



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Oswaldo Tadeu Rodrigues Junior

Modelo de Utilização da Matriz de Contradição da TRIZ no Processo de Análise de  
Falhas de Ativos Industriais

Joinville  
2023

Oswaldo Tadeu Rodrigues Junior

Modelo de Utilização da Matriz de Contradição da TRIZ no Processo de Análise de Falhas de Ativos Industriais

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas, Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia.

Orientador: Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr.

Joinville

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rodrigues Junior, Osvaldo Tadeu  
Modelo de Utilização da Matriz de Contradição da TRIZ no  
Processo de Análise de Falhas de Ativos Industriais /  
Osvaldo Tadeu Rodrigues Junior ; orientador, Cristiano  
Vasconcellos Ferreira, 2023.  
108 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. TRIZ. 3. Matriz  
de Contradições. 4. Análise de falhas. 5. Gestão de ativos.  
I. Ferreira, Cristiano Vasconcellos . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Oswaldo Tadeu Rodrigues Junior

**Título:** Modelo de utilização da Matriz de Contradição da TRIZ no processo de análise de falhas de ativos industriais

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 10 de novembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Mauricio Sacchelli, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Regis Kovacs Scalice, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Geovana Pires Araújo Lima, Dra.  
Universidade Estadual de Santa Cruz

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas, Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia.



Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr.  
Orientador

Joinville, 2023.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, pelo apoio incondicional em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Osvaldo Tadeu Rodrigues e Ivone Rodrigues (in memoriam) que me ensinaram os valores da vida, do respeito e ser perseverante na busca incessante da evolução pessoal e profissional.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos os professores desta instituição que desempenharam um papel fundamental no meu desenvolvimento científico. Em particular, quero destacar o Professor Cristiano Vasconcellos Ferreira, cujo apoio, orientação, conhecimento compartilhado, motivação e amizade foram inestimáveis.

Agradeço imensamente à CAPES pelo apoio financeiro ao programa de pós-graduação da UFSC. Graças a esse investimento, tenho a oportunidade de realizar estudos avançados e contribuir para o desenvolvimento científico na minha área.

Atenciosamente

Osvaldo Tadeu Rodrigues Junior

O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza dos seus sonhos.

## RESUMO

A realização de análises de falhas em ativos industriais é fundamental para garantir a confiabilidade e disponibilidade desses equipamentos. No entanto, muitas vezes essas análises não são padronizadas, resultando em planos de ação subjetivamente sugeridos, o que pode levar a possíveis erros, falta de informação, planos de ação ineficazes e demora na resolução dos problemas identificados. Diante desse cenário, esta dissertação investigou a aplicação da Matriz de Contradição da TRIZ como uma possível solução para essa problemática. A TRIZ fornece uma estrutura sistemática para analisar problemas e encontrar soluções. Essa abordagem estruturada contribui para a padronização das análises de falhas, garantindo uma metodologia consistente e eficaz. O objetivo principal foi propor um modelo de utilização da Matriz de Contradições da TRIZ no processo de análise de falhas em ativos industriais. Para isso, foram realizadas entrevistas com profissionais da indústria, análises de casos reais e apresentação do modelo em *workshop*. Os resultados indicaram que o modelo de utilização da Matriz de Contradição da TRIZ apresentou uma alta capacidade de identificar contradições em sistemas complexos e de sugerir soluções criativas e inovadoras para os problemas encontrados. No entanto, também foram identificadas limitações relacionadas à necessidade de treinamento especializado e à complexidade de aplicação em sistemas altamente dinâmicos. Em conclusão, este estudo forneceu *insights* sobre a aplicação da matriz de contradição da TRIZ no processo de análise de falhas de ativos industriais e pode servir como base para pesquisas futuras nesse campo.

**Palavras-chave:** TRIZ, Matriz de Contradição, Análise de Falhas, Gestão de Ativos

## ABSTRACT

Carrying out failure analyzes on industrial assets is essential to guarantee the reliability and availability of this equipment. However, these analyzes are often not standardized, resulting in subjectively suggested action plans, which can lead to possible errors, lack of information, ineffective action plans and delays in resolving identified problems. Given this scenario, this dissertation investigated the application of the TRIZ Contradiction Matrix as a possible solution to this problem. TRIZ provides a systematic framework for analyzing problems and finding solutions. This structured approach contributes to the standardization of failure analyses, ensuring a consistent and effective methodology. The main objective was to propose a model for using the TRIZ Contradiction Matrix in the process of analyzing failures in industrial assets. To this end, interviews were carried out with industry professionals, real case analyzes and presentation of the model in a workshop. The results indicated that the model of using the TRIZ Contradiction Matrix presented a high capacity to identify contradictions in complex systems and to suggest creative and innovative solutions to the problems encountered. However, limitations related to the need for specialized training and the complexity of application in highly dynamic systems were also identified. In conclusion, this study provided insights into the application of the TRIZ contradiction matrix in the industrial asset failure analysis process and can serve as a basis for future research in this field.

**Keywords:** TRIZ, Contradiction Matrix, Failure Analysis, Asset Management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Passo a passo do trabalho proposto .....	20
Figura 2 - Árvore de Falhas .....	25
Figura 3 - Exemplo FMEA .....	27
Figura 4 – Matriz RACI .....	30
Figura 5 - Planilha RCM .....	31
Figura 6 - Integração ferramentas para análise de falhas .....	33
Figura 7 - Teoria de Resolução Inventiva de Problemas .....	35
Figura 8 - Ferramentas TRIZ e Componentes .....	36
Figura 9 - Processos da Matriz de Contradição TRIZ .....	38
Figura 10 – Matriz de Contradições .....	40
Figura 11- Procedimento iterativo da fase de processamento RSL .....	42
Figura 12 - Protocolo de busca – TRIZ .....	43
Figura 13 - Fluxograma para descrever a abordagem desenvolvida .....	48
Figura 14- Modelo de decisão de design Fuzzi .....	50
Figura 15 - Processo de solução de problemas. ....	51
Figura 16- Rubrica de pontuação para os critérios .....	51
Figura 17 - Dispositivo para o Teste de vida acelerada dos componentes...54	
Figura 18– Método iACTC .....	55
Figura 19 – Fases da aplicação do modelo 4FTRIZ .....	59
Figura 20 - Primeira fase do Modelo 4FTRIZ .....	61
Figura 21 – Segunda fase do Modelo 4FTRIZ .....	62
Figura 22 - Terceira fase do Modelo 4FTRIZ .....	63
Figura 23 - Quarta fase do Modelo 4FTRIZ .....	64
Figura 24 – Modelo 4FTRIZ do Uso da Matriz de Contradições .....	65
Figura 25 – Tempo de reparo .....	69
Figura 26 - Matriz de Contradições .....	71
Figura 27 – Respostas questionário .....	74
Figura 28 – Principais componentes do equipamento analisado .....	76
Figura 29 – Matriz de Classificação ABC .....	77
Figura 30 – RCM – Máquina de Sopro .....	78
Figura 31 – Matriz RACI .....	79
Figura 32 – FMEA Máquina de Sopro .....	80

Figura 33 – FTA Tubulação Hidráulica .....	81
Figura 34 – Soluções Propostas Metodologia TRIZ .....	82
Figura 35 – Critérios avaliados .....	86
Figura 36 – Aspecto Clareza .....	88
Figura 37 – Aspecto Capacidade .....	89
Figura 38 – Aspecto Aplicação .....	90
Figura 39 – Aspecto Alcance dos Objetivos .....	91
Figura 40 - Matriz de Contradições da TRIZ.....	106
Figura 41 – Formulário enviado.....	107

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - 39 parâmetros de engenharia da TRIZ .....	39
Quadro 2 - 40 princípios inventivos da TRIZ .....	39
Quadro 3 - Abordagens TRIZ e integração com o RCM .....	58
Quadro 4 - Parâmetros de Engenharia e soluções de melhoria .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALT	Teste de Vida Acelerada
APR	Análise Preliminar de Risco
AR	Apreciação de Risco
FTA	Análise de Árvore de Falhas
FMEA	Análise de Modo e Efeito de Falhas
FRACAS	Relatório de Análise de Falhas e Ações Corretivas
GDAF	Grupo de Diagnóstico e Análise de Falhas
GUT-R	Gravidade, Urgência, Tendência, Recurso
IATF	International Automotive Task Force
IROG	Índice de Rendimento Operacional Global
ISO	International Organization for Standardization
MIL	Military Standard
MTTR	Mean Time to Repair
OEE	Overall Equipment Effectiveness
RCM	Reliability Centered Maintenance
RPN	Risk Priority Number
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SAE	Society of Automotive Engineers
TRIZ	Teoria da Resolução Inventiva de Problemas
TTF	Time to Fail

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.2	METODOLOGIA DA PESQUISA .....	19
1.3	RESULTADOS ESPERADOS .....	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>23</b>
2.1	ANÁLISES DE FALHA .....	23
2.1.1	Análise de árvore de falhas – (FTA) .....	24
2.1.2	Análise de modo e efeitos de falha – FMEA .....	26
2.1.3	Manutenção Centrada em Confiabilidade - (RCM) .....	28
2.1.4	Matriz RACI.....	29
2.2	FERRAMENTAS VISUAIS COMO FACILITADORAS NAS ANÁLISES DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS.....	32
2.2.1	TRIZ - Teoria da resolução inventiva de problemas .....	34
2.2.2	Matriz de Contradição da TRIZ.....	36
2.3	REVISÃO DA LITERATURA.....	41
2.4	ASPECTOS IMPORTANTES.....	57
<b>3</b>	<b>MODELO PROPOSTO 4FTRIZ</b> .....	<b>59</b>
3.1	FASE 1: RCM, IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA .....	60
3.2	FASE 2 – CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE CRÍTICA DAS FALHAS .....	62
3.3	FASE 3 – IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA RAIZ.....	63
3.4	FASE 4 – APLICAÇÃO DA TRIZ, BUSCA DE SOLUÇÕES .....	64
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO MODELO 4FTRIZ NA INDÚSTRIA</b> .....	<b>68</b>
4.1	APRESENTAÇÃO DO PROCESSO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TRIZ .....	72
4.2	APRESENTAÇÃO DO MODELO 4FTRIZ.....	75
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO 4F TRIZ</b> .....	<b>83</b>
5.1	PROCEDIMENTO DA AVALIAÇÃO.....	86
5.2	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO.....	87
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para se destacarem em seus segmentos de atuação e oferecerem atendimentos produtivos de qualidade, as empresas têm como objetivo constante a melhoria de seus processos e a inovação em suas ações. Nesse sentido, a busca por melhores resultados operacionais começa pela maximização do rendimento global dos equipamentos, com a aplicação das melhores práticas de manutenção visando aumentar a produtividade. Isso afeta praticamente todos os setores operacionais e administrativos da empresa. Para alcançar esse objetivo, é fundamental que a função de Manutenção tenha um compromisso permanente com a melhoria contínua do desempenho da gestão de ativos, que inclui a evolução do capital intelectual e dos equipamentos.

A manutenção é uma estratégia fundamental para as organizações, já que é responsável por garantir a disponibilidade dos equipamentos e instalações de forma confiável, segura e com qualidade superior. Além disso, a manutenção contribui para a preservação do meio ambiente e para a manutenção de custos adequados. Diante do atual cenário dos ambientes produtivos, há uma forte tendência de associação de tecnologias para aprimorar a confiabilidade, com foco na redução de falhas e no aumento dos lucros. Por isso, a manutenção tem um papel estratégico na busca pela excelência operacional e na conquista de uma posição de destaque no mercado.

Análise de falhas tem sido uma abordagem empregada na redução de custos, integrando as diversas informações e sistemas implantados pela organização, desta forma, identificando ações antecipadas, visando também, enxergar a manutenção como um centro de lucratividade. A aplicação sistêmica da Confiabilidade, suporta desta forma, o processo de tomada de decisão em diversas atividades.

Embora a análise de falhas seja uma prática comum na indústria para reduzir as quebras e defeitos nos equipamentos, muitas vezes os problemas não são detectados de forma eficiente. Apesar dos esforços da equipe em adotar estratégias para solucionar problemas e otimizar o desempenho da equipe, antecipar-se às falhas ainda é um grande desafio. A manutenção preventiva, muitas vezes, não é suficiente para identificar e evitar todas as falhas, o que pode resultar em atrasos na entrega de produtos, aumento de custos, perda de qualidade dos produtos e até mesmo acidentes de trabalho. A valorização das análises de falhas é relevante para aprimorar o desempenho e a confiabilidade dos processos industriais. Estudos anteriores têm

destacado a necessidade premente de desenvolver melhorias nesse domínio, reconhecendo-o como um elemento fundamental na busca pela excelência operacional. Nesse contexto, a utilização da Matriz de Contradições da TRIZ, emerge como uma ferramenta estratégica, proporcionando uma oportunidade única para elevar substancialmente o nível tecnológico das análises de falhas.

Trabalhos prévios têm delineado avanços significativos na aplicação da matriz de contradições, evidenciando sua capacidade de conferir maior flexibilidade e agilidade a esse processo crucial. Ao adotar essa abordagem, torna-se possível identificar contradições subjacentes nos sistemas, permitindo uma análise mais abrangente e eficaz das falhas. A matriz de contradições, portanto, representa uma promissora evolução nas técnicas de investigação de falhas.

Diante desse cenário, é imperativo que as organizações mantenham um compromisso constante com a melhoria contínua desse processo. Buscar inovações e refinamentos contínuos é essencial para garantir a efetividade da manutenção, mitigando assim os impactos negativos sobre a produção da empresa. A aplicação sistemática da matriz de contradições, aliada a uma abordagem proativa na identificação e resolução de falhas, desempenha um papel vital na otimização da operação industrial e na preservação da eficiência produtiva.

A TRIZ, ou Teoria da Resolução de Problemas Inventivos, é uma metodologia que se destaca por oferecer abordagens sistemáticas e estratégicas para a resolução de desafios complexos. Ela baseia-se na análise de contradições e na identificação de padrões de inovação em diversos campos, permitindo que as empresas encontrem soluções criativas e eficientes para problemas comuns. Ao aplicar os princípios da TRIZ, as organizações podem otimizar processos, produtos e serviços, impulsionando sua capacidade de inovação e competitividade no mercado.

A TRIZ, ou Teoria da Resolução de Problemas Inventivos, oferece uma ampla gama de ferramentas estratégicas que têm demonstrado ser inestimáveis para empresas em busca de soluções inovadoras e eficazes. Algumas dessas ferramentas incluem:

Níveis de Inventividade: essenciais na abordagem de problemas, os Níveis de Inventividade classificam as dificuldades de acordo com sua complexidade, fornecendo uma estrutura valiosa para a seleção das abordagens mais apropriadas e estratégias a serem empregadas na resolução de cada desafio. Esta categorização

facilita a identificação das soluções mais eficazes, levando em consideração a natureza específica de cada problema.

**Contradição Técnica:** na busca por inovações, a Contradição Técnica emerge como uma ferramenta indispensável. Sua capacidade de identificar conflitos entre os parâmetros de um sistema desencadeia um processo criativo que resulta em soluções engenhosas para superar essas contradições. Ao integrar essa abordagem, é possível não apenas resolver problemas, mas também promover avanços significativos nos sistemas e processos industriais.

