

## **APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE FMEA PARA DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO EM BOMBAS: MITIGAÇÃO DE FALHAS E VAZAMENTOS**

### **Fábio Palma de Lima**

Engenheiro Mecânico com quase 30 anos de experiência na gestão e execução de projetos industriais de alta complexidade. É Doutorando em Tecnologia da Energia pelo Instituto de Energia e Ambiente da USP e Mestre em Tecnologia da Energia pelo IEE/USP, com pós-graduação em Engenharia de Manutenção. Atuou em projetos de grande porte para setores como Siderurgia, Papel e Celulose, e Mineração no Brasil e na América Latina, colaborando com empresas como Gerdau, Petrobras, Suzano, Bayer, SKF, Nexa, entre outras.

**Endereço:** Rua Ruy Martins – Alto da Mooca – São Paulo – SP – CEP: 03184-010 – Brasil – Tel: +55 (11) 99252-1100 - e-mail: [fabio.lima@almatec.eng.br](mailto:fabio.lima@almatec.eng.br)

### **RESUMO**

A Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) é uma metodologia sistemática de confiabilidade amplamente utilizada para identificar, avaliar e mitigar potenciais falhas em sistemas e equipamentos industriais. No contexto de bombas centrífugas, utilizadas em diversos segmentos industriais para transporte de fluidos, a aplicação da FMEA se destaca como uma ferramenta essencial para minimizar falhas operacionais e prevenir vazamentos, que podem comprometer a eficiência, a segurança e a sustentabilidade dos processos. Este estudo propõe a implementação da FMEA direcionada às bombas centrífugas, com foco especial na identificação dos modos de falha relacionados a vedação, rolamentos, alinhamento de eixo, desgaste de componentes internos e integridade estrutural. Através da análise sistemática de cada componente e função, é possível priorizar riscos, propor ações corretivas ou preventivas e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. O uso da FMEA permite uma abordagem proativa na manutenção, reduzindo custos associados a paradas não planejadas e mitigando impactos ambientais decorrentes de possíveis vazamentos. Os resultados esperados incluem a diminuição da frequência de falhas críticas e o aumento da vida útil das bombas, promovendo uma cultura organizacional de melhoria contínua e gestão eficaz de riscos operacionais.

**PALAVRAS-CHAVE:** FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falha), bombas centrífugas, falhas operacionais, prevenção de vazamentos, manutenção proativa, confiabilidade de equipamentos

### **1. INTRODUÇÃO**

A crescente necessidade de otimizar processos e aumentar a confiabilidade dos sistemas industriais tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de metodologias robustas de gestão de riscos. Nesse contexto, a FMEA tem se destacado como uma ferramenta essencial.

A FMEA é um método sistemático que possibilita a identificação precoce dos potenciais modos de falha em um equipamento ou processo, permitindo que se avaliem os efeitos dessas falhas e se implementem ações corretivas ou preventivas de maneira proativa.

Essa abordagem estruturada não apenas facilita uma compreensão detalhada dos pontos críticos de sistemas complexos, como no caso específico de bombas centrífugas, mas também contribui significativamente para a mitigação de falhas inesperadas, para a redução de custos com manutenção não planejada e, principalmente, para a prevenção de transtornos que possam afetar a segurança e a eficiência dos processos.

Ao considerar fatores como vedação, desgaste de componentes internos, rolamentos e integridade estrutural, a aplicação da FMEA torna-se indispensável na busca por soluções inovadoras no campo do saneamento e na promoção de um futuro mais sustentável.

Dessa forma, o presente estudo propõe um olhar sobre os modos de falha específicos desses equipamentos, destacando a importância de uma abordagem preventiva na manutenção e enfatizando o papel da inovação tecnológica na otimização dos sistemas de saneamento.

Essa investigação, portanto, proporciona uma visão integrada entre a análise dos riscos envolvidos e as oportunidades de melhoria contínua, destacando não somente os benefícios de uma manutenção baseada em dados e análises preditivas, mas também contribuindo para o fortalecimento de uma cultura organizacional voltada para a sustentabilidade e a eficiência operacional.

## **2. OBJETIVOS**

O presente estudo tem como proposta central a aplicação da metodologia FMEA no contexto de bombas centrífugas, visando o desenvolvimento de técnicas avançadas de inspeção e monitoramento preditivo.

Através desta abordagem, pretende-se proporcionar um ambiente de manutenção preventiva e correção de falhas que contribua para a minimização de riscos operacionais, a prevenção de vazamentos e a extensão da vida útil dos equipamentos, permitindo, assim, uma gestão mais segura, eficiente e sustentável dos processos industriais.

