APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FTA NA ANÁLISE DE VAZAMENTOS E FALHAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS EM SISTEMAS DE SANEAMENTO

Fábio Palma de Lima
Engenheiro mecânico com cerca de 30 anos de experiência na gestão e na execução de projetos industriais de alta complexidade. É doutorando e mestre em Tecnologia da Energia pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP) e pós-graduado em Engenharia de Manutenção. Ao longo de sua trajetória, atuou em projetos de grande porte nos setores de siderurgia, papel e celulose e mineração, no Brasil e em outros países da América Latina, em colaboração com empresas como Gerdau, Petrobras, Suzano, Bayer, SKF e 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

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia Fault Tree Analysis (FTA) na análise de vazamentos e falhas em bombas centrífugas empregadas em sistemas de saneamento. Esses equipamentos participam de etapas de captação, recalque e distribuição, e suas falhas podem comprometer a operação, elevar custos de manutenção e provocar paralisações não programadas. A FTA é um método de análise dedutiva que parte da definição de um evento topo e desdobra, por relações lógicas, os eventos intermediários e básicos que podem levar à sua ocorrência. Neste estudo, o evento topo está associado à ocorrência de vazamentos e à perda de desempenho das bombas. A partir dessa definição, a árvore de falhas é estruturada com base em causas relacionadas à vedação, rolamentos, desalinhamento, cavitação, desgaste de componentes, falhas de montagem, operação fora das condições previstas e práticas de manutenção. A aplicação da metodologia permite identificar combinações de falhas, apoiar a priorização de causas e subsidiar ações de inspeção, monitoramento e manutenção. Como resultado, espera-se contribuir para a redução da recorrência de falhas, a mitigação de vazamentos e o aprimoramento da gestão de riscos em sistemas de saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: FTA (análise da árvore de falhas); bombas centrífugas; mitigação de vazamentos; confiabilidade operacional; sistemas de saneamento.

1. INTRODUÇÃO

A análise de confiabilidade e desempenho operacional de sistemas de saneamento pode ser realizada por diferentes metodologias, utilizadas para identificar falhas, estimar a probabilidade de ocorrência de eventos indesejados e apoiar a tomada de decisão em manutenção e operação.
Entre essas metodologias, a Fault Tree Analysis (FTA), ou Análise por Árvore de Falhas, é empregada na investigação de eventos críticos por permitir a representação lógica das causas que podem levar à ocorrência de uma falha de sistema.
A FTA é uma técnica analítica de abordagem dedutiva, estruturada a partir da definição de um evento topo, que representa a falha ou anormalidade. A partir desse evento, a análise é desenvolvida em sentido top-down, buscando responder a quais condições falhas isoladas ou combinações de eventos podem levar à sua ocorrência.
Essa construção permite decompor o problema em eventos intermediários e eventos básicos, organizados por relações lógicas, o que favorece a visualização dos caminhos de falha e o entendimento das interdependências entre as possíveis causas, podendo dessa forma chegar a uma ou mais causas raiz.
No caso das bombas centrífugas aplicadas a sistemas de saneamento, a utilização da FTA é pertinente porque esses equipamentos participam de etapas de captação, recalque, adução e distribuição, e sua indisponibilidade pode afetar a continuidade operacional do sistema.
Falhas como vazamentos, perda de desempenho hidráulico, vibração, cavitação, falhas de vedação, desgaste de componentes, desalinhamento e defeitos em rolamentos estão entre os eventos que podem ser analisados por essa metodologia, permitindo relacionar a falha observada aos seus fatores causais.

Essa característica amplia o uso da metodologia, pois permite não apenas mapear causas, mas também apoiar a priorização de pontos críticos do sistema.
Neste contexto, o presente trabalho propõe a aplicação da metodologia FTA na identificação de modos de falhas em bombas centrífugas de sistemas de industriais/saneamento, com o objetivo de estruturar logicamente os mecanismos causais associados ao evento analisado e fornecer subsídios para ações de inspeção, monitoramento e manutenção.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como proposta central a aplicação da metodologia FTA no contexto de vazamentos e falhas em bombas centrífugas, com foco na estruturação lógica das causas que podem levar à ocorrência de eventos indesejados. Por se tratar de uma técnica de análise dedutiva, a FTA permite partir de um evento topo previamente definido e desdobrá-lo em eventos intermediários e básicos, tornando possível identificar combinações de falhas associadas a aspectos operacionais, mecânicos e de manutenção.
A utilização dessa metodologia busca fornecer subsídios para a compreensão dos mecanismos causais envolvidos nas falhas em sistemas de bombeamento, contribuindo para o direcionamento de ações de inspeção, monitoramento e manutenção. Nesse contexto, a análise proposta pretende apoiar a redução da recorrência de falhas e a prevenção de vazamentos, além de favorecer o aprimoramento da confiabilidade operacional das bombas centrífugas aplicadas ao saneamento.
Dentro dessa perspectiva, os objetivos deste trabalho são apresentados a seguir.