**40 Princípios Inventivos:** desempenhando um papel crucial na resolução de desafios, os 40 Princípios Inventivos oferecem diretrizes específicas e inovadoras para abordar problemas comuns. Ao se basear em princípios como "combinar funções" ou "utilizar soluções intermediárias", essa abordagem promove a inovação no processo de resolução de problemas, incentivando a busca por soluções que transcendem as abordagens convencionais.

**39 Parâmetros da Engenharia:** Ao avaliar e comparar as características técnicas de produtos ou processos, os 39 Parâmetros da Engenharia se destacam como ferramentas essenciais. Essa análise sistemática proporciona uma base sólida para a identificação de oportunidades de melhoria, fornecendo insights valiosos para otimizar a eficiência e a eficácia dos sistemas industriais.

**Contradição Física:** focando na superação de contradições físicas inerentes a melhorias em sistemas, a abordagem de Contradição Física é vital. Ao enfrentar desafios relacionados a dois parâmetros opostos, esta estratégia contribui significativamente para o desenvolvimento eficiente, promovendo soluções equilibradas e eficazes.

**Quatro Princípios de Separação:** Na simplificação de questões específicas, os Quatro Princípios de Separação oferecem estratégias eficazes para isolar ou separar elementos problemáticos em um sistema. Ao aplicar esses princípios, a resolução de desafios torna-se mais eficiente e direcionada.

**Idealidade:** Em busca do estado ideal de um sistema, a abordagem de Idealidade visa otimizar o desempenho, minimizando o uso de recursos. Essa busca pela eficiência máxima sustenta a evolução contínua dos sistemas industriais, promovendo práticas mais sustentáveis e econômicas.

**76 Soluções Padrão:** Como referência para desafios comuns, as 76 Soluções Padrão oferecem abordagens testadas e comprovadas para uma variedade de

problemas em diversas áreas. Integrar essas soluções típicas no processo de resolução agiliza a tomada de decisões e fortalece a eficácia das soluções propostas.

Padrões de Evolução Essenciais para antecipar mudanças, os Padrões de Evolução identificam tendências na evolução tecnológica ao longo do tempo. Essa compreensão profunda das mudanças tecnológicas fornece uma base sólida para a inovação contínua, permitindo a adaptação proativa aos desenvolvimentos do setor.

ARIZ (Algoritmo para Resolver Problemas Inventivos): Proporcionando uma estrutura sistemática, o ARIZ guia a abordagem de problemas complexos de maneira eficiente. Ao oferecer um roteiro detalhado, esse algoritmo promove uma resolução estruturada e eficaz de desafios, otimizando o processo de inovação.

Análise Campo-Substância: na compreensão das complexas interações entre os componentes de um sistema, a Análise Campo-Substância emerge como uma ferramenta valiosa. Facilitando a identificação de pontos críticos e oportunidades de aprimoramento, essa abordagem contribui para uma compreensão mais profunda e precisa dos sistemas industriais.

A Matriz de Contradição é uma dessas ferramentas, focada na identificação de conflitos entre parâmetros de um sistema e na geração de ideias para resolvê-los. Sua utilização tem se mostrado eficaz para melhorar a análise de falhas em ativos industriais, contribuindo para aprimorar a manutenção e minimizar impactos negativos na produção. Ao adotar a TRIZ e suas diversas ferramentas, as empresas podem fortalecer sua capacidade de inovação e tomar decisões informadas para solucionar problemas complexos de maneira mais eficiente.

Por meio da exploração das potencialidades da TRIZ, foi possível conduzir ações premeditadas e eficientes, resultando em otimizações e reduções de custos de manutenção de forma inteligente. Com constantes inovações nas práticas e tecnologias aplicadas à análise de falhas em ativos industriais, a utilização da Matriz de Contradição TRIZ torna-se um diferencial competitivo para as empresas que buscam aprimorar seus processos e se destacar no mercado.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo propor um modelo de utilização da Matriz de Contradições da TRIZ no processo de análise de falhas em ativos industriais.

E, considerando este contexto, como objetivos específicos:

1. Identificar modelos de aplicação da TRIZ no processo de análise de falhas;
2. Identificar as possibilidades de aplicação da Matriz de Contradição e do Método dos Princípios Inventivos da TRIZ, como facilitador na solução e resolução de problemas técnicos provenientes de análise de falhas na gestão de ativos industriais;
3. Propor um modelo de análise de falhas em ativos industriais que utiliza a Matriz de Contradições da TRIZ.
4. Avaliar a aplicação do modelo proposto com profissionais da indústria.

## 1.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos específicos estabelecidos, cada fase será minuciosamente planejada e executada. A avaliação dos modelos de aplicação da TRIZ no processo de análise de falhas será conduzida por meio de uma abordagem estruturada, conforme explicado a seguir.

A revisão bibliográfica abrangerá amplamente as bases de dados Scopus, Science Direct e Google Acadêmico. Utilizando termos-chave como "analysis", "failure" e "TRIZ", esta revisão bibliográfica criteriosa identificará estudos, artigos e publicações relevantes. O objetivo é estabelecer uma base sólida de conhecimento sobre práticas de análise de falhas e aplicações da TRIZ nesse contexto.

O segundo passo compreenderá a aplicação da TRIZ na manutenção industrial, explorando estudos de casos, práticas recomendadas e inovações resultantes. Esta investigação aprofundada proporcionará insights sobre como a TRIZ pode contribuir para resolver problemas técnicos em ativos industriais.

Na terceira etapa, será elaborada uma proposta específica para a aplicação da TRIZ na análise de falhas em ativos industriais. A matriz de contradição e o método dos princípios inventivos serão identificados como ferramentas centrais para a resolução de problemas, incorporando diretrizes claras e métodos práticos para integrar eficazmente a TRIZ nesse processo.

A implementação prática da proposta ocorrerá na quarta etapa, utilizando casos reais de análise de falhas em ativos industriais. A eficácia da aplicação da TRIZ será

avaliada, considerando a resolução dos problemas identificados e seu impacto positivo nas operações industriais. Essa fase visa validar a viabilidade e a aplicabilidade da metodologia proposta.

A quinta e última etapa consistirá na conclusão, consolidando os resultados e conclusões derivados da aplicação da TRIZ no processo de análise de falhas em ativos industriais. Serão destacados os pontos fortes, lições aprendidas e áreas potenciais para futuras pesquisas. Essa fase proporcionará uma visão holística do sucesso da metodologia proposta e suas implicações no contexto industrial.

A Figura 1, que resumirá visualmente o progresso do trabalho, será atualizada ao longo de cada etapa, refletindo o avanço contínuo na proposição e aplicação da Matriz de Contradições da TRIZ no processo de análise de falhas em ativos industriais.



### 1.3 RESULTADOS ESPERADOS

A motivação subjacente a este estudo reside na aplicação dos Princípios Inventivos e da Matriz de Contradição, ferramentas propostas pela metodologia TRIZ. Essa abordagem visa abordar a questão de pesquisa relacionada à confiabilidade e disponibilidade de ativos industriais.

O aumento em investimentos no setor industrial releva a importância de manter a gestão de ativos cada vez mais competitiva, assim melhorando os patamares de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Wang et al. (2022), retratam essa necessidade de obter respostas ágeis de análises de falhas, explorando as características norteadoras da Matriz de Contradições.

O estudo em análise desempenha um papel elementar ao preencher lacunas identificadas em relação à falta de consideração de algumas definições sobre como associar tecnologias para aprimorar a confiabilidade. É importante ressaltar que, muitas vezes, o desenvolvimento de estratégias para otimizar a confiabilidade industrial é subestimado ou não totalmente abordado em estudos anteriores.

Nesse contexto, é notável o trabalho de Marques (2014), que emprega a Metodologia TRIZ como um plano de ação para a implementação de Manutenção Autônoma em uma indústria gráfica. O estudo de Marques destaca a significativa importância de as empresas adotarem abordagens mais dinâmicas e criativas na resolução de problemas complexos. Esta abordagem evidencia a necessidade de pensar fora dos padrões convencionais ao aplicar tecnologias para aprimorar a confiabilidade, sugerindo que soluções inovadoras são essenciais para enfrentar desafios intrincados.

Portanto, ao integrar essas perspectivas, o estudo em questão contribui para preencher a lacuna identificada, destacando a importância de considerar diferentes metodologias e enfoques, como a Metodologia TRIZ, para aprimorar a confiabilidade industrial. Isso reforça a necessidade de uma abordagem holística e criativa na implementação de tecnologias voltadas para a confiabilidade, enfatizando que a inovação é um componente fundamental na resolução eficaz de problemas complexos no contexto industrial.

Assim, ao aplicar a Matriz de Contradições da TRIZ, espera-se alcançar resultados que otimizem a eficiência e eficácia na resolução de falhas em equipamentos de diversos setores. Por meio dessa abordagem, busca-se identificar contradições e encontrar sugestões de possíveis soluções inovadoras que permitam superar os desafios enfrentados. A utilização da Matriz de Contradições da TRIZ proporciona uma ampla exploração de princípios e estratégias para solucionar problemas, levando em consideração as necessidades específicas de cada situação.

Além disso, é importante ressaltar a relevância da padronização nesse contexto. Através da aplicação consistente da Matriz de Contradições e da adoção de metodologias padronizadas, é possível estabelecer diretrizes claras e uniformes para a resolução de falhas em diversos equipamentos industriais. A padronização promove uma abordagem sistemática e estruturada, permitindo que os profissionais sigam um conjunto definido de etapas e utilizem ferramentas e técnicas reconhecidas. Esse alinhamento contribui para a obtenção de resultados mais consistentes, facilita a comunicação entre os membros da equipe e possibilita a replicação bem-sucedida das soluções encontradas.

Dessa forma, a combinação da aplicação da Matriz de Contradições com a padronização reforça a importância de um processo confiável e bem-sucedido na resolução de falhas em equipamentos de fundição, proporcionando melhorias

significativas no desempenho dos equipamentos, redução das falhas, aumento da produtividade e garantia de um processo de fundição mais eficiente e confiável.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta Dissertação de Mestrado está dividido em 6 capítulos:

1. Introdução - presente capítulo, constando a motivação para a elaboração deste trabalho, os objetivos específicos que se pretende atingir e a justificativa para a escolha do tema e proposto;

2. Revisão da Literatura - uma revisão do estado atual das pesquisas relacionadas ao tema, a fim de encontrar o que existe hoje na literatura conectando os temas de aplicações da Metodologia TRIZ na Manutenção Industrial, Engenharia de Manutenção e Confiabilidade. Neste capítulo, identifica-se as principais contribuições da aplicação da Matriz de Contradições TRIZ como ferramenta de análise de falhas em ativos industriais.

3. Proposta - consiste em aplicar o método proposto em uma máquina de sopro do setor de fundição, com o objetivo de resolver falhas e melhorar seu desempenho. Durante o processo, será realizada uma retroalimentação contínua do método, baseada nos resultados obtidos a partir do estudo realizado.

4. Aplicação da Proposta - neste capítulo propõe-se o método de aplicação da Metodologia TRIZ na facilitação da condução de efeitos provenientes das causas já analisadas e conhecidas pela gestão de ativos da empresa.

5. A partir das medições identificadas no capítulo anterior, propõe-se dois caminhos de avaliação: *workshop* mostrando aplicação do processo utilizado, verificação das contribuições e suas limitações, e avaliação da proposta por expectativa de gestores experientes e por realidade atual da empresa. Os dois podem ser também estudados juntos, potencializando os resultados.

6. Conclusão - análise final em relação aos objetivos do trabalho e sugestões de trabalhos futuros, que podem aprofundar e explorar de forma mais ampla a proposta deste trabalho.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura, a qual supre a fundamentação necessária para a aplicação da metodologia. Inicia-se por uma revisão dos principais conceitos de análises de falhas, na sequência argumentos a respeito da aplicação TRIZ, seus aspectos particulares e suas implicações no âmbito da Manutenção.

### 2.1 ANÁLISES DE FALHA

As aplicações da Engenharia de Confiabilidade estão diretamente relacionadas às análises de falha, proporcionando o conhecimento do comportamento dos ativos de produção e identificando oportunidades de melhoria. Segundo Mendes et al. (2014) e Salgado (2008), a Engenharia de Confiabilidade permite a identificação de problemas recorrentes em equipamentos, a investigação das causas-raiz desses problemas e a recomendação de ações para eliminá-los. Além disso, Mendes et al. (2014) ressaltam que a Engenharia de Confiabilidade fornece ferramentas teóricas e práticas para especificar, projetar, testar e demonstrar a probabilidade e a capacidade de componentes, equipamentos e sistemas desempenharem suas funções ao longo de períodos determinados e em ambientes específicos.

Recentemente, as empresas têm sido desenvolvidas esforços significativos para melhorar a gestão das atividades de manutenção. A norma ISO 55000:2014 é amplamente adotada como diretriz para a gestão de ativos, conforme destacado por (VIVEROS et al., 2019). Além disso, soluções de software têm sido disponibilizadas, oferecendo ferramentas que facilitam o controle e a administração das atividades de manutenção, juntamente com um histórico abrangente, como mencionado por (SOBREIRA, 2018).

Um dos principais benefícios dessas abordagens é a capacidade de prever possíveis falhas futuras, o que permite o planejamento da manutenção antes que ocorram as falhas. Li e Wang (2016) afirmam que o objetivo primário da manutenção é prevenir falhas e destacam a importância de um cronograma de manutenção otimizado para minimizar os custos e alcançar zero falhas de fabricação.

Xenos (1998) enfatiza a necessidade de implementar métodos e técnicas que garantam o funcionamento regular e contínuo de equipamentos, ferramentas e

instalações, a fim de evitar defeitos, falhas, quebras e paradas indesejadas. Além disso, destaca a importância de propor melhorias por meio de estudos e projetos que visem alterar as configurações originais, buscando resultados de produção mais elevados, sempre respeitando as normas técnicas e contribuindo para um ambiente seguro.

Sobreira (2018) complementa a importância de projetar ferramentas de controle focadas na melhoria da detecção e resolução de problemas ou riscos que afetam a confiabilidade e a manutenibilidade dos equipamentos. Nos últimos anos, a manutenção tem ganhado cada vez mais interesse e significado na indústria, deixando de ser vista apenas como um custo para se tornar um investimento com impacto positivo na organização. A melhoria dos sistemas de manutenção tem demonstrado a capacidade de aumentar a qualidade do produto, a disponibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, a produção. A manutenção e a inspeção baseadas no risco, como destacado por Chang et al. (2005), representam processos preditivos essenciais, explorando os recursos disponíveis para controlar efetivamente as falhas.

Nos próximos tópicos, serão abordadas algumas das ferramentas e metodologias de análises de falhas.