Dentro deste contexto, os objetivos deste trabalho podem ser divididos em:

### **2.1. Objetivo Geral**

Evidenciar a aplicabilidade da metodologia FMEA como ferramenta estratégica para o diagnóstico e mitigação de falhas em bombas centrífugas, de modo a fortalecer a confiabilidade operacional e a integridade de sistemas de bombeamento.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Estabelecer um perfil de riscos baseado na priorização dos potenciais modos de falha observados, a partir da definição de parâmetros críticos, tais como a ocorrência e os impactos das falhas.
- Identificar os principais modos de falha associados aos sistemas de vedação, rolamentos, alinhamento de eixos, desgaste de componentes internos e integridade estrutural das bombas.
- Propor ações corretivas e preventivas fundamentadas nos resultados da análise FMEA, contribuindo para a redução de paradas não programadas e dos impactos ambientais decorrentes de possíveis vazamentos.
- Desenvolver diretrizes de implementação de técnicas de monitoramento e inspeção preditiva, que possam integrar a metodologia FMEA a rotinas de manutenção, promovendo uma cultura organizacional voltada para a melhoria contínua e a gestão eficaz dos riscos.
- A definição destes objetivos estabelece uma base sólida para a subsequente discussão sobre as técnicas de monitoramento e inspeções preditivas, que serão abordadas nos capítulos seguintes deste artigo. Desta forma, espera-se que os resultados obtidos possam contribuir significativamente para a evolução dos métodos de manutenção, principalmente em sistemas de bombeamento, alinhando os processos industriais com as demandas atuais de sustentabilidade ambiental.

## **3. METODOLOGIA**

A metodologia consistiu, primeiramente, em uma revisão de literatura acerca das práticas e estudos existentes sobre a ferramenta FMEA em equipamentos em gerais e em bombas centrífugas.

Adicionalmente, o conhecimento prático do autor, adquirido ao longo de diversos projetos industriais, foi integrado para propor adaptações e soluções ao contexto estudado.

Desta forma, pode-se dizer que a combinação entre teoria e experiência prática garantiu uma abordagem realista e aplicada, fortalecendo a relevância dos resultados obtidos.

#### 4. CONTEXTO GERAL DE UM PROJETO DE CONFIABILIDADE

A intensa concorrência entre empresas obriga a busca contínua por eficiência operacional, redução de custos e diferenciação de produtos e serviços. Num mercado cada vez mais exigente, a capacidade de otimizar processos e manter elevados níveis de qualidade torna-se um diferencial competitivo essencial.

Nesse contexto, uma empresa, segundo Falconi (2002), é um sistema complexo e dinâmico, cujos objetivos macro devem ser desdobrados em metas individuais para todos os colaboradores. O alinhamento dessas metas com os objetivos organizacionais é crucial para a geração de resultados e o sucesso sustentável.

Na indústria, essa exigência traduz-se no aumento da produtividade das máquinas e no aprimoramento da qualidade dos produtos, de modo a garantir a competitividade em um cenário globalizado. Como consequência, o setor de manutenção passa a sofrer fortes cobranças para elevar a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos, ao mesmo tempo em que reduz os recursos financeiros empregados, sejam eles materiais ou humanos (LIMA & DIAS, 2008).

Diante desse desafio, as ações de manutenção visam otimizar o uso dos equipamentos, assegurando qualidade e produtividade. Além disso, os custos de manutenção revelam-se decisivos para o êxito da organização, tanto em ambientes competitivos internos quanto externos (TAVARES, CALIXTO & POYDO, 2005).

##### 4.1. Fluxo de um projeto de confiabilidade

Até pouco tempo atrás, os projetos industriais eram organizados em células funcionais, ao invés de um fluxo de trabalho integrado.

Exemplos desse modelo desconectado:

- A equipe de manutenção elaborava cronogramas de inspeção sem diálogo direto com operações.
- O departamento de qualidade conduzia auditorias independentes, quase sempre após a produção.
- A área de engenharia de processo só era envolvida quando já havia problemas crônicos de rendimento ou segurança.
- Operadores e técnicos de chão de fábrica recebiam instruções pontuais, sem participar do planejamento ou da análise de falhas.

Esse arranjo gerava:

- Gaps de comunicação entre áreas;
- Retrabalho e atrasos na tomada de ação;
- Visão fragmentada dos riscos e oportunidades de melhoria;
- Custos elevados de correção e paradas não planejadas.

