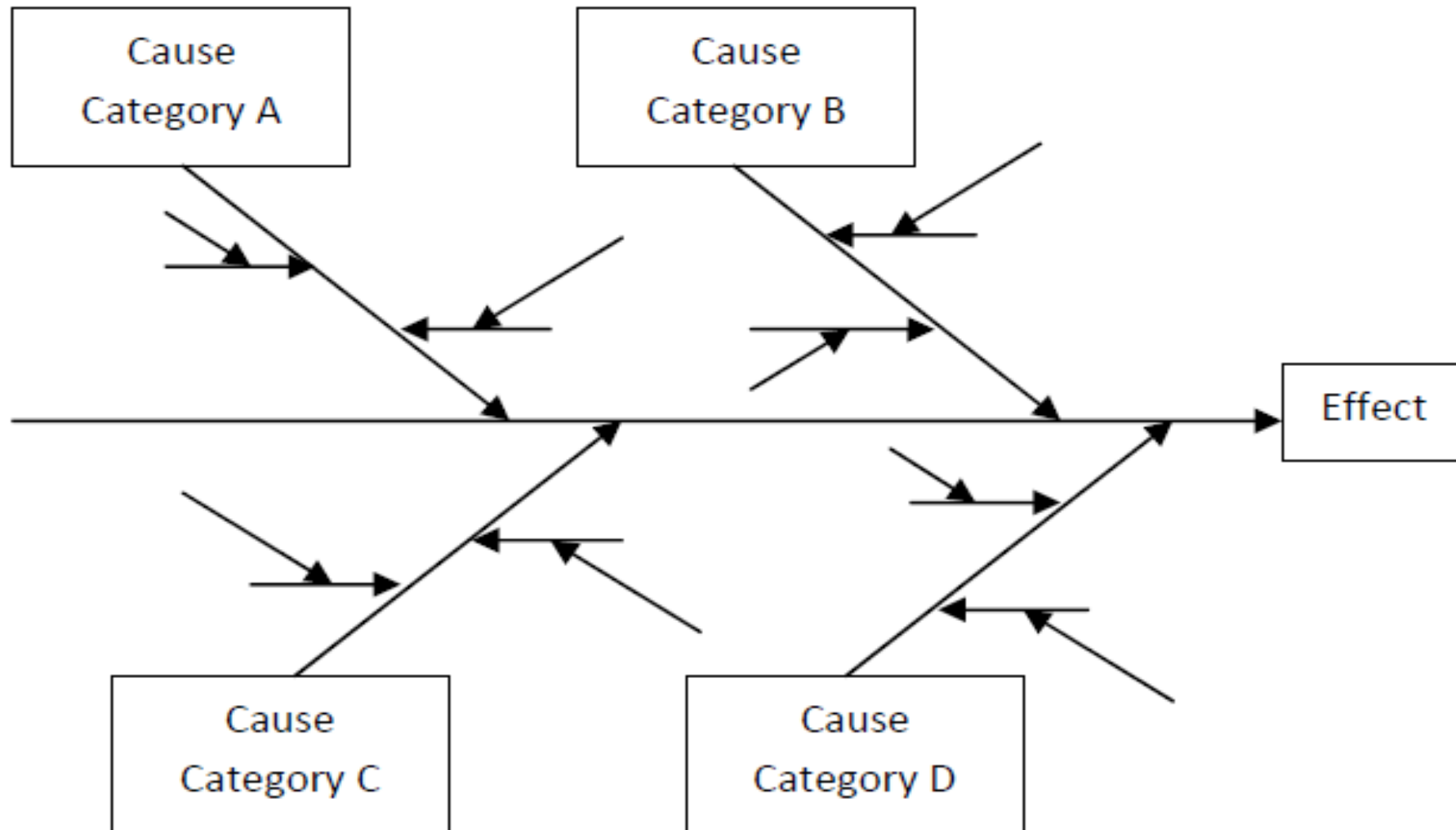


Diagrama de Causa e Efeito

- As etapas para construir e analisar um Diagrama de Causa e Efeito são descritas abaixo:
- 1. Identificação do problema ou efeito a ser analisado.
- 2. Desenhe a espinha dorsal e à direita da seta, escreva uma breve descrição do problema analisado
- 3. Identifique as principais causas que contribuem para o efeito considerando categorias, como:
 - Métodos, materiais, máquinas e pessoas (3Ms e P);
 - Políticas, procedimentos, pessoas e instalações (4Ps); e
 - Outro possível quinto fator significativo é o ambiente.