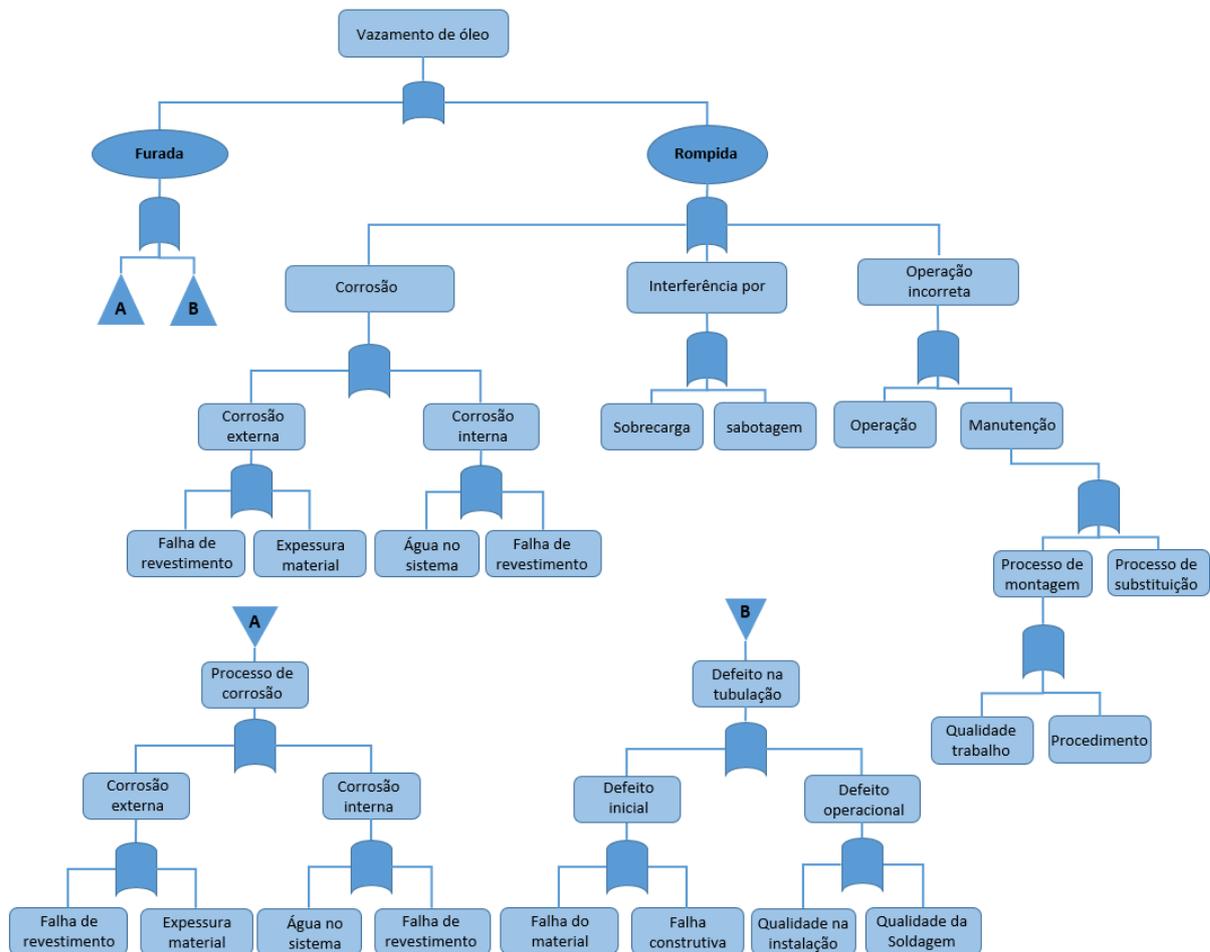
### **2.1.1 Análise de árvore de falhas – (FTA)**

A segunda fase do modelo proposto incorpora a Análise de Árvore de Falhas (FTA), uma abordagem dedutiva top-down que desempenhará um papel na classificação e análise de criticidade das falhas identificadas. A FTA é reconhecida como uma ferramenta fundamental para a análise de riscos e a gestão da confiabilidade em diversas áreas, incluindo projetos, montagens, operações e manutenção de plantas industriais, bem como em atividades relacionadas a suprimento e logística, entre outros.

Essa metodologia não apenas é valiosa para investigar eventos de falha passados, aprendendo com o que ocorreu, mas também desempenha um papel na previsão da probabilidade de ocorrência de falhas futuras. Essa previsão é essencial para fundamentar tomadas de decisão informadas e construir alternativas de melhorias para o sistema, equipamento ou serviço em questão (LIMA et al., 2019; GONÇALVES, 2018; CALIL, 2009).

A Análise de Árvore de Falhas concentra-se especialmente na análise de falhas em sistemas complexos, nos quais a interação de múltiplas causas potenciais é uma realidade. Sua aplicação oferece uma representação visual eficaz de como erros humanos e fatores externos contribuem para a falha de equipamentos, acidentes ou eventos. O principal enfoque das árvores de falhas é a análise de falhas em sistemas complexos, particularmente onde há a oportunidade de interação de múltiplas causas potenciais, (ELLIOT, 1998, APUD YAMANE E SOUZA, 2007). A Figura 2 ilustra de forma exemplar uma Árvore de Falhas, destacando a clareza e a utilidade dessa ferramenta na compreensão das relações entre os diversos elementos que podem levar a falhas em um sistema.

Figura 2 - Árvore de Falhas



Fonte: O Autor (2023).

### 2.1.2 Análise de modo e efeitos de falha – FMEA

De acordo com Stamatis, (2003), Fernandes (2005), FMEA é uma ferramenta de engenharia usada para identificar, eliminar e prevenir falhas em sistemas, projetos, processos ou serviços antes de serem entregues aos clientes, para que eles tenham algo totalmente livre de erros. Uma ferramenta capaz de documentar de forma organizada os modos e efeitos de falhas de componentes, por meio de investigação e levantamento de todos os elementos, incluindo possíveis falhas humanas, que podem interromper ou dificultar a operação de um sistema em qual esse componente está instalado.

O FMEA é uma ferramenta eficiente para identificar os modos de falha potenciais e seus efeitos, a fim de aumentar a confiabilidade e a segurança de sistemas complexos e reunir os dados necessários para decidir sobre como gerenciar riscos, (ALIZADEH et al., 2015).

De acordo com Sant`Anna e Pinto Junior (2010), a aplicação do FMEA envolve o registro das possíveis falhas e a avaliação da sua gravidade, frequência e detectabilidade de forma objetiva em um documento, o formulário do FMEA, que constitui um poderoso instrumento, não só para o fim precípua da análise, a eliminação de falhas, mas, também, para a geração do conhecimento.

FMEA é um método análise de confiabilidade destinada a identificar falhas que afetam o funcionamento de um sistema e habilitar prioridades para que a ação seja definida (IATF 16949, 2016). O FMEA é usado para identificar modos de falha. Os modos de falha são as maneiras, ou modos, em que um ativo pode falhar.

A gravidade, probabilidade de ocorrência e risco de não detecção são estimados e usado para avaliar o risco associado a cada falha modo. A prática usual é combinar esses elementos em um “número de prioridade de risco” (DIETER, 2000). A Figura 3 apresenta um modelo de FMEA voltado a análise de um equipamento do setor siderúrgico, contempla as principais causalidades para elaboração do documento, conforme padronização Handbook 4.2 Ford.

Figura 3 - Exemplo FMEA

FMEA - ANÁLISE DE EFEITOS E MODOS DE FALHA - EQUIPAMENTO															RPN - Risk Priority Number			DATA INÍCIO:						
ÁREA:		GERAL		EQUIPAMENTO:		Máquina de Sopros Loramendi				VALOR		RISCO		ESTRATÉGIA		DATA FIM:								
MISSÃO PRINCIPAL:		Moldagem de machos de areia								0 a 125		Baixo		Aceitar o Risco		Nº REVISÃO:								
										126 a 500		Médio		Propor Ação de Redução de Risco		DATA REVISÃO:								
										501 a 1000		Alto		Definir Ação Através do RCM										
<input checked="" type="checkbox"/> SÍMBOLO ESPECIAL - SEGURANÇA OU LEGISLAÇÃO															APROVADO POR: Mikelly									
GF	GRUPO FUNCIONAL	FO	FUNÇÃO OPERACIONAL	M F	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEVERIDADE	CLASSIFICAÇÃO	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCORRÊNCIA	PADRÕES & CONTROLES ATUAIS DE PREVENÇÃO	DETECÇÃO	RPN	AÇÕES DE REDUÇÃO DE RISCO	RESPONSÁVEL	PRAZO	STATUS	REAVALIAÇÃO						
																		SEVERIDADE	OCORRÊNCIA	DETECÇÃO	RPN			
1	Cilindros	A	Transformar a força ou energia hidráulica em força mecânica	1	Travamento do cilindro	Corrosão	9		Desgaste acentuado dos elementos	7	Não existente?	3	189	Criar plano de trabalho de troca dos cilindros	Rodinaldo	15/02/2012	Concluído	7	4	5	140			
				2	Contaminação do fluido hidráulico	Corrosão	7		Falha acionamento	6	Plano de trabalho 0000	4	168	Criar plano de trabalho para análise preditiva.	Rafael	15/02/2012	Concluído	7	3	6	126			
				3	Aquecimento	Vazamento de óleo	4		Contaminação	5	Plano de trabalho 8251	2	40	PT existente e concisa	Mauro	31/01/2012	Concluído	5	8	4	160			
				4	Desalinhamento	Travamento do cilindro	6		Desgaste dos elementos guia	5	Não existente	7	210	Criar plano de trabalho de inspeção das correntes e instalar tensor na corrente de acionamento dos rolos	Rodinaldo	31/01/2012	Concluído	7	3	3	63			
				5	Quebra da haste	Perda função de prensagem	5		Travamento do conjunto guia	7	Não existente	4	140		Mauro Almeida	31/01/2012	Concluído	5	4	3	60			
				6	Desalinhamento	Vazamento de óleo			Desgaste dos elementos guia															
				7	Desalinhamento	Vazamento de óleo			Vibração															
2	Hastes Guias																							
3	Conjunto Válvulas Hidráulicas		Regular, direcionar e controlar o fluxo e a pressão do fluido hidráulico																					
4	Tubulações		Transportar os fluidos	1	Rompida	Vazamento	9	S	Vibração															
				2	Rompida	Vazamento	10	C	Falha na Soldagem das juntas															
				3	Rompida	Vazamento	9	C	Material Inadequado															
				4	Rompida	Vazamento	7	S	Fixações frouxas															
5	Sistema de Sopros																							
																		4	4	6	96			
RPN Médio 125												RPN Médio 65												

Fonte: Adaptado de FMEA HANDBOOK VERSION 4.2 (2011)

### 2.1.3 Manutenção Centrada em Confiabilidade - (RCM)

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) é um processo que visa preservar a função de um sistema, selecionando e aplicando as ações corretas de manutenção ou operação quando necessário (MOUBRAY, 1997). O RCM guia a política de manutenção, seja no nível do sistema ou na seleção de equipamentos específicos. Esse conceito é amplamente aplicável a sistemas grandes e complexos, como automóveis, aeronaves e fábricas de produtos químicos.

O RCM concentra-se na preservação das funções do sistema, identificando, caracterizando e priorizando os modos de falha que podem levar a falhas funcionais correspondentes. É crucial gerar e aplicar conhecimento crítico para implementar medidas adequadas por meio de um conjunto abrangente de ações ou tarefas para manter as funções do sistema.

Segundo Moubray (1997), a aplicação do RCM está associada a sete etapas básicas:

1. identificação de funções e seus padrões de desempenho desejados associados;
2. definição de falha funcional;
3. identificação dos modos de falha;
4. documentação dos efeitos da falha;
5. quantificação da falha;
6. análise de funções, falhas funcionais, modos de falha e sua criticidade para identificar oportunidades para melhorar o desempenho e/ou a segurança;
7. estabelecimento de tarefas de manutenção.

Após a aplicação da metodologia descrita, não apenas se alcança a otimização desejada dos recursos de manutenção e operação do sistema, mas também se observa o seguinte:

Aumento da segurança e integridade ambiental;

Maior vida útil dos equipamentos, devido à ênfase cuidadosa na manutenção baseada em condição;

Criação de um banco de dados abrangente de modos de falha e ações para evitá-los;

Gestão ideal do estoque de peças de reposição.

Geisbush e Ariaratnam, (2022), complementam que o RCM pode ser descrito como uma abordagem de "engenharia de requisitos de manutenção" que aborda questões cruciais não abordadas por outros programas de manutenção. Essa metodologia reconhece que nem todos os equipamentos em uma instalação possuem a mesma importância, tanto para o processo em si quanto para as necessidades e segurança das instalações. Ao focar na confiabilidade do equipamento, o importante é reconhecer que o design das operações do equipamento é diferente e que cada componente do equipamento tem uma probabilidade de falha decorrente da degradação. Uma abordagem centrada na confiabilidade significa estabelecer um programa de manutenção com base no entendimento das necessidades e prioridades dos equipamentos, bem como considerar as limitações de recursos financeiros e de pessoal, de forma a planejar as atividades de modo a priorizar a manutenção do equipamento, otimizando simultaneamente as operações. A Figura 5 a seguir, apresenta os delineamentos da aplicação do RCM.

#### **2.1.4 Matriz RACI**

Identificar os colaboradores e suas funções em um projeto é uma tarefa descomplicada. No entanto, quando há um número significativo de partes interessadas envolvidas, esse processo se torna mais complicado. Nestes cenários, recorre-se à matriz de responsabilidade, com o objetivo de assegurar que cada indivíduo participante compreenda claramente seu papel e suas responsabilidades no projeto. Essa ferramenta é comumente conhecida como Matriz RACI, sendo a sigla derivada das palavras em inglês "*Responsible, Accountable, Consulted and Informed*" (Responsável, Aprovador, Consultado e Informado).

A Matriz RACI desempenha um papel importante na prevenção de conflitos relacionados a responsabilidades, estabelecendo claramente as obrigações de cada indivíduo dentro de uma organização. Isso facilita a identificação de com quem se deve entrar em contato para uma determinada tarefa, eliminando qualquer ambiguidade sobre quem é responsável por cada atividade.

Principais vantagens da Matriz RACI:

1. Aprimoramento da comunicação entre os participantes, proporcionando a compreensão clara de suas responsabilidades.
2. Distribuição equitativa de tarefas, evitando sobrecarga de trabalho. A atribuição exclusiva de responsabilidades a uma única pessoa pode resultar em estresse devido ao acúmulo de tarefas.

A Figura 4 fornece explicações detalhadas sobre os significados das siglas empregadas na elaboração da matriz de responsabilidade.

Figura 4 – Matriz RACI

RACI Matriz		Papéis e Responsabilidades																				
		Responsável, Autoridade, Consultado, Informado																				
Aplicação TRIZ	PAPÉIS	ESPECIALISTA				ESPECIALISTA				ESPECIALISTA				SUPERVISOR								
		Sponsor	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Gerente de Projeto	Líder Técnico	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Consultor	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Consultor	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	
Processos ou Atividades	Status	Área 1 -Avançada				Área 2 - Engenharia				Área 3 - Grupo AF				Área 4 - PCP								
<b>Fase 1 / Atividade</b>																						
Entregável/Tarefa 1			C		A		R															
Entregável/Tarefa 2							A	R				S										
<b>Fase 4 / Atividade</b>																						
Entregável/Tarefa 1			R	A	C	I																
Entregável/Tarefa 2					A		R															
<b>Fase 3 / Atividade</b>																						
Entregável/Tarefa 1			R	A	C	I																
Entregável/Tarefa 2																						
<b>Fase 4 / Atividade</b>																						
Entregável/Tarefa 1																						
Entregável/Tarefa 2																						
Entregável/Tarefa 3																						
R	Responsável	Responsável por realizar a tarefa ou projeto.																				
A	Autoridade	Quem irá validar a atividade e o recebimento do trabalho. Somente um por tarefa.																				
C	Consultado	Profissional a ser consultado antes da tomada de decisão.																				
I	Informado	Deve ser informado após a decisão tomada.																				
S	Suporte	Auxilia o responsável pela tarefa ou projeto.																				