2.1 Objetivo Geral

Aplicar a metodologia FTA na análise de possíveis falhas em bombas centrífugas, com o propósito de estruturar as relações de causa e efeito associadas ao evento analisado e apoiar ações de inspeção, monitoramento e manutenção.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir um evento topo relacionado à ocorrência de vazamentos e falhas em bombas centrífugas, delimitando o escopo da análise.
- Identificar os eventos intermediários e básicos associados ao problema analisado, considerando fatores relacionados à vedação, rolamentos, desalinhamento, cavitação, desgaste de componentes, operação e manutenção.
- Estruturar a árvore de falhas a partir das relações lógicas entre os eventos identificados, de modo a representar os caminhos que podem levar ao evento topo.
- Subsidiar ações de inspeção, monitoramento e manutenção com base na análise desenvolvida, visando à redução da recorrência de falhas e à prevenção de vazamentos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa consistiu, inicialmente, em uma revisão de literatura sobre a aplicação da FTA em estudos de confiabilidade, segurança e análise de falhas em sistemas industriais, com ênfase em bombas centrífugas. Essa etapa teve como finalidade reunir os fundamentos conceituais da metodologia, bem como identificar formas de aplicação da árvore de falhas na investigação de eventos indesejados, como vazamentos e perda de desempenho operacional.
Em complemento, foi considerado o conhecimento prático do autor, desenvolvido ao longo da atuação em projetos e atividades relacionadas a sistemas de bombeamento, manutenção e análise de falhas. Essa experiência foi utilizada como apoio para a definição do evento topo, para a identificação de eventos intermediários e básicos e para a organização das relações lógicas entre as possíveis causas associadas às falhas analisadas.
A partir desse referencial teórico e prático, a metodologia foi estruturada com base na construção de uma árvore de falhas aplicada ao contexto de bombas centrífugas, contemplando aspectos relacionados à vedação, rolamentos, desalinhamento, cavitação, desgaste de componentes, condições operacionais e práticas de manutenção.
Dessa forma, a combinação entre literatura técnica e experiência aplicada permitiu desenvolver uma análise compatível com a realidade operacional do sistema estudado e coerente com os objetivos propostos no trabalho.

4. FUNDAMENTOS DA METODOLOGIA FTA

A FTA é uma ferramenta analítica baseada em uma árvore lógica, cuja finalidade é mapear o encadeamento entre um modo de falha ou evento topo e as diversas causas que contribuíram para sua ocorrência (FDG, 2001). Trata-se de uma abordagem aplicada ao estudo de falhas em sistemas, permitindo representar de forma estruturada as relações entre eventos indesejados e seus fatores causais.

Do ponto de vista histórico, os estudos de confiabilidade ganharam destaque inicialmente na indústria aeronáutica, especialmente após a Primeira Guerra Mundial. Posteriormente, na década de 1960, os Laboratórios Bell desenvolveram o conceito de Análise da Árvore de Falhas para um projeto da Força Aérea Americana. Em seguida, a Boeing passou a utilizar amplamente a FTA em estudos voltados à eliminação de falhas no trem de pouso de aeronaves. Em razão dos resultados obtidos, a técnica foi incorporada por outros segmentos industriais, como os setores automobilístico, nuclear e químico (LIMA et al., 2006).

A Figura 1, a seguir, apresenta, de forma esquemática, o fluxo básico da árvore de falhas, com o encadeamento lógico dos eventos. A construção parte da falha do sistema, definida como evento topo, e se desdobra em uma sequência de eventos que podem conduzir à sua ocorrência.