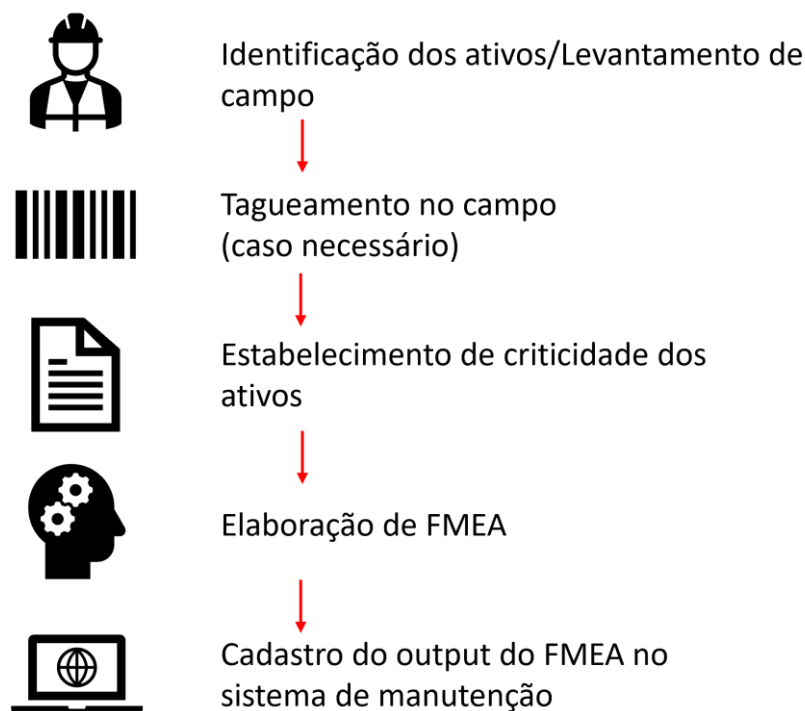
Desta forma, atualmente, pode-se afirmar que, o fluxo de um projeto de confiabilidade inicia-se com o levantamento de campo, etapa em que são identificados e mapeados todos os ativos envolvidos no processo. Em seguida, realiza-se a identificação (tag), atribuindo códigos únicos a cada equipamento para facilitar seu acompanhamento ao longo de toda a vida útil. Com os ativos devidamente identificados, passa-se ao estabelecimento de sua criticidade, classificando-os segundo o impacto de eventuais falhas na operação e no meio ambiente, integrando sempre que possível todas as áreas da empresa.

A partir dessa priorização, elabora-se a FMEA, que sistematiza os potenciais modos de falha, suas causas e consequências. Por fim, os resultados e recomendações gerados pela FMEA são cadastrados no CMMS<sup>1</sup>, garantindo o monitoramento contínuo e a implementação das ações corretivas ou preventivas. Esse fluxo estruturado, conforme a Figura 1, assegura uma abordagem proativa na gestão de riscos, elevando a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos.

---

<sup>1</sup> CMMS (Computerized Maintenance Management System) ou em português, Sistema de Gestão de Manutenção Computadorizado

Figura 1 – Fluxo de um projeto de confiabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos sub-capítulos a seguir, detalha-se individualmente cada um dos itens abordados no presente estudo.

#### 4.2. Levantamento de campo, identificação dos ativos

O levantamento de campo é a etapa fundamental que dá início a qualquer projeto de confiabilidade, pois é nela que se coletam as informações que vão sustentar todo o planejamento de manutenção e de gestão de riscos. Em especial, quando falamos de bombas centrífugas (Figura 2), um detalhamento minucioso, desde a identificação dos ativos até as condições reais de operação. No caso de bombas centrífugas é imprescindível, que conste no levantamento as seguintes características:

- Registro da potência do motor (kW ou HP), fator de serviço, eficiência (IE2, IE3) e grau de proteção (IP), se os rolamentos são vedados ou devem ser novamente lubrificados por dado intervalo de lubrificação.
- Descrição do tipo de vedação:
  - Selo mecânico (simples ou duplo), materiais (carbono, cerâmica, elastômero) e pressão de trabalho máxima.
  - Gaxeta: tipo de fibra, quantidade de anéis e sistema de lubrificação (lanolina ou água).
- Detalhamento do acoplamento e do alinhamento: tipo de acoplamento (flexível, elástico, rígido), método de alinhamento (laser, relógio comparador) e tolerâncias permitidas.
- Dados do fluido ou óleo lubrificante da bomba.
- Listagem dos instrumentos associados: manômetros (faixa, escala e ponto de instalação em sucção e recalque), termômetros, se existem acelerômetros (medidores de vibração) e temperatura dos mancais.
- Inventário de acessórios e componentes auxiliares: juntas de vedação e O-rings compatíveis com o fluido, válvulas manuais de bloqueio (gaveta, esfera), válvulas de retenção, filtros de sucção, painéis de comando, suportes e bases antivibratórias.

- Registro das condições de operação: altura manométrica de sucção e recalque, vazão nominal e real, temperatura, viscosidade, pH e teor abrasivo do fluido bombeado.
- Dispositivos de bloqueio, como válvulas manuais ou de retenção.
- Base do equipamento
- Se existem proteções quanto a norma NR-12, entre outros itens.

Figura 2 – Exemplo de bombas centrífugas instaladas em indústria



Fonte: Do acervo técnico do autor

#### 4.3. Hierarquização e identificação (via tags)

A hierarquização de equipamentos, seguindo a norma ISO 14224, organiza os ativos de uma planta em uma estrutura lógica para padronizar a coleta de dados de manutenção e confiabilidade.