Fonte: O Autor (2022).



## 2.2 FERRAMENTAS VISUAIS COMO FACILITADORAS NAS ANÁLISES DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Com a evolução tecnológica cada vez mais presente na área industrial, é cada vez mais comum presenciar a utilização de softwares para auxiliar em decisões importantes do nível tático e estratégico da empresa. Porém, nem sempre uma boa gestão é refém da tecnologia. Ferramentas tradicionais podem ser mais eficazes para determinados objetivos, por sua simplicidade e acessibilidade, (SILVA e SILVA, 2021).

Silva e Silva (2021) complementam que a gestão visual tem como simples definição: tornar as coisas visuais. Ela permite a todos saberem como estão as coisas, seja num departamento, num setor, numa célula de produção ou na empresa inteira. Isso sem precisar ligar um único computador ou falar com ninguém, mas, apenas, “olhando”.

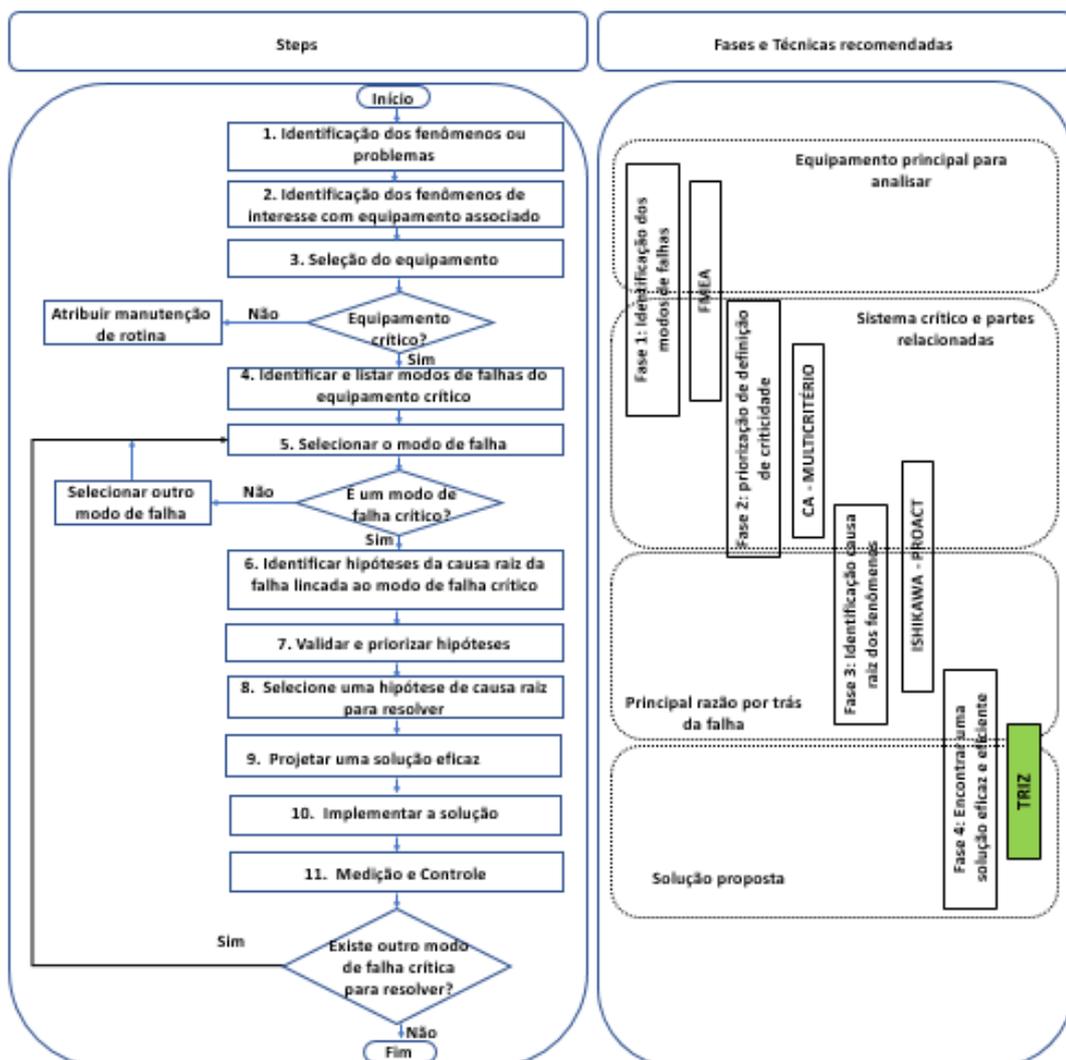
Hua et al. (2006), identificam em seu estudo, que as ferramentas, métodos e filosofias de resolução de problemas de design são numerosos e variados, e alguns deles provaram ser eficazes. Apesar da abundância de trabalhos, muitas das empresas ainda estão procurando uma solução poderosa e eficiente, que possa transformar seus processos de desenvolvimento de produtos em uma fonte de vantagem competitiva e capacidade de inovação. Para atingir esse objetivo, muitas empresas fixaram sua escolha na integração de metodologias de design para provar o velho ditado “a união faz a força”.

Viveros et al. (2019), identificam a importância da integração de diferentes técnicas, métodos e ferramentas, com uma perspectiva mais holística, para se resolver um problema. Como proposta, uma abordagem de manutenção tradicional como FMEA, integrada com Teoria de Resolução de Problemas (TRIZ) é apresentada.

Relacionado as ferramentas visuais, facilitadoras nas análises de falhas, Viveros et al. (2019) realizaram um estudo de caso que compreende quatro fases principais, cada uma contendo diversas etapas relacionadas, conforme ilustrado na Figura 5. Destaca-se a importância de um detalhamento minucioso em cada nível de cada etapa, enfocando a integração e relevância de cada fase. Na Fase 1, denominada Identificação de Modos de Falhas, são selecionados os principais equipamentos para análise, iniciando pela identificação dos fenômenos ou problemas correlacionados e, posteriormente, associando-os aos equipamentos específicos. A Fase 2 consiste na priorização e definição de criticidade, na qual são identificados os

sistemas críticos e as partes relacionadas. Nessa etapa, empregam-se ferramentas como FMEA e CA Multicritério para verificar e identificar a criticidade dos modos de falhas. Na Fase 3, ocorre a avaliação da causa raiz do fenômeno, utilizando-se o método ISHIKAWA - PROACT. As hipóteses das causas raiz são relacionadas ao modo de falha crítico, validadas, priorizadas e selecionada uma hipótese para resolução. Por fim, na Fase 4, é apresentada a Proposta para Solução, na qual se utiliza a TRIZ para identificar uma solução eficaz e eficiente. Nesse estágio, são realizados medições e controle, concluindo a análise. Verifica-se se algum outro modo de falha crítico deve ser abordado e, caso afirmativo, retorna-se à Fase 2. Caso contrário, o processo é finalizado. Aspectos aderentes ao processo de identificação de soluções são observados no fluxo apresentado, as ferramentas sugeridas ganham perspectiva maior para soluções de problemas complexos, bem como, intuito de aumentar a confiabilidade e disponibilidade do ativo.

Figura 6 - Integração ferramentas para análise de falhas



Fonte: Adaptado de Viveros et al. (2019)

### 2.2.1 TRIZ - Teoria da resolução inventiva de problemas

A TRIZ (Teoria de Resolução Inventiva de Problemas) é uma abordagem teórica amplamente aplicada para solucionar problemas técnicos, especialmente aqueles que envolvem questões inventivas, conforme destacado por (BELSKI, 2008 e LAU, 2004). Essa metodologia é especializada em lidar com problemas de natureza inovadora e inventiva, fundamentando-se no estudo desses problemas, no planejamento e implementação de soluções, e na análise dos padrões circunstanciais em que os problemas surgem, conforme enfatizado por (MATOS, 2017).

Considerando que a inovação é um conceito de extrema relevância e presente no ambiente empresarial atual, as organizações que desejam se destacar no mercado encontram na metodologia TRIZ uma maneira eficaz de diferenciar-se, descobrindo soluções inovadoras e criativas. A ampliação da criatividade resultante dessa abordagem pode proporcionar vantagens competitivas significativas em relação à concorrência, como ressalta (MARQUES, 2014).

Em 1946, Genrich Altshuller conduziu uma análise abrangente de 40.000 registros de patentes que demonstravam inventividade, após uma análise inicial de mais de 200.000 patentes, com o objetivo de explorar e identificar possíveis conceitos para a solução de problemas. Com base nessa análise, Altshuller desenvolveu um conjunto de procedimentos, técnicas e tabelas de referência para o desenvolvimento de soluções inovadoras para problemas tecnológicos, conforme destacado por (ILEVBARE et al., 2013 e LIN E WU, 2016).

Altshuller identificou 40 princípios comuns aos processos inventivos e os aplicou em uma matriz de contradições para auxiliar na solução de problemas, mencionado por (MOEHRLE, 2005 e YANG e TSAI, 2021). Ele também descobriu que mais de 90% dos problemas enfrentados pelos engenheiros em determinada área de conhecimento já haviam sido solucionados previamente em outra área, como apontado por (CARVALHO, JESUS e QUONIAN, 2016).

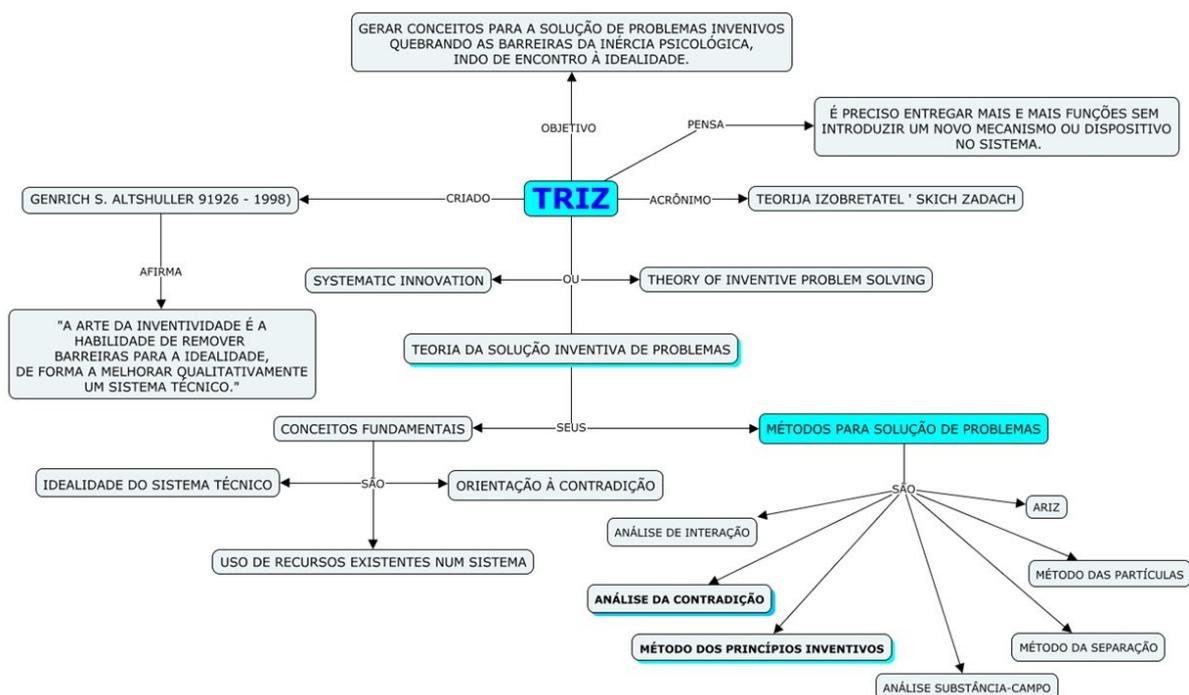
Durante o processo de resolução de problemas, a TRIZ emprega várias ferramentas, incluindo o princípio de separação, a análise do campo de substância, as 76 soluções padrão e o ARIZ. Entre essas ferramentas, a tabela de matrizes contraditórias é uma das mais conhecidas e práticas, compilando contradições técnicas comumente encontradas. Essas contradições são apresentadas em 39 parâmetros de engenharia e 40 princípios inventivos, que são utilizados para

estabelecer uma matriz contraditória e fornecer soluções para a contradição, conforme mencionado por (HSIEH e CHEN, 2009).

O processo de resolução de problemas descrito por Hsieh e Chen (2010) começa identificando os problemas técnicos ou conflitos e, em seguida, apresenta a TRIZ como uma abordagem para transformar esses problemas em problemas TRIZ. As ferramentas da TRIZ são utilizadas para obter uma solução geral para o problema TRIZ e, por fim, transferir essa solução geral para uma solução aplicável na tecnologia de engenharia.

A Figura 7 apresenta um mapa conceitual da Teoria de Resolução Inventiva de Problemas (TRIZ) e suas particularidades. A TRIZ é uma abordagem sistemática que tem como objetivo gerar conceitos para a solução de problemas inventivos, que são aqueles que exigem soluções inovadoras e criativas. Uma das principais contribuições da TRIZ é sua capacidade de quebrar as barreiras da inércia psicológica, estimulando o pensamento divergente e indo de encontro à idealidade. O mapa conceitual apresenta ainda os principais elementos da TRIZ, como acrônimo ARIZ, ferramentas e métodos para a geração de ideias e soluções criativas. Em suma, a Figura 7 apresenta uma visão geral da TRIZ e suas principais características, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de estudos e pesquisas sobre essa importante abordagem para a resolução de problemas inventivos.

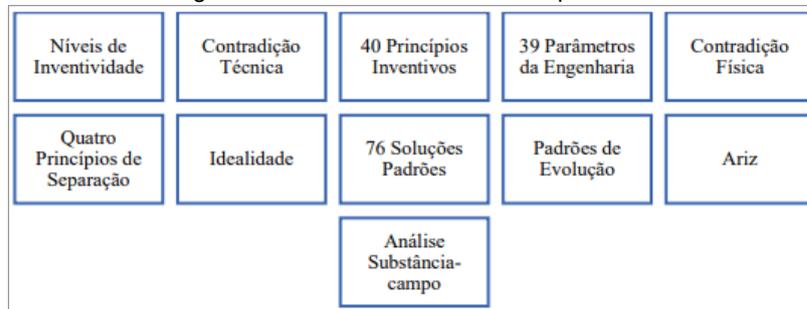
Figura 7 - Teoria de Resolução Inventiva de Problemas



Fonte: Adaptado de Martinez (2020)

A TRIZ consiste em atividades de duas etapas: identificação dos problemas e resolução dos problemas ligados à criação dos conceitos, conforme descrito por (KIM et al., 2012). Cada passo inclui várias ferramentas detalhadas. As ferramentas da TRIZ possuem características próprias e o usuário pode aplicá-las em seu próprio problema, a fim de obter soluções criativas e melhorar suas ideias e projetos. Dentre as principais ferramentas da TRIZ destacam-se: Níveis de Inventividade, Contradição Técnica, 40 Princípios Inventivos, 39 Parâmetros da Engenharia, Contradição Física, Quatro Princípios de Separação, Idealidade, 76 Soluções Padrão, Padrões de Evolução, ARIZ e Análise Campo-Substância, apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Ferramentas TRIZ e Componentes



Fonte: Adaptado de Livotov e Petrov (2015).