Figura 1 – Estrutura básica do fluxo da FTA

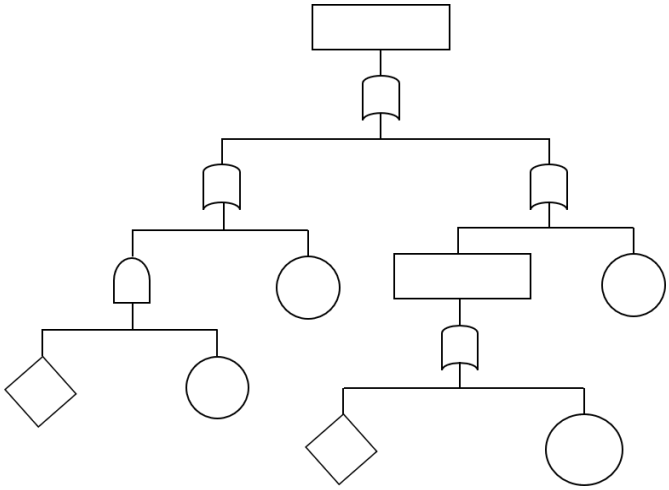


Fonte: elaborado pelo autor, através de FDG (2001).

4.1. Lógica e simbologia utilizada

Nesse encadeamento, os eventos intermediários são representados por retângulos, nos quais são descritas as ocorrências que contribuem para o desenvolvimento da falha. As relações entre esses eventos são estabelecidas por portas lógicas, como "E" e "OU", que expressam a forma pela qual as causas se associam para conduzir ao evento topo. Ao final da estrutura, situam-se as causas básicas, usualmente representadas por circunferências, que correspondem aos elementos primários da análise. Ressalta-se, entretanto, que essa representação corresponde à simbologia básica empregada na construção da FTA, podendo haver variações de representação conforme o autor, a literatura adotada ou o padrão de aplicação utilizado. Dessa forma, a árvore de falhas permite visualizar a sequência lógica de formação da falha, evidenciando as relações entre causas e efeitos e fornecendo base para a compreensão da simbologia utilizada nessa metodologia.

Figura 2 – Simbologia básica, meramente ilustrativa, empregada na construção da FTA (sujeita a variações conforme o autor e o padrão adotado). Obs.: retângulo = evento topo e/ou eventos intermediários; portas "E" e "OU" = relações lógicas entre eventos; círculo = causas básicas; losango = evento não desenvolvido ou transferência, conforme a convenção adotada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Como pode ser verificado na figura anterior, a FTA constitui uma técnica gráfica, através de símbolos de lógica, que pode ser entendida como alternativa aos diagramas de blocos de confiabilidade, estruturada em torno de eventos, e não apenas de componentes. Sua construção parte de uma falha relevante ou de um evento catastrófico, denominado evento topo, a partir do qual são identificadas as combinações de falhas que podem conduzir à sua ocorrência. Essa característica torna a técnica aplicável tanto na fase de projeto quanto na investigação de falhas e na análise de segurança em diferentes áreas da engenharia (WAGHMODE & PATIL, 2013).
Sendo reconhecida como método voltado à análise das causas-raiz de eventos específicos, a FTA pode ser empregada no diagnóstico e na avaliação da confiabilidade de sistemas técnicos de grande porte, complexos e dinâmicos. Por meio da construção da árvore de falhas, podem ser modelados fatores estruturais, de software, algorítmicos, humanos entre outros, o que permite uma avaliação sistemática do sistema analisado (LOZANOV et al., 2025).
Atualmente, a FTA é empregada como ferramenta de abordagem sistêmica de falhas, sendo utilizada em estudos de confiabilidade, segurança industrial e investigação de acidentes, especialmente em sistemas nos quais a interação entre causas mecânicas, operacionais, humanas e ambientais precisa ser analisada de forma estruturada.

4.2. Abordagem qualitativa e quantitativa da FTA

A FTA pode ser aplicada sob duas perspectivas principais: qualitativa e quantitativa.