Conforme ilustrado na Figura 3, essa taxonomia organiza os ativos em níveis hierárquicos. Os mais relevantes são:

- Unidade de Processo: Uma seção da planta com função específica (exemplo: Unidade de Craqueamento).
- Sistema: Conjunto de equipamentos que executam uma função (exemplo: Sistema de Compressão).
- Unidade de Equipamento (TAG): O ativo individual principal para análise de falhas (exemplo: Compressor K-101A).
- Componente: Parte funcional que pode ser reparada ou substituída (exemplo: motor elétrico, selo mecânico).
- Sobressalente ou peça: Item de consumo que compõe um componente (exemplo: rolamento, parafuso).

Essa estrutura detalhada é a base para um sistema de gerenciamento (CMMS) eficaz, permitindo análises de confiabilidade precisas e a otimização de custos.

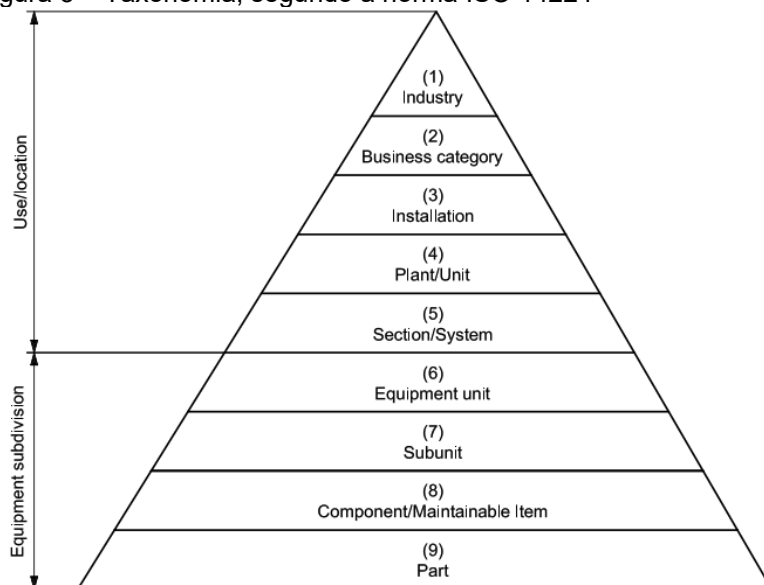
Essa organização facilita a gestão da manutenção, a alocação de recursos e a rastreabilidade.

Após essa etapa, realiza-se a identificação (tag), atribuindo códigos únicos e padronizados a cada ativo, conforme normas internacionais, assegurando integração entre documentação técnica e sistemas de manutenção.





Figura 3 – Taxonomia, segundo a norma ISO 14224



Fonte: ISO 14224.

#### 4.4. Estabelecimento de criticidade dos ativos

Antes mesmo da elaboração da matriz de criticidade dos ativos, é fundamental abordar o conceito de risco. A análise de risco fornece a base para decisões estratégicas, permitindo priorizar ações de manutenção com foco na mitigação de falhas com maior impacto operacional, ambiental ou de segurança.

Risco pode ser definido pela Equação 1.

**Risco = Probabilidade de Ocorrência x Consequência**

equação (1)

Onde:

Probabilidade de Ocorrência:

Refere-se à chance de um determinado evento indesejado ocorrer. Em geral, este parâmetro é representado por uma escala qualitativa como: alta, média ou baixa. Vale destacar que, na ausência de um histórico confiável de falhas, a estimativa da probabilidade torna-se uma das etapas mais desafiadoras da análise de risco.

Consequência do Risco:

Corresponde ao impacto potencial caso o risco se concretize. Não se trata da descrição detalhada do evento, mas sim da gravidade do seu efeito sobre o processo produtivo, também classificado em escalas qualitativas (alta, média ou baixa). Esse parâmetro é essencial para definir a criticidade do ativo ou sistema analisado.

Ainda, de acordo com Lafraia (2001), risco pode ser definido como:

“Em termos gerais, o conceito de risco está intimamente relacionado à presença de situações indesejáveis, sob o ponto de vista do usuário do sistema, produto ou equipamento. Se estas situações indesejáveis implicarem em risco de vidas humanas e/ou prejuízo econômico-financeiro de elevado valor, devem ser adotados esforços adicionais no sentido de minimizar ou mesmo evitar situações quando possível”.

Em relação a percepção de criticidade dos equipamentos pode variar significativamente entre os diferentes setores de uma planta industrial. Para a operação, o foco tende a recair sobre gargalos produtivos ou equipamentos cuja falha implique em grandes impactos operacionais ou ambientais. Já para a manutenção, os equipamentos mais críticos são aqueles de difícil acesso, com manutenção complexa ou peças de reposição com alto *lead time*. Engenharias, qualidade e segurança também trarão perspectivas distintas, tornando subjetiva a definição sem um critério estruturado.