O procedimento geral da metodologia TRIZ começa pela identificação dos problemas específicos. Em seguida estes são transformados em problemas genéricos, em que posteriormente são selecionadas soluções genéricas para cada problema. E, por fim, estas soluções são adaptadas aos problemas específicos, identificados inicialmente, resultando em soluções inovadoras e criativas. Através das ferramentas de suporte da metodologia TRIZ, é possível esquematizar tarefas, fazer uma análise estrutural, identificar e formalizar as contradições e, por fim, encontrar soluções. Assim, através desta metodologia, é possível beneficiar as várias áreas funcionais de empresas industriais, (LIN E SU, 2007, MATOS, 2017).

No presente estudo, o objetivo principal é atuar diretamente com a Matriz de Contradições, uma das ferramentas mais importantes da TRIZ, no processo de análise de falhas em ativos industriais.

### 2.2.2 Matriz de Contradição da TRIZ

Uma contradição (conflito ou inconsistência) de sistema, ocorre quando a melhoria de certos atributos resulta a deterioração de outros. Os conflitos típicos são:

fiabilidade/complexidade; produtividade/precisão; resistência/ductilidade etc., (NAVAS, 2015, MATOS, 2017).

Navas (2015), identifica que, na metodologia TRIZ, os problemas são divididos em problemas locais e problemas globais:

1. Um problema é considerado local quando pode ser atenuado ou eliminado por modificação de um subsistema, mantendo os restantes inalterados.
2. Um problema é classificado como global quando apenas se pode resolver pelo desenvolvimento de um sistema novo, baseado num princípio de funcionamento diferente.

Conforme Demarque (2005), o princípio básico da TRIZ é que um problema técnico inventivo é definido por contradições, ou, se não houver contradições não existe problema inventivo a ser resolvido. Esta afirmação representa a base para um dos métodos de solução de problemas da TRIZ mais fáceis e rápidos de aprender: identificar contradições e usá-las para resolver problemas. Contradição é a situação em que a tentativa de melhorar uma característica do sistema degrada uma outra característica, como no caso em que para aumentar a velocidade de um automóvel aumenta-se seu consumo de combustível, ou para aumentar a resistência de uma peça mecânica também se aumenta seu peso. Ou um determinado componente em um sistema deve ser sólido e gasoso.

Altshuller propõe que a maneira de se tratar estas contradições é resolvendo-as, e é isto que ele explora com sua teoria.

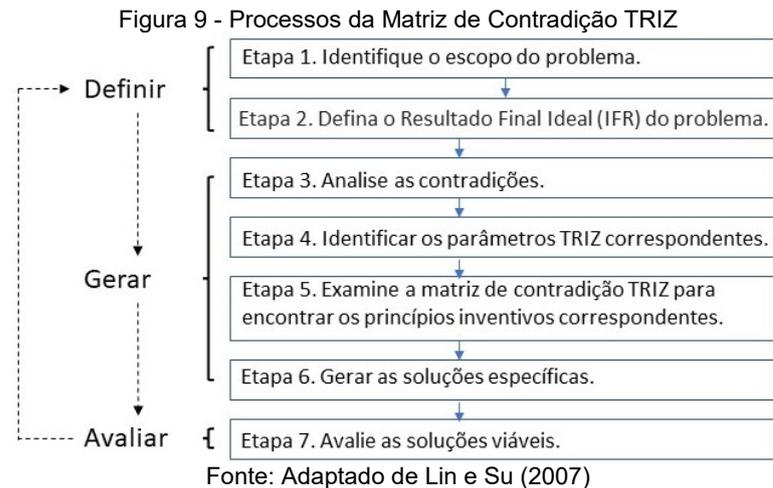
A TRIZ Clássica define dois tipos de contradições:

1. Contradições Técnicas;
2. Contradições Físicas.

A Figura 9 a seguir ilustra os processos da Matriz de Contradição TRIZ conforme apresentada por Lin e Su (2007), dividida em 7 etapas. O processo se inicia com a Etapa 1, identificação do problema. Na Etapa 2, ocorre a definição do resultado ideal do problema. A Etapa 3 complementa o processo com a análise das contradições. Na Etapa 4, são identificados os parâmetros TRIZ correspondentes ao problema. Na Etapa 5, são encontrados os princípios inventivos correspondentes. Na

Etapa 6, são geradas as soluções específicas para o problema. Por fim, a Etapa 7 consiste na avaliação das soluções viáveis.

As etapas 1 e 2 estão relacionadas ao processo de definição do problema. As etapas 3, 4, 5 e 6 fazem parte do processo de geração de soluções. E a Etapa 7 está inserida no processo de avaliação das soluções.



De acordo com Lin e Wu (2016), durante o modo de resolução de problemas, o primeiro passo é encontrar as características contraditórias. Em seguida, combinar o significado de cada contradição com dois parâmetros apropriados dos 39 parâmetros de engenharia. Então, quando confirmados esses dois parâmetros de contradição na matriz de contradição usando a TRIZ, pode-se finalmente escolher três ou quatro dos 40 princípios para resolver um possível problema.

Os 39 parâmetros de engenharia são definidos como o comportamento ou estado de um sistema tecnológico, e a maioria dos produtos de engenharia são um compromisso entre recursos concorrentes, ou seja, tentar melhorar um recurso geralmente degradado. Altshuller organizou esses 39 recursos em cada lado de uma matriz bidimensional, e em cada interseção, alguns princípios historicamente inventivos são indicados para resolver as contradições entre essas características concorrentes denotadas, (LIN e SU, 2007).

Conforme LIN e Su (2007), os 40 princípios inventivos da metodologia TRIZ fornecem explicações detalhadas sobre o raciocínio por trás das soluções propostas por cada princípio, juntamente com exemplos de como outros solucionadores de problemas utilizaram esses princípios para resolver situações envolvendo contradições. No Quadro 1, são apresentados os 39 parâmetros de engenharia, enquanto o Quadro 2 exibe os 40 princípios inventivos.

Quadro 1 - 39 parâmetros de engenharia TRIZ

1- Peso do objeto em movimento	21- Potência
2- Peso do objeto parado	22- Perda de energia
3- Comprimento do objeto em movimento	23- Perda de substância
4- Comprimento do objeto parado	24- Perda de informação
5- Área do objeto em movimento	25- Perda de tempo
6- Área do objeto parado	26- Quantidade de substância
7- Volume do objeto em movimento	27- Confiabilidade
8- Volume do objeto parado	28- Precisão de medição
9- Velocidade	29- Precisão de fabricação
10- Força	30- Fatores indesejados atuando no objeto
11- Tensão, pressão	31- Efeitos colaterais indesejados
12- Forma	32- Manufaturabilidade
13- Estabilidade do objeto	33- Conveniência de uso
14- Resistência	34- Manutenibilidade
15- Durabilidade do objeto em movimento	35- Adaptabilidade
16- Durabilidade do objeto parado	36- Complexidade do objeto
17- Temperatura	37- Complexidade de controle
18- Brilho	38- Nível de automação
19- Energia gasta pelo objeto em movimento	39- Produtividade
20- Energia gasta pelo objeto parado	

Fonte: Adaptado de Hsieh & Chen (2009)

Quadro 2 - 40 princípios inventivos da TRIZ

1- Segmentação ou Fragmentação	21- Aceleração
2- Remoção ou Extração	22- Transformação de prejuízo em lucro
3- Qualidade Localizada	23- Retroalimentação
4- Assimetria	24- Mediação
5- Fusão ou Consolidação	25- Autosserviço
6- Universalização	26- Cópia
7- Aninhamento	27- Uso e descarte
8- Contrapeso	28- Substituição de meios mecânicos
9- Compensação prévia	29- Construção pneumática ou hidráulica
10- Ação prévia	30- Uso de filmes finos e membranas flexíveis
11- Amortecimento prévio	31- Uso de materiais porosos
12- Equipotencialidade	32- Mudança de cor
13- Inversão	33- Homogeneização
14- Recurvação	34- Descarte e regeneração
15- Dinamização	35- Mudança de parâmetros e propriedades
16- Ação parcial ou excessiva	36- Mudança de fase
17- Transição para nova dimensão	37- Expansão térmica
18- Vibração mecânica	38- Uso de oxidantes fortes e atmosferas enriquecidas
19- Ação periódica	39- Uso de atmosferas inertes
20- Continuidade de ação útil	40- Uso de materiais compostos.

Fonte: Adaptado de Hsieh & Chen (2009)

A Figura 10 oferece uma visão parcial da Matriz de Contradições, a Matriz completa pode ser encontrada no Anexo I.

Figura 10 – Matriz de Contradições

TRIZ		CARACTERÍSTICA DEGRADADA		CARACTERÍSTICA MELHORADA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
		Peso do objeto em movimento	Peso do objeto parado	Comprimento do objeto em movimento	Comprimento do objeto parado	Área do objeto em movimento	Área do objeto parado	Volume do objeto em movimento	Volume do objeto parado	Velocidade	Força	Tensão, pressão	Forma	Estabilidade do objeto	Resistência	Durabilidade do objeto em movimento	Durabilidade do objeto parado	Temperatura				
1	Peso do objeto em movimento	+		15, 08, 29, 34		29, 17, 38, 34		29, 02, 40, 28		02, 08, 15, 38	08, 10, 18, 37	10, 36, 37, 40	10, 14, 35, 40	01, 35, 19, 39	28, 27, 18, 40	05, 34, 31, 35					06, 29, 04, 38	
2	Peso do objeto parado		+		10, 01, 29, 35		35, 30, 13, 02		05, 35, 14, 02		08, 10, 19, 35	13, 29, 10, 18	13, 10, 29, 14	26, 39, 01, 40	28, 02, 10, 27			02, 27, 19, 06			28, 19, 32, 22	
3	Comprimento do objeto em movimento	08, 15, 29, 34		+		15, 17, 04		07, 17, 04, 35		13, 04, 08	17, 10, 04	01, 08, 35	01, 08, 10, 29	01, 08, 15, 34	08, 35, 29, 34	19					10, 15, 19	
4	Comprimento do objeto parado		35, 28, 40, 29		+		17, 07, 10, 40		35, 08, 02, 14		28, 10	01, 14, 35	13, 14, 15, 07	39, 37, 35	15, 14, 28, 26			01, 10, 35			03, 35, 38, 18	
5	Área do objeto em movimento	02, 17, 29, 04		14, 15, 18, 04		+		07, 14, 17, 04		29, 30, 04, 34	19, 30, 35, 02	10, 15, 36, 28	05, 34, 29, 04	11, 02, 13, 39	03, 15, 40, 14	06, 03					02, 15, 16	
6	Área do objeto parado		30, 02, 14, 18		26, 07, 09, 39		+				01, 18, 35, 36	10, 15, 36, 37		02, 38	40			02, 10, 19, 30			35, 39, 38	
7	Volume do objeto em movimento	02, 26, 29, 40		01, 07, 04, 35		01, 07, 04, 17		+		29, 04, 38, 34	15, 35, 36, 37	06, 35, 36, 37	34, 28, 35, 40	28, 10, 01, 39	09, 14, 15, 07	06, 35, 04					34, 39, 10, 18	
8	Volume do objeto parado		35, 10, 19, 14	19, 14	35, 08, 02, 14			+			02, 18, 37	24, 35	07, 02, 35	34, 28, 35, 40	09, 14, 17, 15			35, 34, 38			35, 06, 04	
9	Velocidade	02, 28, 13, 38		13, 14, 08		29, 30, 34		07, 29, 34		+	13, 28, 15, 19	06, 18, 35, 40	35, 15, 18, 34	28, 33, 01, 18	08, 03, 26, 14	03, 19, 35, 05					28, 30, 36, 02	
10	Força	06, 01, 37, 18	18, 13, 01, 28	17, 19, 09, 36	28, 10	19, 10, 15	01, 18, 15	15, 09, 12, 37	02, 36, 18, 37	13, 28, 15, 12	+	18, 21, 11	10, 35, 40, 34	35, 10, 21	35, 10, 14, 27	19, 02					35, 10, 21	
11	Tensão, pressão	10, 36, 37, 40	13, 29, 10, 18	35, 10, 36	35, 01, 14, 16	10, 15, 36, 28	10, 15, 36, 37	06, 35, 10	35, 24	06, 35, 36	36, 35, 21	+	35, 04, 15, 10	35, 33, 02, 40	09, 18, 03, 40	19, 03, 27					35, 39, 19, 02	
12	Forma	06, 10, 29, 40	15, 10, 26, 03	29, 34, 05, 04	13, 14, 10, 07	05, 34, 04, 10		14, 04, 15, 22	07, 02, 35	35, 15, 34, 18	35, 10, 37, 40	34, 15, 10, 14	+	33, 01, 18, 04	30, 14, 10, 40	14, 26, 09, 25					22, 14, 19, 32	
13	Estabilidade do objeto	21, 35, 02, 39	26, 39, 01, 40	13, 15, 01, 28	37	02, 11, 13	39	28, 10, 19, 39	34, 28, 35, 40	33, 15, 28, 18	10, 35, 21, 16	02, 35, 40	22, 01, 18, 04	+	17, 09, 15	13, 27, 10, 35	39, 03, 35, 23				35, 01, 32	
14	Resistência	1, 8, 40, 15	40, 26, 27, 1	1, 15, 8, 35	15, 14, 28, 26	3, 34, 40, 29	9, 40, 28	10, 15, 14, 7	9, 14, 17, 15	8, 13, 26, 14	10, 18, 3, 14	10, 3, 18, 40	10, 30, 35, 40	13, 17, 35	+	27, 3, 26					30, 10, 40	
15	Durabilidade do objeto em movimento	19, 5, 34, 31		2, 19, 9		3, 17, 19		10, 2, 19, 30		3, 35, 5	19, 2, 16	19, 3, 27	14, 26, 28, 25	13, 3, 35	27, 3, 10	+					19, 35, 39	
16	Durabilidade do objeto parado		6, 27, 19, 16		1, 40, 35				35, 34, 38					39, 3, 35, 23			+				19, 18, 36, 40	
17	Temperatura	36, 22, 6, 38	22, 35, 32	15, 19, 9	15, 19, 9	3, 35, 39, 18	35, 38	34, 39, 40, 18	35, 6, 4	2, 28, 36, 30	35, 10, 3, 21	35, 39, 19, 2	14, 22, 19, 32	1, 35, 32	10, 30, 22, 40	19, 13, 39	19, 18, 36, 40				+	

Fonte: Adaptado de Demarque (2005)

## 2.3 REVISÃO DA LITERATURA

Durante a condução da revisão da literatura, foram exploradas as bases de dados Scopus e Science Direct, sendo que a maioria dos artigos apresentados, após refinamentos por categorias e considerando os últimos quatro anos, focalizaram-se predominantemente na melhoria de processos, na área da qualidade e no projeto de produto. Além disso, alguns artigos abordaram questões relevantes na área da Manutenção Industrial e Confiabilidade.