(i) Na análise qualitativa, o objetivo é identificar as causas básicas ou causas-raiz que levaram determinado sistema à falha. Nessa abordagem, o foco está na construção da lógica causal do evento topo, evidenciando os caminhos possíveis que podem resultar na ocorrência do evento indesejado (LIMA et al., 2006). Segundo Waghmode e Patil (2013), a análise qualitativa consiste na identificação das diferentes combinações de eventos capazes de provocar o evento topo. Essa etapa permite compreender a estrutura da falha, visualizar interações entre causas e organizar o raciocínio analítico de forma sistemática. Conforme destacado pela NASA (2002), a construção da árvore contribui para o entendimento detalhado da lógica e das causas básicas que conduzem ao evento analisado, servindo como base para avaliações posteriores.

(ii) Na análise quantitativa, a finalidade é estimar a probabilidade de ocorrência do evento topo a partir das probabilidades ou taxas de falha atribuídas aos eventos básicos (LIMA et al., 2006). Nessa perspectiva, a FTA passa a incorporar dados históricos, indicadores de falha e informações estatísticas associadas aos componentes, subsistemas ou funções. De acordo com Waghmode e

> Patil (2013), essas taxas normalmente são obtidas a partir de dados históricos consistentes, como tempos médios entre falhas, dados preditivos ou registros substanciados de operação.

Dessa forma, a abordagem qualitativa permite responder a como o sistema pode falhar, enquanto a abordagem quantitativa busca estimar a probabilidade com que essa falha pode ocorrer. A articulação entre essas duas perspectivas amplia o uso da FTA, tornando-a aplicável tanto à identificação de causas quanto à avaliação da confiabilidade e ao suporte à tomada de decisão em manutenção, operação e segurança de sistemas.

4.3. FMEA e FTA no contexto da confiabilidade aplicada à manutenção industrial

No âmbito da confiabilidade aplicada à manutenção industrial, tanto a FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) quanto a FTA se destacam como ferramentas para a identificação, análise e tratamento de falhas, porém com enfoques distintos e complementares.

A FMEA é voltada à identificação dos modos de falha potenciais, de suas causas e efeitos, permitindo a proposição de ações preventivas e a definição de tarefas de manutenção mais adequadas, com impacto direto no aumento da confiabilidade dos ativos e na redução da probabilidade de falhas futuras (LIMA, 2025).

Enquanto a FTA adota uma lógica dedutiva, partindo de um evento topo previamente definido para investigar os encadeamentos causais que podem conduzir à sua ocorrência, concentrando-se em um modo de falha específico e identificando os mecanismos que podem resultar nessa falha.

Nesse sentido, a integração entre FTA e FMEA mostra-se especialmente útil, uma vez que a FMEA contribui para identificar e priorizar múltiplos modos de falha, seus efeitos e causas, enquanto a FTA aprofunda a investigação das causas potenciais associadas a uma falha específica, fornecendo informações detalhadas que subsidiam o preenchimento e a consistência da análise em FMEA.

Assim, a FTA exerce função de apoio à FMEA, oferecendo base analítica mais robusta para a compreensão das não conformidades e para a formulação de diretrizes corretivas, o que reforça a complementaridade entre ambas na análise de falhas e no aprimoramento da confiabilidade dos sistemas (MISZTAL, 2010).

Tabela 1 – Comparação entre as ferramentas FMEA e FTA no contexto da confiabilidade aplicada à manutenção industrial

Aspecto	FMEA	FTA
Enfoque principal	Identifica modos de falha potenciais, suas causas e seus efeitos	Investiga os encadeamentos causais que levam a um evento topo
Ponto de partida	Modos de falha potenciais do sistema, equipamento ou processo	Evento topo ou falha específica a ser analisada
Objetivo na manutenção	Definir ações preventivas e tarefas de manutenção mais adequadas	Aprofundar a investigação das causas de uma falha específica
Contribuição para a confiabilidade	Reduz a probabilidade de falhas futuras por meio da prevenção	Aumenta a compreensão lógica das causas que comprometem a confiabilidade do sistema
Escopo da análise	Avalia múltiplos modos de falha, causas e efeitos	Foca um modo de falha ou evento indesejado específico
Resultado esperado	Priorização de riscos e proposição de medidas preventivas	Identificação das combinações de causas que conduzem à falha
Papel na integração entre métodos	Organiza e prioriza os modos de falha a serem tratados	Fornece base analítica detalhada sobre as causas da falha
Base textual utilizada	Parágrafo comparativo com autocitação de Lima (2025) e integração metodológica	Parágrafo comparativo com apoio conceitual de Misztal (2010)

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Lima (2025) e Misztal (2010).