Por isso, é essencial o uso de ferramentas formais, como a matriz de criticidade, que considera dois principais fatores: probabilidade de falha e consequência, ponderando-os com base em critérios organizacionais como segurança, meio ambiente, produção, qualidade e custo. A partir dessa avaliação, obtém-se o perfil de criticidade da planta.

Além da matriz (Figura 4), também é possível classificar os ativos por meio de algoritmos ou fluxogramas/matriz de decisão, que atribuem notas a critérios definidos, classificando os ativos em categorias (por exemplo, A, B ou C), conforme o grau de criticidade.

Figura 4 – Exemplo de matriz de criticidade

Descrição da Consequência da Falha						
Criticidade	Meio Ambiente	Segurança & Saúde Ocupacional	Qualidade	Disponibilidade	Produção	Custo
<b>Extremamente Alta</b>	Violação de Legislação Contaminação Ambiental fora dos limites da empresa	Risco de fatalidade ou lesão irreversível	Produto fora das especificações. Parar o processo imediatamente	Intervenção de Manutenção compromete a operação num período maior que 8 horas	Não é possível produzir	Custo de Reparo Superior a 5 k BRL
<b>Alta</b>	Contaminação se restringe ao site, mesmo havendo violação de legislação	Risco de Acidente Leve	Processo apresenta variações. Raros desvios fora das especificações	Intervenção de Manutenção compromete a operação num período de 2 a 8 horas	Diminuição maior que 5% na ritmo normal de produção	Custo de Reparo Superior entre 2 e 5 k BRL
<b>Media</b>	Não há violação da legislação. O impacto ambiental pode ser controlado internamente	Risco Moderado. Necessário Adaptação no Processo	Processo apresenta variações porém ainda dentro das especificações	Intervenção de Manutenção compromete a operação do sistema em até 2 horas	Diminuição de ritmo de até 5% da produção normal	Custo de Reparo menor que 2 k BRL
<b>Baixa</b>	Não há impacto Ambiental	Não há risco de segurança e saúde ocupacional	Sem impacto na Qualidade do produto	Não há descontinuidade operacional	Sem restrição de produção	Não há custo de reparo direto, apenas mão de obra de ação da manutenção

Fonte: Lima (2022).

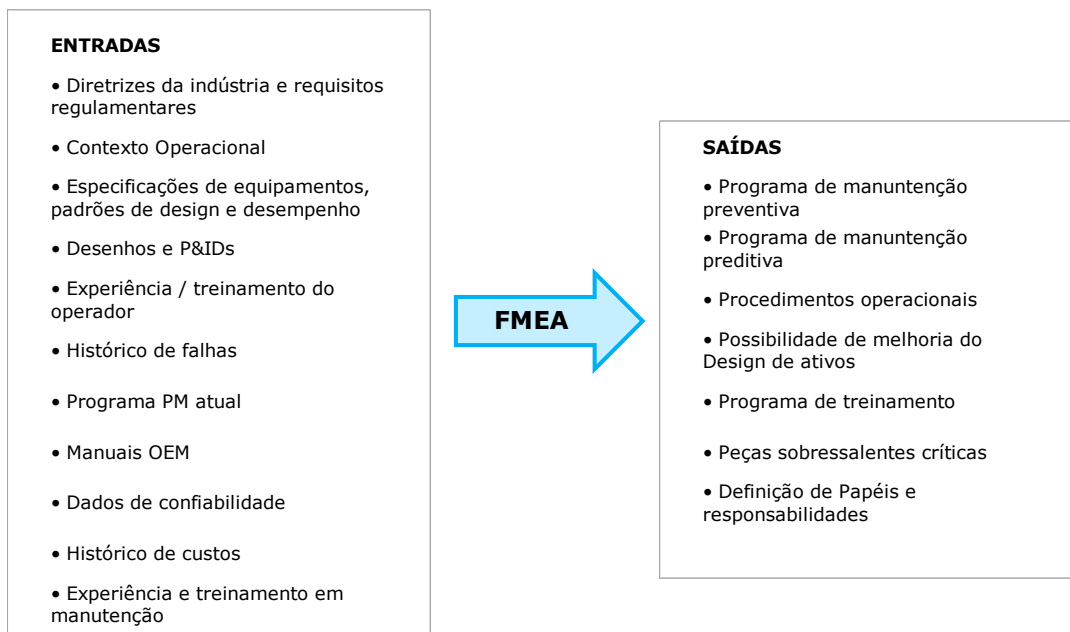
#### 4.5. Elaboração de FMEA

A FMEA tem sido amplamente adotado na manutenção industrial devido à sua efetividade na identificação de falhas potenciais e na definição de ações preventivas. Essa metodologia permite propor medidas que, uma vez implementadas, reduzem a probabilidade de ocorrência de falhas, aumentando a confiabilidade dos ativos e, consequentemente, a rentabilidade do processo.