Vale ressaltar que a análise desses artigos contribuiu significativamente para a construção desta revisão. Dentre os temas identificados, destaca-se a atenção especial dada à análise de falhas em ativos industriais e à aplicação da Teoria de Resolução de Problemas (TRIZ) nesse contexto.

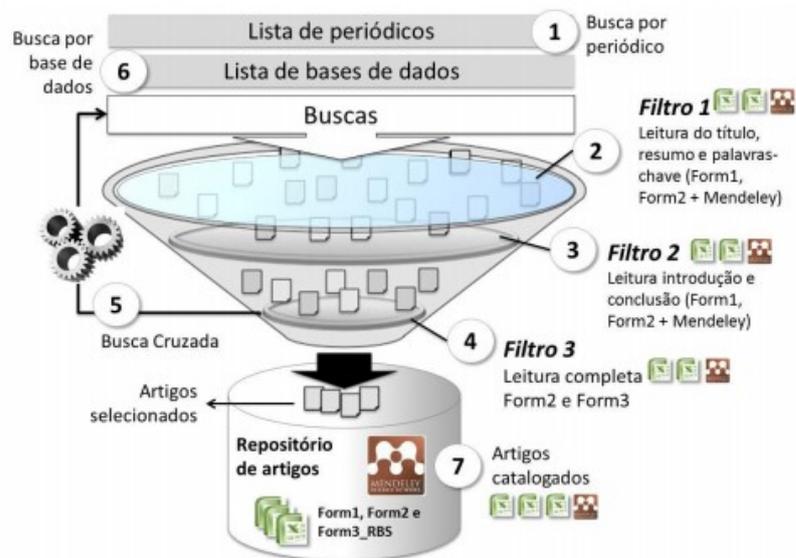
Esta revisão tem como objetivos principais a identificação dos artigos mais relevantes sobre o assunto, bem como a comparação entre as diferentes teorias e perspectivas existentes. Além disso, serão destacadas as principais contribuições e desenvolvimentos relacionados à aplicação da TRIZ em análises de falhas de equipamentos industriais, com enfoque nas avaliações mais recentes e significativas. Por fim, a revisão também trará uma análise crítica sobre o potencial impacto de futuros desenvolvimentos industriais e operacionais relacionados à aplicação da TRIZ como ferramenta de apoio em análises de falhas.

De acordo com Ravindran e Shankar (2015), revisões sistemáticas são caracterizadas por uma questão explícita, uma pesquisa abrangente e sistemática, uma estratégia reproduzível explícita para inclusão de estudos, extração de dados reproduzível, análise apropriada e interpretações apoiadas por dados. Além disso, essas revisões devem ter implicações para futuras pesquisas e, quando aplicáveis, para a política ou prática. MacLure et al. (2016) propõem algumas razões para o uso de revisões sistemáticas, incluindo identificar, avaliar e interpretar evidências de pesquisa relevantes para um tópico específico, identificar lacunas na literatura para informar estudos futuros e minimizar tendências usando métodos explícitos e sistemáticos.

Conforto et al. (2011) complementam que as revisões sistemáticas bibliográficas devem seguir um processo iterativo contendo sete passos. Na Etapa 1, são realizadas as buscas por periódicos para desenvolver uma lista deles. Na Etapa 2, é realizada a leitura e análise dos resultados usando filtros para o título e palavras-

chave. Na Etapa 3, os artigos selecionados são documentados e arquivados, junto com os resultados das buscas e filtros de leitura. Na Etapa 4, as informações documentadas são quantidades de artigos encontrados por periódico, quantidade de artigos excluídos e quantidade de artigos encontrados na busca cruzada, por exemplo. Esses dados são úteis para refinar as buscas e podem servir como embasamento para a síntese da teoria sobre o assunto pesquisado. Também são úteis para outros pesquisadores que buscam temas correlacionados, proporcionando um ponto inicial que reduz o tempo da revisão sistemática e possibilita um melhor direcionamento e foco na pesquisa.

Figura 11- Procedimento iterativo da fase de processamento RSL.



Fonte: Conforto et al (2011).

Inicialmente, foram usadas as palavras-chave "análises AND falhas AND TRIZ" em português para buscar artigos em bases de dados. A Scopus não retornou resultado e a Science Direct apresentou 1 resultado, o qual foi selecionado após filtragem por categorias. Para expandir os resultados, a busca foi realizada em inglês com as palavras "failure AND analysis AND TRIZ", o que resultou em 109 artigos na Scopus, e 80 na Science Direct. Após refinamento por categorias, TRIZ, Engineering e English, leitura dos títulos e dos resumos, 3 artigos foram selecionados.

Em seguida, a busca foi refinada com a adição da palavra "indústria" em português, não retornou resultados. Para a busca em inglês com a adição de "industrial AND equipment", foram encontrados 31 artigos na Science Direct, na Scopus não retornou resultados. Após refinamento por categorias, TRIZ, Engineering

e English, leitura dos títulos e dos resumos, 3 artigos foram selecionados. Muitos artigos da Base Scopus são apresentados também na pesquisa 7 da Figura 12.

Uma nova busca com as palavras "análise AND falhas AND TRIZ AND equipamentos AND industriais" em português, as bases consultadas não apresentaram resultados. A busca em inglês com as mesmas palavras-chave não produziu resultados na Scopus, na Science Direct, resultou em 31 artigos, dos quais 3 foram selecionados após refinamento por categorias.

Para refinar ainda mais a busca, a combinação "failure AND TRIZ" foi usada, o que resultou em 122 artigos na Scopus após filtragem por categorias, selecionados 38 artigos. Na Science Direct, foram encontrados 35 artigos, dos quais 11 foram selecionados após filtragem.

As combinações de palavras-chave utilizadas são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Protocolo de busca – TRIZ

KEY WORDS					
		Result	Selec	Result	Selec
1	análises AND falhas AND TRIZ	0	0	1	1
2	failure AND analysis AND TRIZ	109	0	80	3
3	análises AND falhas AND TRIZ AND indústria	0	0	0	0
4	failure AND analysis AND triz AND industrial AND equipment	0	0	31	3
5	análise AND falhas AND TRIZ AND equipamentos AND industriais	0	0	0	0
6	analysis AND failure AND TRIZ AND equipment AND industry	0	0	35	3
7	failure AND triz	122	38	35	11
Anos selecionados		2020/2021/2022/2023/2024			
Limitações		TRIZ, ENGINEERING, ENGLISH			

Fonte: O Autor (2022).

Para a seleção de artigos que enriquecessem a pesquisa, a etapa seguinte envolveu a análise dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos em questão. Este capítulo destaca não apenas as contribuições desses artigos, mas também os classifica com base nas abordagens específicas utilizadas em cada estudo.

No contexto da pesquisa que explora as abordagens FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha) e TRIZ (Teoria da Resolução de Problemas Inventivos), os seguintes artigos foram analisados.

Primeiramente, o estudo de Yang & Tsai (2021) intitulado "Análise e Aplicação da Gestão de Energia na Indústria 4.0 com Metodologia TRIZ" apresenta um estudo de caso detalhado sobre o sistema de gestão de instalações adotado por fabricantes de semicondutores. Os autores abordam as tendências de desenvolvimento na gestão inteligente de energia no contexto da Indústria 4.0, empregando técnicas como "Modos de Falha e Análise de Efeitos (FMEA)" e a "Teoria de Resolução de Problemas (TRIZ)" para identificar potenciais modos de falha e desenvolver componentes elétricos inteligentes para enfrentá-los.

Os resultados destacam o potencial das tecnologias práticas, como a Internet das Coisas (IoT), a coleta e transmissão de big data, e a manutenção preditiva, para evitar interrupções no sistema e melhorar a eficiência energética. Uma segunda contribuição relevante se refere à aplicação de um sistema de monitoramento preditivo em um sistema de resfriamento de processo usado na fabricação de semicondutores. Isso envolve a implementação de tecnologias inteligentes para otimizar a gestão de energia. Essas contribuições evidenciam a aplicabilidade e importância dos estudos analisados na melhoria da gestão inteligente de energia na Indústria 4.0.

O estudo de caso se concentra em um sistema de água resfriada usado na indústria de semicondutores, fornecendo água para o processo de fabricação e para o ar-condicionado. Devido ao alto consumo de energia da unidade principal do refrigerador de água, os dados de consumo de energia do sistema são coletados e transmitidos por meio da IoT para uma plataforma de gerenciamento de energia inteligente, com o objetivo de melhorar a eficiência e permitir a manutenção preditiva. O sistema de resfriamento de processo consiste em várias unidades menores, como sistemas de alimentação, elementos de controle e equipamentos de apoio operacional, todos contribuindo significativamente para o consumo de energia. As medidas atuais adotadas são predominantemente ajustes, manutenção preventiva e gerenciamento preditivo.

A aplicação da teoria TRIZ revelou soluções para desenvolver sensores capazes de monitorar o status operacional dos ventiladores, coletar dados e realizar avaliações preditivas de falhas antes de qualquer ocorrência de falha ou anomalia. Um sistema de inspeção foi implementado na plataforma de gerenciamento de energia inteligente para tomar decisões de previsão e diagnóstico de falhas. Além disso, o projeto de uma fonte de energia de carregamento sem fio foi introduzido como uma inovação, cujo design primário se alinha com os princípios da teoria TRIZ de resolução

de problemas. A integração do carregamento sem fio para sensores possibilita a criação de sensores mais inteligentes.

Por exemplo, o parâmetro técnico "Confiabilidade" refere-se à capacidade de um sistema de executar suas funções pretendidas em modos e condições previsíveis. O uso de sistemas de protocolo de rede desenvolvidos permite a separação da funcionalidade e dos aplicativos, transformando-os em um sistema de sub-rede. Isso ajuda a resolver problemas de conectividade entre diferentes sistemas e melhora a confiabilidade na coleta de dados.

O artigo de Todinov (2020) ressalta a importância de abordagens e princípios independentes para mitigar o risco técnico em projetos complexos. Segundo o autor, o uso de métodos de gerenciamento de riscos pode minimizar erros computacionais em processos complexos, enquanto o conhecido FMEA é útil para identificar problemas em componentes, mas não oferece orientação sobre os princípios de projeto para a confiabilidade. O autor destaca a metodologia TRIZ como um exemplo do poder do pensamento independente do domínio na redução do risco.

Apesar da TRIZ demonstrar o poder do pensamento independente do domínio na resolução criativa de problemas, há uma grande limitação que afeta seu uso efetivo na melhoria da confiabilidade e redução de riscos. Essa limitação reside no fato de que a TRIZ não é respaldado por modelos matemáticos ou algoritmos, que são indispensáveis em alguns casos para determinar o nível de risco e identificar os recursos para melhorar a confiabilidade.

Ao fornecer uma descrição concisa do sistema, um modelo matemático ou algoritmo pode trazer benefícios significativos na redução de riscos. Esses modelos podem levar em consideração interações complexas entre fatores críticos de risco que não podem ser intuitivamente contemplados pelos engenheiros de projeto. Em muitos casos, a construção e análise de um modelo ou algoritmo são a única maneira de obter os benefícios da redução de riscos.

Artigos que enriquecem as discussões sobre as temáticas de Análise de Criticidade, Análise de Causa Raiz e TRIZ.

O estudo conduzido por Viveros et al. (2019), intitulado "Resolução de Problemas de Confiabilidade com Base na Análise de Modo de Falha: uma Proposta Integrada Aplicada a um Estudo de Caso na Mineração", apresenta uma metodologia inovadora para abordar questões relacionadas à confiabilidade de ativos em contextos industriais. Esta abordagem combina uma análise de modos de falha de alto impacto

com a aplicação criativa e inovadora da Teoria da Resolução Inventiva de Problemas (TRIZ) como seu elemento central. O estudo demonstra a aplicação prática dessa metodologia em uma instalação de filtragem de uma empresa mineradora, onde problemas de confiabilidade foram identificados, classificados e soluções foram propostas. A metodologia proposta é composta por quatro fases distintas: identificação de modos de falha, classificação e análise de criticidade, identificação das causas raiz e busca por soluções eficazes. Para suportar essas fases, três ferramentas são sugeridas: Análise de Criticidade, Análise de Causa Raiz e TRIZ.

O principal contributo deste estudo reside na apresentação de uma metodologia integrada que fornece uma abordagem passo a passo lógica para resolver problemas relacionados com a confiabilidade de ativos em processos industriais, destacando-se também pela aplicação inovadora da TRIZ, que geralmente não é usada para esses tipos de problemas. Este estudo demonstra que a metodologia integra várias ferramentas e técnicas que têm sido aplicadas de forma isolada, resultando em sinergias significativas. No entanto, o estudo também destaca a necessidade de avaliação contínua das soluções propostas na quarta fase, para garantir a eficácia das melhorias implementadas.

A literatura científica oferece diversas metodologias para o gerenciamento de ativos e análises de confiabilidade, apoiadas por várias ferramentas e técnicas. Estas ferramentas podem ser classificadas em dois níveis, estratégico e tático, e são destinadas a auxiliar na tomada de decisões. As estratégias se concentram no desenvolvimento estratégico e planejamento econômico, enquanto as ferramentas táticas são usadas para priorização, diagnóstico e prognóstico.

A integração das técnicas de Análise de Criticidade (CA), Análise de Causa Raiz (RCA) e Teoria da Resolução Inventiva de Problemas (TRIZ) é especialmente valiosa, uma vez que essas técnicas complementam umas às outras. A CA ajuda a identificar os problemas críticos, a RCA investiga as causas fundamentais e a TRIZ fornece uma estrutura lógica para gerar soluções criativas. A integração dessas técnicas ao longo das quatro fases da metodologia visa superar as limitações individuais dessas técnicas, uma vez que cada uma delas desempenha um papel específico e independente.