4.3.1. Integração entre FMEA e FTA

A integração entre FMEA e FTA constitui uma abordagem complementar. Dessa forma, o uso combinado dessas ferramentas amplia a capacidade de investigação, permitindo a priorização preventiva dos modos de falha (SOUZA & ÁLVARES, 2008).
Assim, o FMEA não apenas apoia a elaboração da árvore de falhas, mas também fornece subsídios para a definição de prioridades de intervenção e para a seleção de mecanismos de controle mais aderentes à criticidade dos modos de falha identificados (LIMA, 2025).
Além disso, para bombas centrífugas, o emprego do FMEA favorece a implementação de planos de manutenção centrados na confiabilidade, uma vez que permite relacionar os modos de falha às suas consequências operacionais, funcionais e de manutenção.
Com isso, torna-se possível direcionar ações preventivas, preditivas e corretivas de forma mais racional, concentrando esforços nos pontos de maior impacto na disponibilidade e na segurança do sistema. Quando associado ao FTA, esse processo ganha maior robustez analítica, pois a árvore complementa o diagnóstico ao explicitar os encadeamentos causais que levam à falha do equipamento, fortalecendo a tomada de decisão na gestão da manutenção (SOUZA & ÁLVARES, 2008) e (LIMA, 2025).

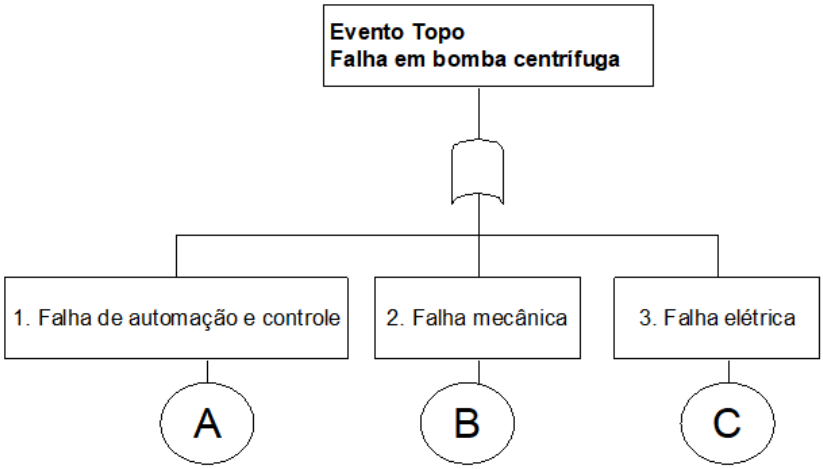
4.4. Vantagens e desvantagens da FTA

Entre as vantagens associadas ao uso da FTA, destacam-se a possibilidade de determinar falhas de difícil detecção, a facilitação do entendimento de sistemas complexos, o apoio à redução de custos sem prejuízo do desempenho, a contribuição para a formulação de planos de manutenção centrados em confiabilidade e a representação das entradas, saídas e interfaces de um sistema (SCAPIN, 1999). De forma complementar, a construção da árvore explicita as relações necessárias para a ocorrência do evento topo, registra de forma tangível a análise desenvolvida e fornece uma base para avaliações qualitativas e quantitativas do evento estudado (NASA, 2002).
Pode-se citar como desvantagem, no caso da abordagem quantitativa, que a ferramenta depende da obtenção das probabilidades dos eventos elementares, o que nem sempre é simples ou viável na prática. Em situações ideais, essas probabilidades são determinadas com base em análises estatísticas de dados operacionais do sistema, exigindo registros confiáveis de falhas. Assim, a aplicação quantitativa da metodologia pode se tornar limitada quando não há histórico operacional consistente ou dados estatísticos suficientes para sustentar a análise (BORYCZKO et al., 2022).

5. APLICAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS

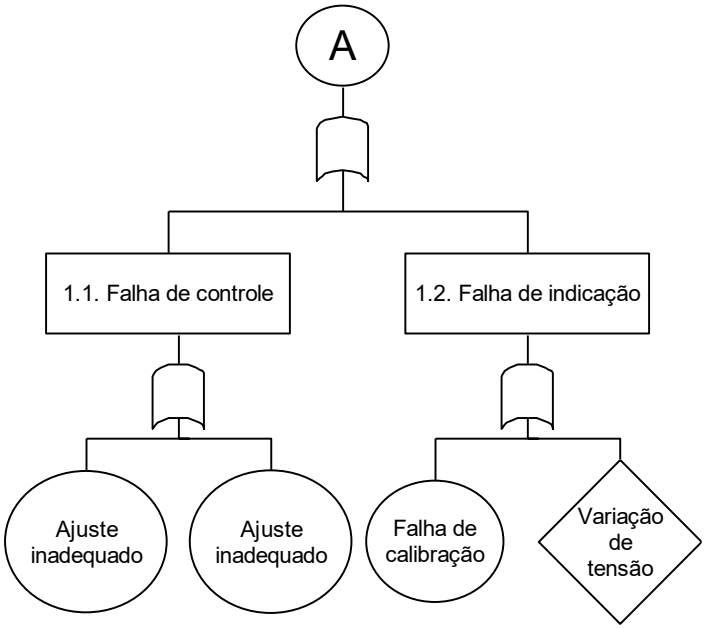
A fim de identificar, de maneira estruturada, os mecanismos que podem levar à falha da bomba centrífuga, foi elaborada uma Árvore de Falha, partindo-se do evento topo e avançando para níveis sucessivos de detalhamento. A construção da árvore permitiu organizar logicamente os principais modos de falha e suas possíveis causas, distribuindo a análise entre os ramos de automação e controle, falha mecânica e falha elétrica.
Em razão das dimensões da representação gráfica, a árvore foi apresentada em partes: a Figura 3 mostra o evento topo e sua divisão inicial nos três ramos principais, enquanto as Figuras 4, 5 e 6 apresentam, respectivamente, os desdobramentos dos ramos de automação e controle, falha mecânica e falha elétrica, que fundamentam a discussão técnica desenvolvida na sequência.

Figura 3 – Árvore de falhas da bomba centrífuga, apresentando o evento topo e sua divisão inicial nos ramos de falha de automação e controle, falha mecânica e falha elétrica.



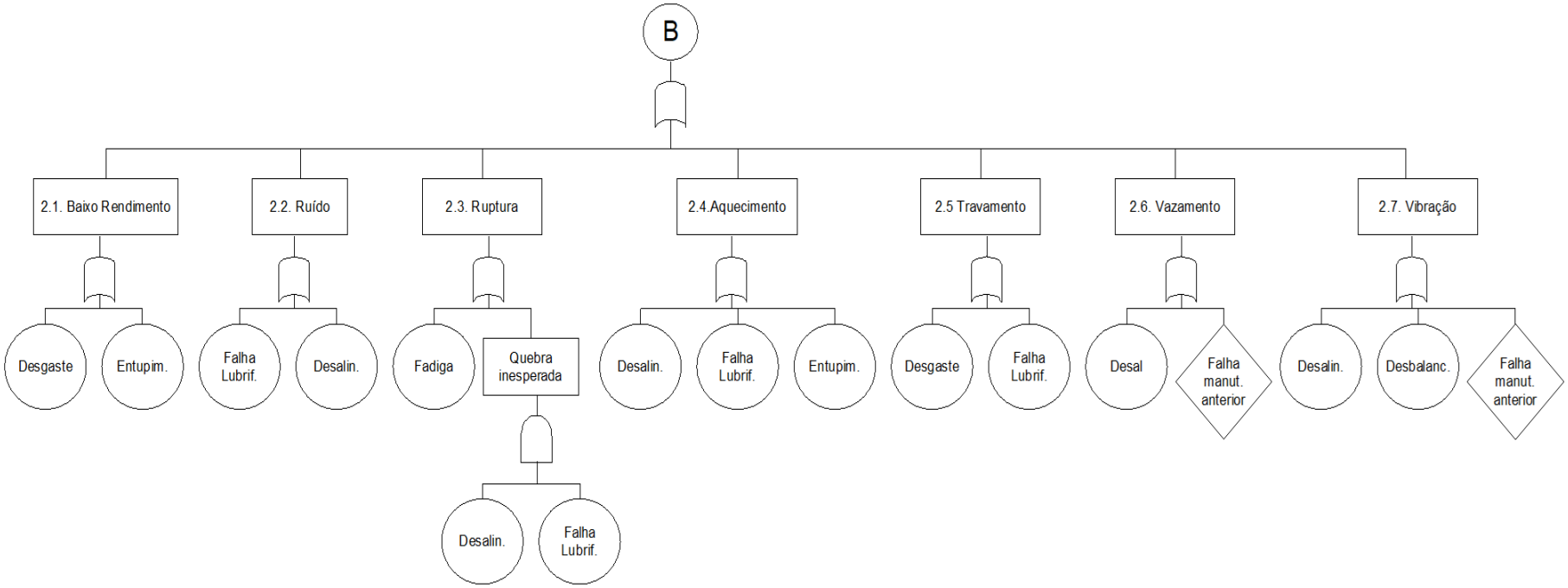
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4 – Desdobramento do ramo A da árvore de falhas, correspondente às falhas de automação e controle da bomba centrífuga.