Além disso, existe também o objetivo de estabelecer tarefas de manutenção apropriadas para cada modo de falha identificado, considerando suas causas, consequências e a frequência com que podem ocorrer. Dessa forma, é possível planejar intervenções mais eficazes e alinhadas ao risco operacional.

A seguir, na Figura 5, apresenta-se um diagrama esquemático ilustrando as principais entradas de um processo FMEA, bem como suas saídas, ou seja, os resultados esperados da aplicação da ferramenta.

Figura 5 – Diagrama esquemático gerencial de entradas e saídas da Análise de FMEA

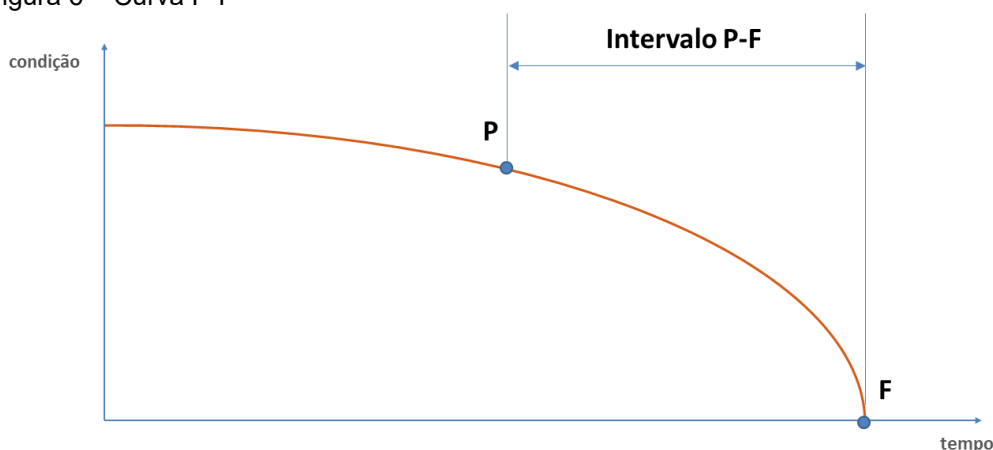


Fonte: Lima (2022).

#### 4.5.1. Definições de Falha e Defeito

Segundo a NBR 5462, falha é a perda da capacidade de um item cumprir sua função, geralmente ocasionando a parada do processo. Já defeito é um desvio em relação aos requisitos, que ainda permite o funcionamento do equipamento. A Curva P-F (Figura 6) ilustra a evolução dos defeitos ao longo do tempo até a ocorrência da falha total, definindo o intervalo P-F como o período entre o primeiro defeito detectável e a falha funcional.

Figura 6 – Curva P-F



Fonte: elaborado pelo autor, através de Moubray (1991).

Com base no conceito da Curva P-F, introduzido por Moubray, a manutenção preditiva visa detectar falhas potenciais antes que evoluam para falhas funcionais. Segundo a NBR 5462, trata-se de uma estratégia que utiliza técnicas de monitoramento e análise para minimizar intervenções corretivas e preventivas desnecessárias.

Ao acompanhar parâmetros operacionais por meio manutenção instrumentada, é possível identificar defeitos em estágios iniciais e agir proativamente. Exemplos de técnicas incluem:

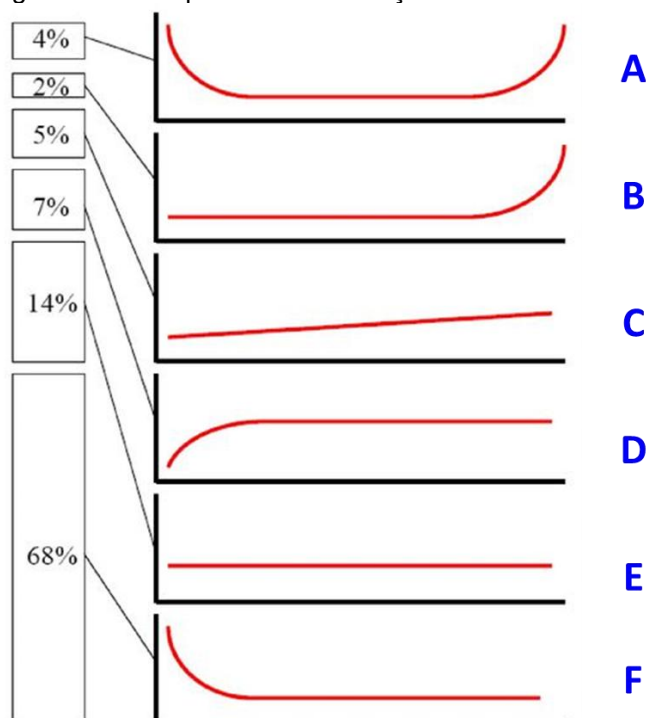


- Análise de vibração
- Termografia
- Análise de óleo
- Ultrassom

#### 4.5.2. Curva da banheira

A curva da banheira representa as fases do ciclo de vida de um equipamento ou componente. Apesar de existirem variações desse modelo, o gráfico é popularmente conhecido por esse nome devido ao seu formato característico, que lembra o perfil de uma banheira, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Exemplos com as variações Curva da Banheira



Fonte: (MOUBRAY, 1991).