Em resumo, a metodologia proposta é uma sequência lógica de 11 passos que guia a análise de problemas, a proposição de soluções e melhorias, e se alinha com as quatro fases principais mencionadas. Esta metodologia visa fornecer orientação

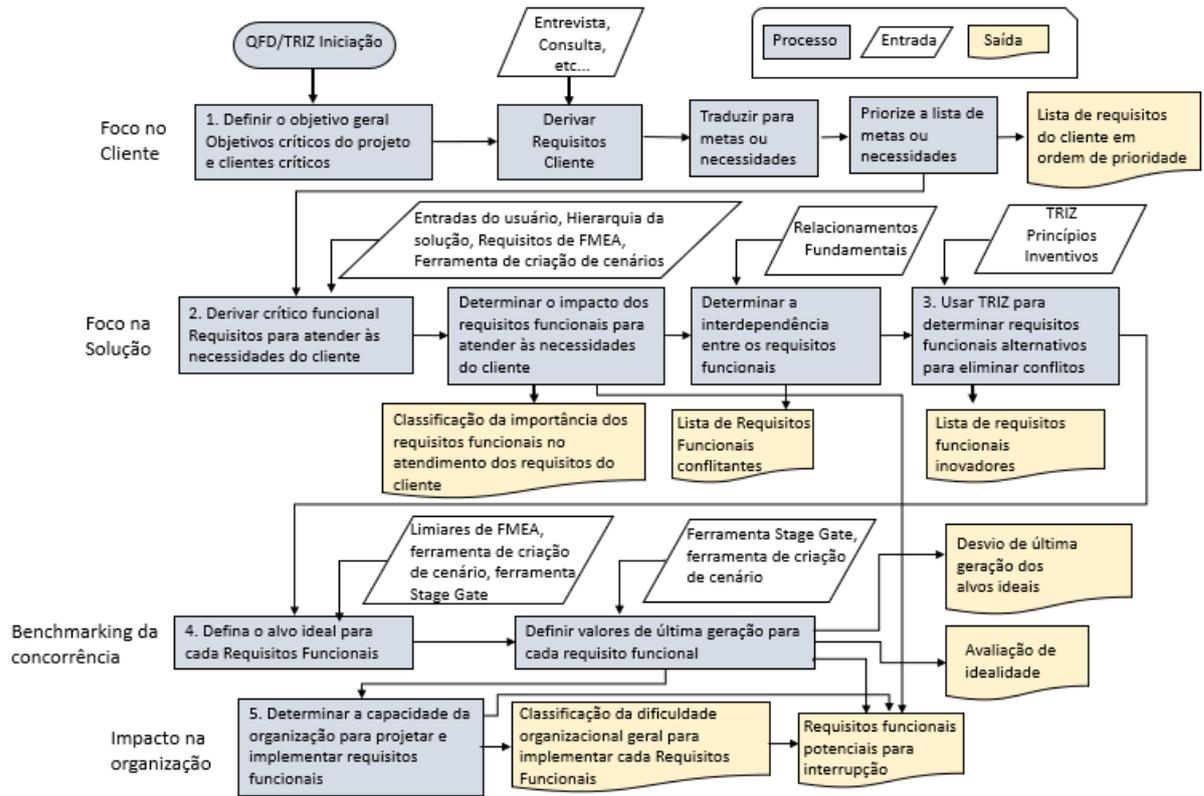
abrangente para a análise e resolução de problemas, integrando diferentes métodos e técnicas para resolver problemas de forma holística, desde a identificação até a proposição de soluções. A metodologia é particularmente útil devido à sua integração de fases e ao uso de ferramentas amplamente conhecidas na indústria.

Artigos que enriquecem as discussões relacionadas às temáticas de QT-Kano, QFD, TRIZ e FMEA.

Os artigos Chin-Sen et al (2021), Almannai, Greenough e Kay (2008) e Yamashina, Ito e Kawada (2002) apresentam metodologias para reduzir falhas em processos de desenvolvimento de novos produtos. As abordagens incluem o modelo QT-Kano, que integra a implantação da função de qualidade (QFD), a teoria da resolução inventiva de problemas (TRIZ) e um modelo refinado Kano, bem como a análise de modos de falhas e seus efeitos (FMEA). A TRIZ é uma abordagem sistemática para a resolução de problemas que tem sido aplicada em diversos campos.

O estudo de Tunga et al. (2021) adapta e integra ferramentas sistemáticas de resolução de problemas para o setor de energia oceânica, incluindo TRIZ, QFD e FMEA. A integração da TRIZ no QFD permite aos designers definir o problema de inovação e identificar compensações no sistema, gerando conceitos de design para requisitos contraditórios, enquanto o FMEA é usado para avaliar riscos técnicos associados aos conceitos propostos. Os autores citam várias técnicas para a resolução de problemas e os métodos fundamentais incluem melhoria incremental, síntese de ideias existentes, abordagem revolucionária, reaplicação além da aplicação declarada e a percepção criativa, a Figura 13 apresenta em detalhes o fluxo de interação das ferramentas citadas anteriormente.

Figura 13 - Fluxograma para descrever a abordagem desenvolvida



Fonte: Adaptado de Tunga et al (2021).

Um ponto de extrema importância no desenvolvimento deste estudo se destaca durante o terceiro processo, no qual se descreve a lista de requisitos funcionais inovadores. Nessa fase, propõe-se a aplicação da TRIZ para a identificação de requisitos funcionais alternativos, visando eliminar conflitos. É notável a contribuição significativa oferecida pelos autores nesse contexto.

Artigos relacionadas às temáticas de FMEA, FUZZY, TRIZ e Service Blueprint.

O artigo de Shie et al. (2020) apresenta um modelo de decisão de projeto estrutural que combina diversas ferramentas analíticas, incluindo Service Blueprint, FMEA, Método Fuzzy e a teoria TRIZ. O estudo utiliza um levantamento empírico de agências de atenção domiciliar em Pequim para demonstrar como o modelo proposto pode melhorar os serviços nessa área, assim como projetos de equipamentos médicos e serviços de entrega.

O modelo proposto, denominado 2S2I, integra as ferramentas Service Blueprint, Método-Fuzzy e FMEA, permitindo que os designers de serviço identifiquem problemas de falha de serviço, analisem suas causas e efeitos, e desenvolvam um modelo de processo de inovação de serviços. O modelo 2S2I adota uma abordagem centrada no especialista, permitindo a tomada de decisão e a filtragem dos princípios

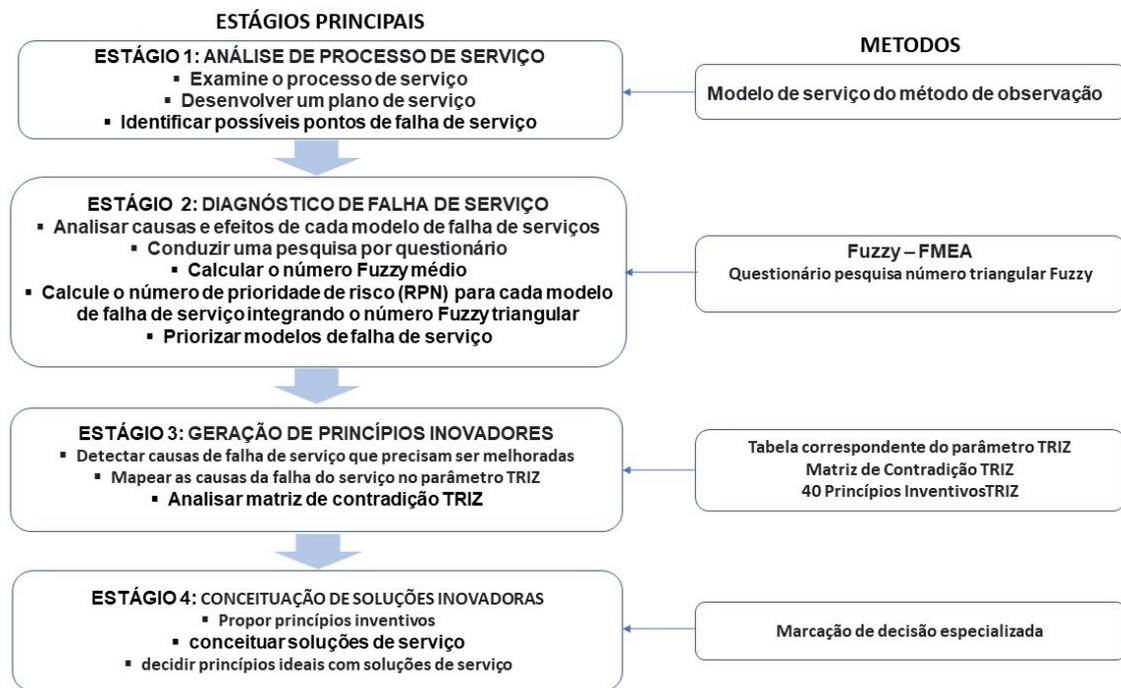
inventivos para a concepção de soluções de serviço com base nesses princípios, além disso, o modelo utiliza a matriz de contradição TRIZ para eliminar conflitos e gerar princípios de soluções inovadoras durante o processo de conceituação do serviço.

O modelo inclui quatro estágios: Análise do processo de serviço, Serviço diagnóstico de falha, Geração de princípios inovadores e Conceituação de Soluções Inovadoras. No terceiro estágio, soluções inovadoras são criadas a partir de tabelas de princípios TRIZ, usando a matriz de contradição TRIZ. Os modelos de falha de serviço mais críticos são identificados e as características do serviço são consideradas através da tabela de parâmetros TRIZ e dos 40 princípios inventivos. Os princípios inventivos TRIZ correspondentes são gerados utilizando a matriz de contradição TRIZ. Em seguida, os princípios inventivos da TRIZ são filtrados utilizando um procedimento de tomada de decisão.

Os princípios inventivos selecionados são avaliados por gerentes de serviços e especialistas, e as soluções de serviço propostas são inspiradas nesses princípios. As soluções ótimas são selecionadas como resultados dos conceitos de serviços. Os princípios inventivos são avaliados por especialistas, considerando critérios como inovatividade, resolução de problemas existentes e benefícios esperados para melhorar o sistema de atendimento. Os especialistas utilizam uma escala Likert de 5 pontos para essa avaliação.

Em resumo, o estudo propõe um modelo de decisão de design que combina diversas ferramentas analíticas para aprimorar os serviços de atendimento domiciliar, projetos de equipamentos médicos e serviços de entrega. Apresentado na Figura 14, fluxo da interação dos estágios descritos anteriormente.

Figura 14- Modelo de decisão de design Fuzzi



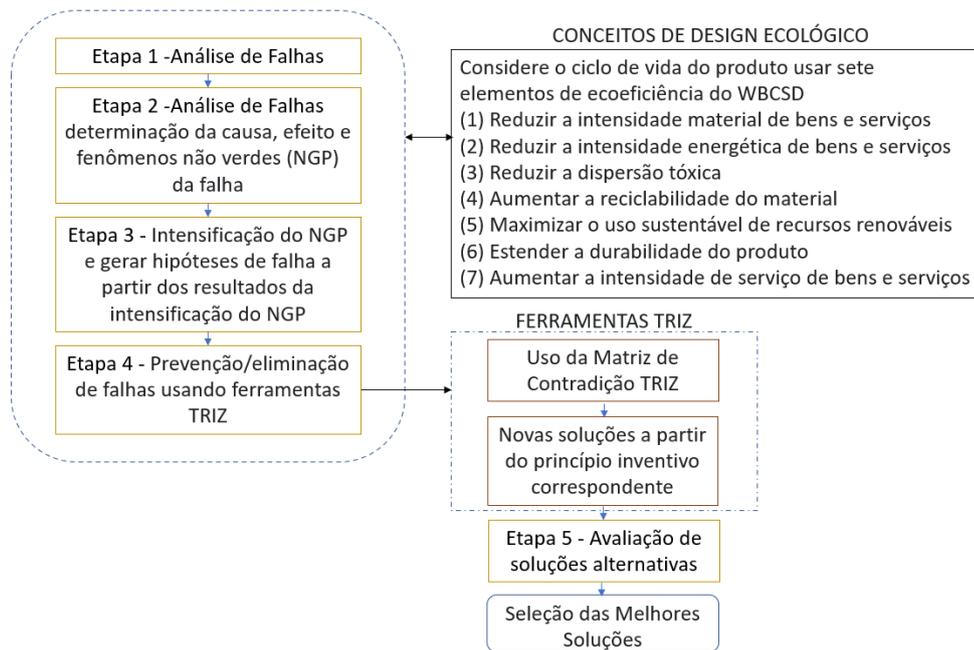
Fonte: Adaptado de Shie et al. (2020)

Artigos relacionadas às temáticas de AFD e TRIZ.

Os artigos de Rau, Lagapa e Chen (2021), Ke, Jiang, Zhu e Wang (2021), e Yang & Tsai (2021) apresentam propostas para melhorar o processo de design e gestão de produtos e sistemas industriais.

O artigo de Rau, Lagapa e Chen (2021) propõe uma abordagem de ecodesign de produtos, que envolve a identificação de fenômenos não verdes que levam à falha do produto e a eliminação desses fenômenos utilizando a matriz de contradição TRIZ. O estudo utiliza uma máquina de lavar como estudo de caso para verificar a eficácia do procedimento proposto. O processo de resolução de problemas, apresentado na Figura 15, integra o método AFD (*Anticipatory Failure Determination*), a matriz de contradição e elementos de design ecológico para projetar produtos verdes. A ideia é tratar problemas não ecológicos em um produto ou sistema como uma falta de cuidado. Uma vez identificada a falha, o método AFD pode ser utilizado. Além disso, o estudo considera conceitos de ecodesign no processo de design do produto ou sistema. O processo é dividido em etapas, incluindo análise de falha, determinação da causa, efeito e fenômenos não verdes NGP (*Non-Green Phenomena*) da falha, intensificação do NGP e geração de hipóteses de falha a partir dos resultados da intensificação do NGP, eliminação de falhas usando a matriz de contradição e avaliação de soluções alternativas.

Figura 15 - Processo de solução de problemas.



Fonte: Rau, Lagapa e Chen (2021)

Na etapa de eliminação de falhas, a matriz de contradição é utilizada com a regra “se-então-mas”. Se a hipótese não verde for eliminada, um parâmetro de melhoria é obtido, mas também ocorre um parâmetro de piora. A partir da contradição, são encontrados os princípios inventivos sugeridos na interseção da Matriz de Contradição. Esses princípios inventivos fornecem soluções baseadas no conhecimento de designers que resolveram problemas semelhantes anteriormente.

As possíveis soluções alternativas são avaliadas usando cinco critérios de avaliação, apresentados na Figura 16, que incluem funcionalidade do produto, consumo de energia, conveniência de operação, facilidade de fabricação e custo. Cada critério possui três níveis e suas descrições correspondentes. As soluções alternativas são avaliadas de acordo com esses critérios e suas escalas de desempenho.

Figura 16- Rubrica de pontuação para os critérios.

Critério	1-Pobre	3-Média	9-Excelente
Funcionalidade do produto	Funcionalidade pobre	Funcionalidade média	Excelente funcionalidade
Consumo de energia	Alto consumo de energia	Consumo médio de energia	Baixo consumo de energia
Conveniência de operação	Difícil de operar	Pode tolerar a complexidade da operação	Fácil de operar
Facilidade de fabricação	Difícil de fabricar	Pode tolerar a complexidade da fabricação	Fácil de fabricar
Custo	Alto custo	Custo razoável	Baixo custo

Fonte: Rau, Lagapa e Chen (2021)

O design do novo produto é baseado nos resultados da avaliação das soluções alternativas. No entanto, após a avaliação, pode ser necessário selecionar ou

combinar as soluções alternativas, o que depende da decisão dos solucionadores de problemas sobre quais soluções desejam implementar. O solucionador de problemas também decide a pontuação total mínima das soluções alternativas que deseja utilizar na criação do novo produto.

Artigos relacionadas às temáticas de QFD, BPMN, TOC, TRIZ.

Já o artigo de Ke, Jiang, Zhu e Wang (2021), propõe um método de projeto integrado para processos de remanufatura baseado na demanda de desempenho. Eles utilizam técnicas como Kansei Engineering, QFD (*Quality Functional Development*), BPNN (*Back Propagation Neural Network*), TOC (*Theory of Constraint*) e TRIZ para gerar com precisão o esquema do processo de remanufatura e resolver conflitos. Eles também utilizam o exemplo de descarte de produtos em fim de vida (*End of Life*) para demonstrar a eficácia do método proposto.