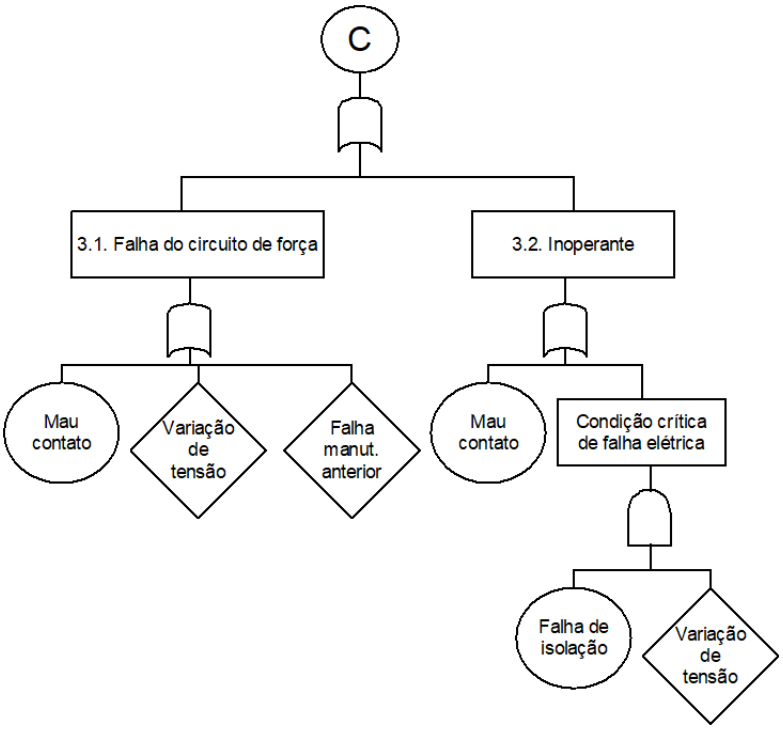
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 5 – Desdobramento do ramo B da árvore de falhas, correspondente às falhas mecânicas associadas à bomba centrífuga.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6 – Desdobramento do ramo C da árvore de falhas, correspondente às falhas elétricas associadas à bomba centrífuga.



Fonte: elaborado pelo autor

A árvore de falhas foi elaborada a partir do evento topo “falha da bomba centrífuga”, estruturada inicialmente por meio de uma porta OU, de forma a representar que a ocorrência da falha principal pode resultar de diferentes grupos de causas.
A construção seguiu uma lógica de decomposição sucessiva, partindo dos ramos principais de falha de automação e controle, falha mecânica e falha elétrica, e, a partir deles, avançando para níveis inferiores conforme os modos de falha e as causas mais aderentes ao comportamento esperado do equipamento.
O detalhamento dos ramos foi conduzido até o 5º nível, ponto em que a árvore foi encerrada por já apresentar grau de profundidade suficiente para a análise proposta.
Nesse estágio, vários eventos já se encontravam caracterizados como causas básicas ou como eventos não desenvolvidos, especialmente quando o aprofundamento adicional deixaria de agregar valor prático à investigação.
Também foram utilizadas portas lógicas OU e, em situações específicas, porta E, quando a ocorrência de determinado evento dependia da combinação simultânea de duas condições.
Assim, a árvore manteve uma estrutura técnica consistente, sem perder objetividade nem se tornar excessivamente fragmentada.
Observa-se ainda que, em diversos pontos do 5º nível, surgem causas associadas à falha humana, como erro de ajuste, intervenção inadequada, falha na manutenção anterior ou inadequação de procedimento. Esses eventos foram mantidos como causas finais da árvore, sem novo desdobramento, porque a intenção do estudo não foi aprofundar a análise organizacional, comportamental ou procedimental em um nível mais detalhado (SHI et al., 2023).
Dessa forma, a falha humana foi reconhecida como fator contribuinte relevante, porém tratada como limite de investigação dentro do escopo definido para esta FTA.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se que a aplicação da metodologia para bombas centrífugas utilizadas no setor de saneamento permitiu organizar, de forma lógica e estruturada, os principais mecanismos capazes de conduzir ao evento topo de falha do equipamento.