Diagrama de Causa e Efeito

- 4. Para cada ramo ou categoria principal, identifique outros fatores específicos que podem ser as causas do efeito sob essa categoria.
- 5. Analise o diagrama. A análise ajuda a identificar causas que justificam uma investigação mais aprofundada. Como os diagramas de causa e efeito identificam apenas causas possíveis, pode ser necessário usar um Diagrama de Pareto para ajudar a determinar as causas nas quais focar primeiro.

Diagrama de Causa e Efeito

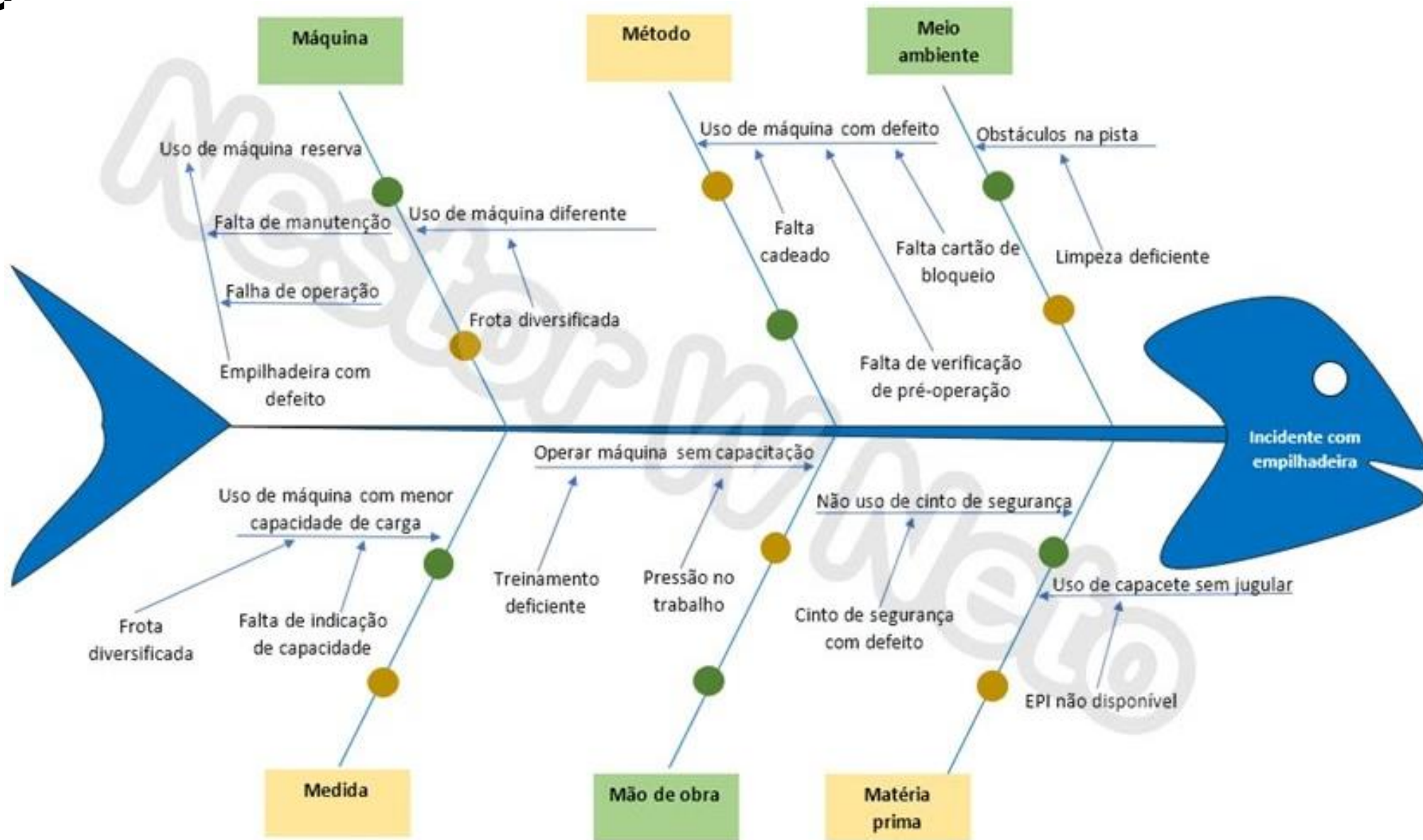
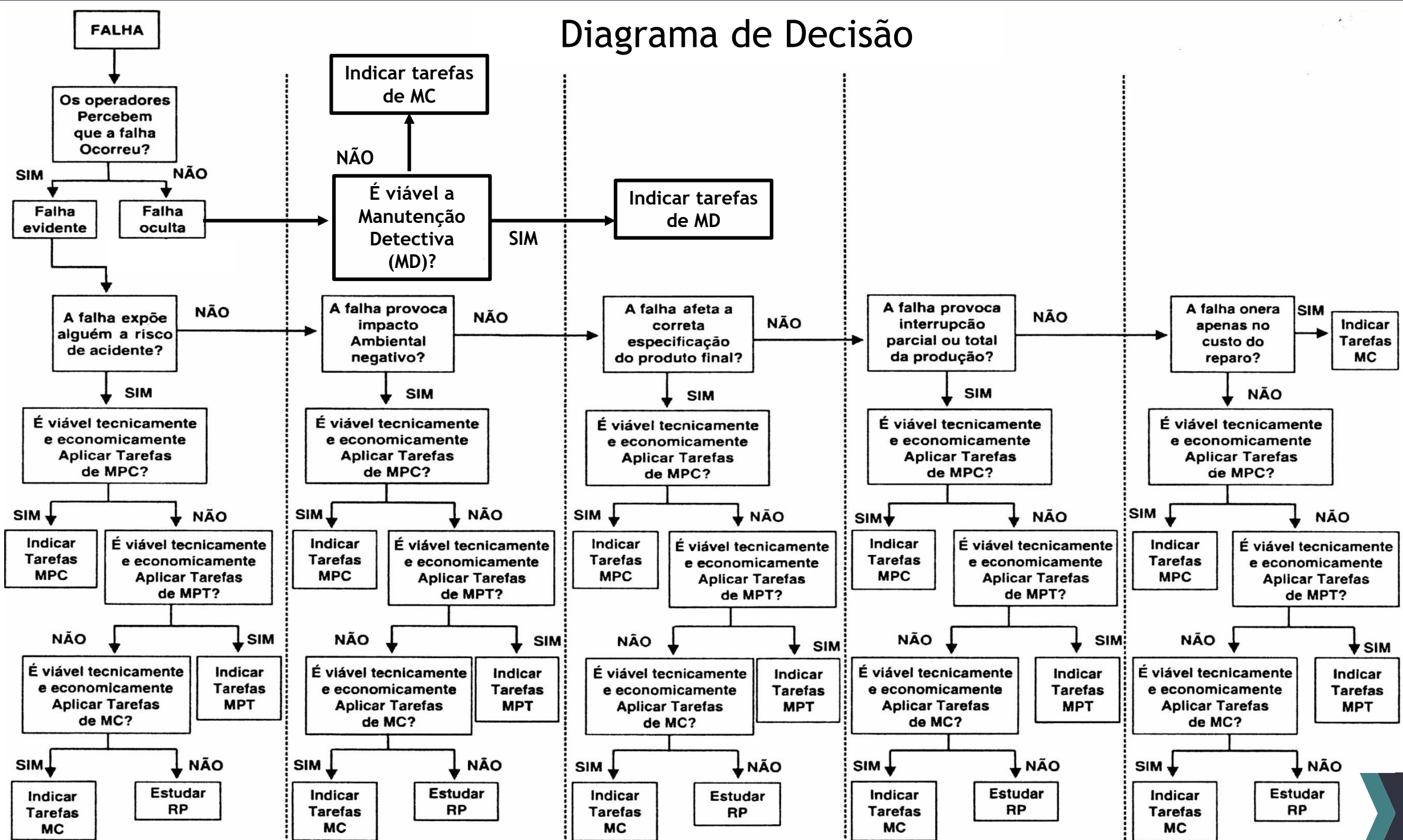


Diagrama de Decisão

- Usado para **gerar ações preventivas aplicáveis às falhas.**
- Viana [3], indica diferentes possibilidades de ações passíveis:
 - MPT – Manutenção preventiva baseada no tempo ou utilização do componente;**
 - MPC – Manutenção preventiva baseada na condição, com o monitoramento preditivo do componente;**
 - MC – Manutenção corretiva, intervir apenas depois da quebra;**
 - RP – Redefinição do projeto.**

Diagrama de Decisão



Referências

- [1] Pascu, Ileana; Paraschiv, D; Didu, Anca. Research about using the Failure Mode and Effects Analysis method for improving the quality process performance. 2020. 898. DOI - 10.1088/1757-899X/898/1/012037. Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [2] Ben-Daya, M. (2009). Failure Mode and Effect Analysis. In: Ben-Daya, M., Duffuaa, S., Raouf, A., Knezevic, J., Ait-Kadi, D. (eds) Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0_4
- [3] Viana, HRG. Planejamento e controle de Manutenção. 2002.
- [4] Mode, Effects and Criticality Analysis. US MIL_STD 1629 (1974), US MIL-STD 1629A (1980), US MIL-STD 1629A/Notice 2 (1984), Washington, DC.