Na aviação civil, por exemplo, apenas 4% das falhas seguem a curva da banheira tradicional; a maioria (68%) apresenta falhas aleatórias, conforme o padrão da curva F. Esse comportamento, especialmente comum em componentes eletroeletrônicos, torna a manutenção preventiva pouco eficaz nesse contexto (LAFRAIA, 2001).

#### 4.5.3. Exemplo de FMEA para mitigação de falhas em bombas centrífugas

A seguir, na Tabela 1, apresenta-se um exemplo aplicado da metodologia FMEA para bombas industriais. A tabela ilustra modos de falha típicos, suas causas, efeitos e ações recomendadas. Esse modelo permite priorizar intervenções e aumentar a confiabilidade do sistema.

Tabela 1 – Exmeplo de aplicação para FMEA em bombas centrífugas

Tipo de Componente	Função	Modo de falha	Efeito da Falha	Critic	Causa da falha	atividade	Frequência	Responsável
Tubulação	Conduzir fluido de resfriamento	Vazamentos	Afeta produção	6	Corrosão	Inspeccionar as tubulações de entrada de água para identificar presença de vazamentos.	DIÁRIA	O
Manômetro	Medir e informar pressão ao operador	Falha de indicação	Afeta produção	8	Falta de calibração	Calibrar manômetro.	ANUAL	Empresa Parceira
Conjunto de válvulas	Abrir/fechar fluxo	Vazamentos	Afeta produção	8	Falha vedação	Inspeccionar visualmente as válvulas gaveta da torre de resfriamento em busca de vazamentos, garantindo a estanqueidade e a eficiência do sistema de controle de fluxo.	DIÁRIA	O
Conjunto de válvulas	Abrir/fechar fluxo	Vazamentos	Afeta produção	6	Falta/falha de lubrificação	Lubrificar fuso e partes móveis da(s) válvula(s) gaveta, conforme especificações do fabricante.	TRIMESTRAL	M
Motor elétrico	Fornecer movimento	Vibração	Afeta produção	12	Folga	Medir vibração do equipamento.	MENSAL	Inspetor
Motor elétrico	Fornecer movimento	Falha do circuito de força	Afeta produção	6	Sujeira	Efetuar limpeza da ventoinha do motor, e examinar integridade física.	ANUAL	E
Motor elétrico	Fornecer movimento	Vibração	Afeta produção	9	Desalinhamento	Conferir preventivamente alinhamento do motor (x) bomba com alinhador a laser.	ANUAL	M
Motor elétrico	Fornecer movimento	Travamento	Afeta produção	10	Falta/falha de lubrificação	Lubrificar rolamentos do motor.	ANUAL	M
Motor elétrico	Fornecer movimento	Falha do circuito de força	Afeta produção	4	Mau contato	Conferir aperto dos parafusos das conexões da caixa de ligação do motor.	2 ANOS	E
Motor elétrico	Fornecer movimento	Falha do circuito de força	Afeta produção	12	Baixa isolamento	Megar preventivamente o motor.	2 anos	E
Acoplamento	Acoplar sistemas	Baixo desempenho	Afeta produção	6	Desgaste	Inspeccionar regularmente o acoplamento identificar presença de folgas, sinais de desgaste, trincas/fissuras ou degradação do	TRIMESTRAL	M
Proteção NR-12	Proteger pessoas	Fora da posição de trabalho	Condição insegura	4	Falha de fixação	Inspeccionar a proteção NR-12 quanto a fixação e sua correta posição de trabalho. Reapertar parafusos, caso necessário.	TRIMESTRAL	M
Bomba	Bombear água de resfriamento	Vazamentos	Afeta produção	6	Falha vedação	Inspeccionar bomba em relação a vazamentos.	DIÁRIA	O
Bomba	Bombear água de resfriamento	Travamento	Afeta produção	8	Falta/falha de lubrificação	Conferir nível de óleo. Caso esteja abaixo, comunicar equipe da manutenção.	MENSAL	M
Bomba	Bombear água de resfriamento	Vazamentos	Afeta produção	6	Falha vedação	Ajustar gaxeta e monitorar a taxa de vazamento nas válvulas gaveta, não excedendo 4 a 5 gotas por minuto, para assegurar vedação eficaz e operação dentro dos padrões aceitáveis.	TRIMESTRAL	M
Bomba	Bombear água de resfriamento	Travamento	Afeta produção	8	Falta/falha de lubrificação	Substituir óleo do bomba. Analisar qualitativamente o óleo extraído, investigando pela presença de contaminação por água. Em caso	SEMESTRAL	M
Junta de expansão	Absorver movimentos e prevenir vazamentos	Vazamentos	Afeta produção	4	Fadiga	Inspeccionar periodicamente a junta de expansão das bombas da torre de resfriamento para identificar sinais de desgaste, fissuras ou vazamentos,	TRIMESTRAL	M
Válvula de retenção	Permitir fluxo unidirecional, prevenindo retorno de	Vazamentos	Afeta produção	2	Fadiga	Inspeccionar válvula(s) de retenção de modo a garantir operação correta e livre de obstruções, mantendo a eficiência do sistema e prevenindo o	ANUAL	M