A decomposição dos eventos nos ramos de automação e controle, falha mecânica e falha elétrica, com aprofundamento até o 5º nível, mostrou-se adequada para representar os modos de falha mais relevantes nesse tipo de sistema, no qual a confiabilidade operacional é essencial para a continuidade dos processos de bombeamento.

Além disso, os resultados evidenciam que a FTA constitui uma ferramenta importante para apoiar a análise de confiabilidade e o direcionamento de ações de manutenção em bombas centrífugas do setor de saneamento, especialmente em razão do impacto que falhas nesses equipamentos podem causar sobre a disponibilidade operacional e a eficiência do sistema. Observou-se, ainda, que em alguns casos, alguns eventos do nível final da árvore podem estar associados à falha humana, como ajustes inadequados, intervenções incorretas e falhas em manutenções anteriores, os quais foram reconhecidos como fatores contribuintes relevantes, embora não tenham sido aprofundados além do limite definido para este estudo.

Assim, o trabalho demonstra que a abordagem adotada é útil não apenas para compreender a lógica de falha desses equipamentos, mas também para subsidiar ações de melhoria na operação e na manutenção de bombas centrífugas aplicadas ao saneamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Boryczko, K., Szpak, D., Żywiec, J., & Tchórzewska-Cieślak, B. The use of a fault tree analysis (FTA) in the operator reliability assessment of the critical infrastructure on the example of water supply system. Energies, v. 15, n. 12, p. 4416, 2022.

2. DE QUEIROZ SOUZA, Rodrigo; ÁLVARES, Alberto José. FMEA and FTA analysis for application of the reliability centered maintenance methodology: Case study on hydraulic turbines. In: ABCM Symposium Series in Mechatronics. 2008. p. 803-812.

3. FDG – FUNDAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO GERENCIAL. Programa Seis Sigma Black Belts: sessão 2 industrial. [S.l.]: Fundação de Desenvolvimento Gerencial. Apostila. 2001.

4. LIMA, Fábio Palma de; BORGES, Fabrício Ferreira; CARVALHO, Roberto Silva de. FTA – Sistema de resfriamento da lingotadeira Hazelett (laminação da Caraíba Metais). Salvador: Universidade Salvador. Artigo técnico submetido à Universidade Salvador como requisito para obtenção do grau de Especialista em Gestão da Manutenção, 2006.

5. LIMA, Fábio Palma de. Aplicação da metodologia de FMEA para desenvolvimento de técnicas de inspeção e monitoramento em bombas: mitigação de falhas e vazamentos. In: ENCONTRO TÉCNICO AESABESP, 36.; CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2025, São Paulo. Trabalho apresentado. São Paulo, 2025.

6. LOZANOV, Yavor; TZVETKOVA, Svetlana; PETLESHKOV, Angel. Fault Tree Reliability Analysis of Solar-Powered Pump Systems. In: 2025 19th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). IEEE, 2025. p. 1-5.

7. MISZTAL, Agnieszka. Connecting and applying the FTA and FMEA methods together. Some problems and methods of ergonomics and quality management, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, p. 153-163, 2010.

8. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Fault tree handbook with aerospace applications. [S.l.]: NASA, 2002.

9. SCAPIN, C. A. Análise Sistêmica de Falhas. Belo Horizonte: Editora Desenvolvimento Gerencial, 1999.

10. SHI, Yue et al. A human-centric design method for industrial centrifugal pump based on digital twin. Processes, v. 12, n. 1, p. 42, 2023.

11. WAGHMODE, L. Y.; PATIL, Rajkumar B. An overview of fault tree analysis (FTA) method for reliability analysis. Journal of engineering research and studies, v. 4, n. 1, p. 6-8, 2013.