Fonte: elaborado pelo autor

A análise dos dados evidencia que as falhas em componentes críticos, como motores elétricos, bombas e válvulas, impactam diretamente a produção, sendo a vibração, vazamentos e falhas de lubrificação os modos de falha mais recorrentes e críticos. A frequência das atividades de inspeção e manutenção varia de diária a bienal, demonstrando a necessidade de um monitoramento contínuo e multifacetado para garantir a confiabilidade do sistema. A atribuição clara de responsabilidades entre operação, manutenção e fornecedores parceiros reforça a organização das ações preventivas. Além disso, destaca-se a importância da manutenção preditiva em motores, com medições específicas como análise de vibração e isolamento, que ajudam a antecipar falhas graves. A padronização das tarefas, aliada à sistematização dos registros, contribui para a sustentabilidade operacional e a redução de impactos negativos na produção.

#### **4.6. Cadastro do output da FMEA no sistema de manutenção**

O cadastro dos resultados da FMEA no sistema de manutenção (CMMS) é essencial para garantir que as ações corretivas e preventivas sejam rastreáveis e executadas conforme o planejado. Esse registro facilita o acompanhamento das tarefas, a atualização da criticidade dos ativos e a melhoria contínua da estratégia de manutenção.

### **5. RESULTADOS OBTIDOS**

A aplicação da FMEA em bombas industriais resultou em ganhos significativos em termos de organização da manutenção, padronização de ações e aumento da confiabilidade operacional. Houve redução de paradas não programadas, melhor planejamento de sobressalentes e reforço na rastreabilidade das falhas. Indiretamente, esses avanços também contribuíram para maior eficiência energética e sustentabilidade do processo, além de otimizações pontuais de custos.

### **6. REPLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA OUTRAS FAMÍLIAS DE EQUIPAMENTOS**

Importante dizer que a replicação da metodologia FMEA para outras famílias de equipamentos é também altamente recomendada, uma vez que o processo estruturado de identificação e priorização de falhas pode ser adaptado a diferentes contextos operacionais. Com a base já desenvolvida para as bombas, torna-se mais ágil aplicar a abordagem a compressores, trocadores de calor, ventiladores, vasos de pressão, painéis elétricos, entre outros, promovendo padronização, melhoria contínua e fortalecimento da cultura de confiabilidade em toda a planta.

### **7. CONCLUSÕES**

A aplicação da FMEA em bombas revelou-se uma ferramenta eficaz e estratégica para a identificação e mitigação de riscos associados a falhas, elevando significativamente a confiabilidade e a eficiência operacional dos ativos. Ao possibilitar um diagnóstico detalhado dos modos de falha, suas causas e consequências, o método permitiu um planejamento mais preciso e direcionado das intervenções de manutenção, reduzindo paradas não programadas e aumentando a disponibilidade dos equipamentos. Além disso, contribuiu para a padronização e organização das atividades de manutenção, facilitando a comunicação entre equipes e a gestão do conhecimento técnico. Indiretamente, esses benefícios também impactaram positivamente a sustentabilidade do processo, com melhor uso dos recursos e redução do desperdício. Assim, a metodologia se consolida como uma abordagem fundamental para a gestão confiável dos ativos industriais, podendo ser replicado e adaptado para outras famílias de equipamentos, ampliando seu valor na melhoria contínua dos sistemas produtivos.

### **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. FALCONI, Vicente. Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia. INDG Tecnologia e Serviços, 2002.

2. ISO 14224. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries. Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment. 2016.
3. LAFRAIA, João Ricardo Barusso. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Qualitymark Editora Ltda. 2001.
4. LIMA, Fábio Palma. Apostila de FMEA – SKF. São Paulo. 2022.
5. LIMA, Fábio Palma; DIAS, Marcelo Coldebella. Votorantim Siderurgia – Unidade Barra Mansa: Metodologias para definição da estratégia de manutenção. Apresentado no 9º Seminário Brasileiro de Manutenção e Confiabilidade, Instituto de Engenharia, São Paulo, 22 out. 2008.
6. MOUBRAY, John. Reliability-centered maintenance. Industrial Press Inc., 2001.
7. TAVARES, Lourival Augusto; CALIXTO, Marco; POYDO, Paulo Roberto. Manutenção centrada no negócio. 1ª edição. Rio de Janeiro: NAT, 2005.