Este estudo utiliza como exemplo o trilho-guia de uma máquina-ferramenta para verificar a viabilidade do método de design do processo de remanufatura. O trilho-guia, que é uma parte crucial da máquina-ferramenta, está sujeito a falhas, como desgaste, fluência, rachaduras e deformações durante o uso, o que afeta a precisão, tamanho e resistência da peça. Portanto, é necessário projetar um processo de remanufatura adequado para o esquema do trilho-guia usado, que possa restaurar o desempenho do trilho-guia usado para uma condição nova ou até mesmo superior à nova (atualização).

No estudo de caso, foram coletados dados de 100 peças do processo de remanufatura pelo remanufaturador, e dados de 50 peças de demanda de desempenho foram coletados usando uma escala Likert. Esses dados de desempenho envolvem principalmente melhorias na dureza, recuperação da planicidade, superfície lisa do trilho-guia, rigidez estável do trilho-guia e tolerância de tamanho. Após identificar os conflitos no esquema do processo de remanufatura, a teoria TRIZ é aplicada para resolvê-los. Primeiramente, é mapeado os problemas do processo para parâmetros de engenharia na matriz de conflito TRIZ, estabelecendo a relação entre eles. Por exemplo, a precisão e o tamanho formam um par de conflitos, em que a precisão do trilho-guia está associada à precisão de fabricação e o tamanho do trilho-guia está relacionado ao volume do objeto estacionário nos parâmetros de engenharia da TRIZ. Em seguida, são encontrados os princípios inventivos correspondentes de acordo com a tabela da matriz de conflito, e o processo de aplicação desses princípios é apresentado. Por fim, analisando os princípios de cada

invenção, o princípio da pré-ação é identificado como uma solução para resolver os conflitos de processo, no qual a fundição a laser é realizada antes do processo de retificação, e as soluções são apresentadas.

Artigos relacionados à aplicação da TRIZ.

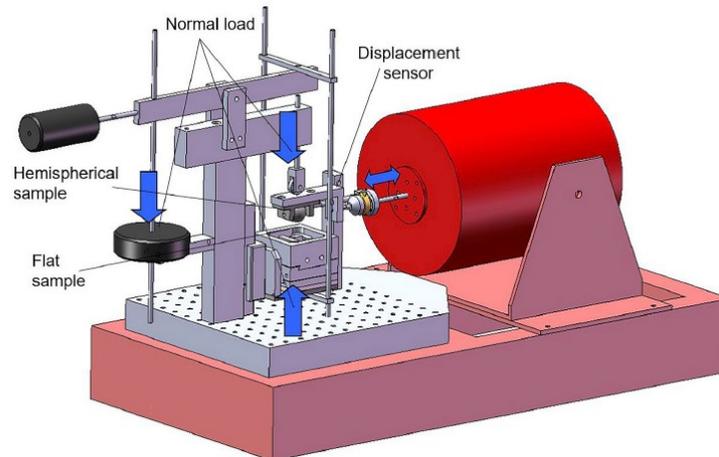
No estudo conduzido por Liskiewicz et al. (2020), os conectores elétricos automotivos, fundamentais para a segurança e eficiência dos veículos, foram investigados com ênfase na identificação da corrosão induzida pelo atrito como uma causa significativa da limitação da durabilidade desses componentes. Utilizando a metodologia TRIZ, os pesquisadores exploraram a texturização da superfície como uma abordagem viável para prolongar a vida útil dos contatos, reduzindo a resistência elétrica. A pesquisa destacou a relação entre a rugosidade da superfície e a resistência de contato elétrico, demonstrando como a TRIZ foi valiosa na identificação de aprimoramentos na durabilidade dos conectores automotivos.

A metodologia TRIZ serviu como um guia para sugestões de soluções futuras, permitindo que engenheiros e cientistas explorassem bancos de dados de patentes em busca de elementos ativos relevantes e suas aplicações. Um exemplo notável foi a empresa de vidro Pilkington, que inicialmente buscava vidros extremamente lisos, mas, por meio da TRIZ, descobriu o vidro "autolimpante" ao adicionar microprotrusões. Além disso, os autores aplicaram o roteiro de tendências da TRIZ para identificar benefícios potenciais ao analisar a evolução lógica das formas e texturas de superfície.

Por meio de experimentos, demonstraram a capacidade de controlar a vida útil do contato elétrico em condições de corrosão por atrito por meio da texturização superficial adequada. Evidenciaram que superfícies texturizadas têm resistência elétrica inferior em comparação com superfícies lisas e polidas. No entanto, ressaltaram a importância de considerar a amplitude de deslocamento da textura, pois amplitudes maiores aceleram a degradação devido à acumulação de partículas de desgaste e formação de camadas isolantes de óxido.

Este estudo concentrou-se na análise de risco técnico de conectores elétricos na indústria automotiva e se enquadrou no contexto da tribologia, uma disciplina explorada pelos autores, destacando a importância da TRIZ como uma ferramenta valiosa para solucionar desafios complexos relacionados à durabilidade e eficiência de componentes automotivos. A Figura 17 apresenta o dispositivo para o Teste de vida acelerada dos componentes

Figura 17 - Dispositivo para o Teste de vida acelerada dos componentes



Fonte: Liskiewicz (2020).

Bai et al. (2020) introduzem uma metodologia que integra a previsão de falhas, a confiabilidade cognitiva e a análise de erros com o propósito de aprimorar a confiabilidade de produtos. Essa abordagem vai além das tradicionais técnicas de análise de falhas, oferecendo a capacidade de antecipar possíveis problemas e aplicar estratégias eficazes para evitá-los. O método, denominado iACTC (Integração de AFD, CREAM e TRIZ) para análise de falhas e melhoria de produtos, é dividido em quatro etapas, conforme exemplificado na Figura 18.

Na primeira fase, a criação de modos de falha começa pela identificação de potenciais falhas por meio de previsões, adotando uma abordagem ampla para compreender os problemas associados ao produto. Problemas adicionais correlacionados, como desvantagens e efeitos secundários, também são coletados e minuciosamente analisados. O foco principal é alcançar uma identificação completa dos modos de falha possíveis, estimulando o pensamento criativo e inovador.

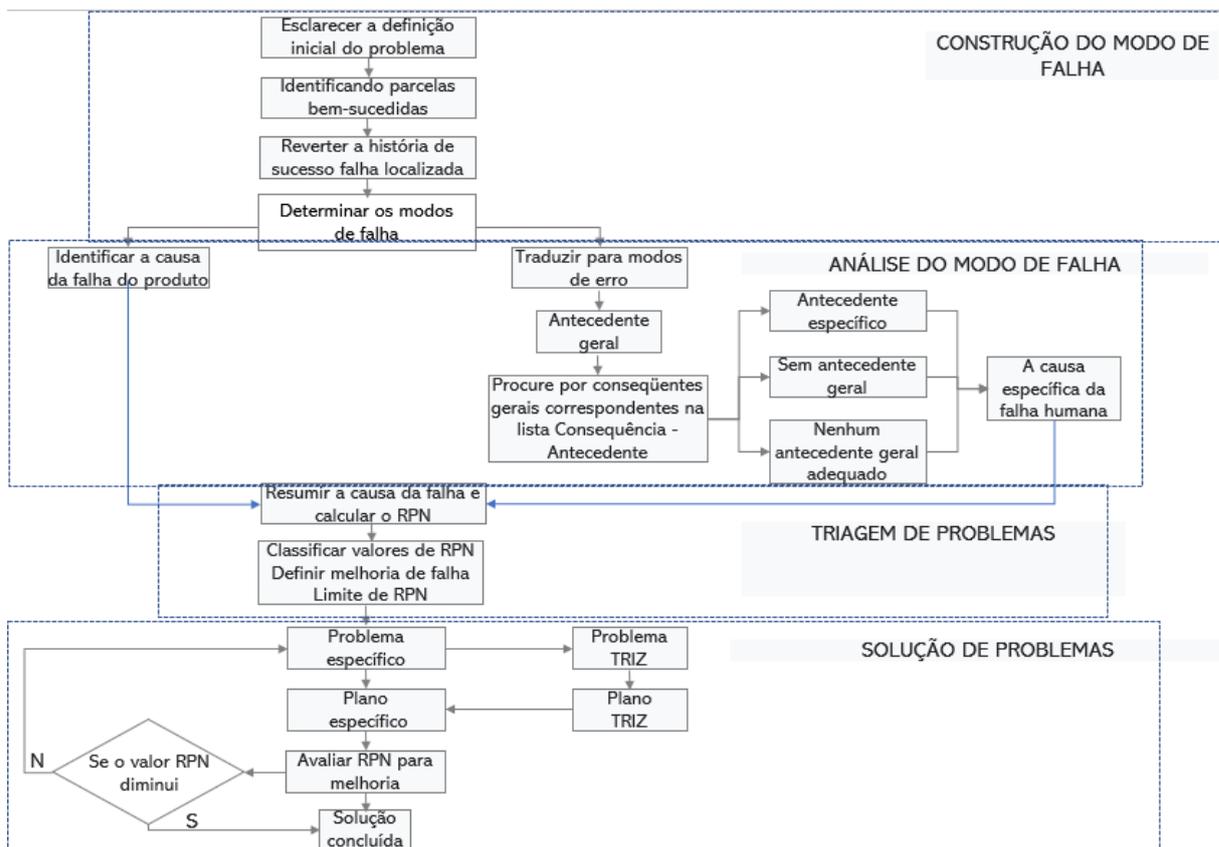
A segunda etapa, análise de modos de falha, tem como objetivo descobrir as causas das falhas do produto, empregando um método fundamentado na confiabilidade cognitiva e na análise de erros. Isso envolve a investigação de fatores humanos e a análise de oito tipos de modos de falha, abrangendo tempo, duração, força, velocidade, direção, distância, sequência e objeto. Essa análise detalhada auxilia na identificação das causas fundamentais das falhas, considerando diversos antecedentes gerais e específicos em uma lista encadeada de consequências e antecedentes.

O processo de análise é estruturado de forma a garantir uma abordagem metódica para explorar todas as possíveis ramificações. Os antecedentes são

selecionados com base na sua relevância e lógica causal, e a análise continua até que não haja antecedentes razoáveis disponíveis. Esse método rigoroso de análise proporciona uma compreensão completa das causas das falhas e permite a identificação de soluções eficazes.

Dessa forma, a metodologia introduzida por Bai et al. (2020) oferece uma abordagem avançada para a análise de falhas e aprimoramento de produtos, transcendendo as abordagens tradicionais ao integrar elementos da TRIZ e da confiabilidade cognitiva. Isso resulta em um processo estruturado e criativo para aprimorar a confiabilidade dos sistemas de produtos, começando pela triagem de problemas e culminando na resolução de falhas, utilizando ferramentas TRIZ para aprimorar continuamente o produto e sua confiabilidade.

Figura 18– Método iACTC



Fonte: Adaptado de Bai et al (2020)

Embora as metodologias propostas demonstrem potencialidades na resolução de problemas de confiabilidade em ativos industriais, foi identificado um conjunto de lacunas nos estudos revisados. Estas lacunas incluem a ausência de aplicação prática da TRIZ em situações reais de análise de falhas em ativos industriais, a limitação na comparação com outras ferramentas de análise de falhas e a falta de estudos que

avaliem a eficácia da TRIZ em comparação com outras abordagens de resolução de problemas.

Dada a identificação dessas lacunas, o objetivo deste estudo é avaliar a eficácia da TRIZ na resolução de problemas de confiabilidade em ativos industriais. Para abordar essas deficiências, são necessárias pesquisas futuras que se concentrem nessas áreas específicas, a fim de obter uma compreensão mais profunda e uma validação adequada da TRIZ como uma abordagem eficaz para resolver problemas de confiabilidade em ambientes industriais.

Ao abordar as limitações mencionadas, este estudo contribui para o avanço contínuo do campo de análise de falhas e resolução de problemas em ativos industriais. A intenção é que os resultados e conclusões obtidos preencham as lacunas identificadas e ofereçam perspectivas valiosas para a aplicação da TRIZ e outras abordagens na gestão da confiabilidade de ativos industriais. O objetivo é enriquecer o conhecimento e as práticas nesse domínio, acreditando que esse trabalho pode catalisar progressos significativos na eficácia e eficiência das soluções adotadas para enfrentar desafios relacionados à confiabilidade.

A combinação de abordagens, como a TRIZ, com metodologias como o RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade), tem o objetivo de proporcionar uma compreensão mais abrangente dos desafios enfrentados na manutenção de ativos industriais. Essa integração visa fundamentar as decisões de maneira mais sólida e fornecer soluções mais eficazes para garantir a confiabilidade e o desempenho sustentável das operações industriais. A utilização da TRIZ em conjunto com o RCM permite uma análise mais aprofundada das falhas, ao mesmo tempo em que estimula a geração de ideias inovadoras para aprimorar as estratégias de manutenção. Assim, essa combinação pode impulsionar a implementação de ações proativas e preventivas, resultando em uma maior eficiência operacional e na redução de custos a longo prazo.

A ferramenta TRIZ (Teoria da Resolução de Problemas Inventivos) pode oferecer uma contribuição significativa para a análise de falhas no contexto do RCM. A TRIZ é uma abordagem sistemática para solucionar problemas e gerar ideias inovadoras. Ela disponibiliza um conjunto de princípios e métodos que auxiliam na identificação de soluções criativas para problemas complexos. Ao aplicar a TRIZ na análise de falhas no RCM, é possível seguir um conjunto de etapas, incluindo a seleção do ativo a ser analisado, a definição dos limites do sistema, a identificação

das funções do ativo, a determinação das falhas funcionais, a realização de uma análise de modo e efeito de falha (FMEA) com o auxílio da TRIZ, a análise de decisão para identificar ações preventivas e proativas e a elaboração de um plano de manutenção.

Ao incorporar a TRIZ na abordagem do RCM, podem ser alcançados benefícios adicionais, como a geração de soluções inovadoras para problemas recorrentes e a identificação de estratégias de manutenção eficazes. Essa integração amplia as capacidades de análise e resolução de problemas no contexto da confiabilidade de ativos industriais.

## 2.4 ASPECTOS IMPORTANTES

A partir da análise de artigos científicos sobre a TRIZ - Teoria de Resolução Inventiva de Problemas, é possível identificar problemas que podem ser solucionados por meio dessa metodologia, tais como: falta de inovação, dificuldade em identificar e resolver problemas e problemas em encontrar soluções eficazes e eficientes. Por outro lado, a TRIZ apresenta oportunidades para a solução de problemas, como o uso de ferramentas de criatividade e o desenvolvimento de soluções mais simples e econômicas, principalmente em análise de falhas de ativos industriais.

Dessa forma, a TRIZ pode ser aplicada em diversos setores, como a indústria automotiva, aeroespacial, de energia e saúde, entre outros. É importante destacar que a utilização da TRIZ pode ser complementada com outras metodologias de análise de falhas em ativos industriais, para alcançar resultados ainda mais efetivos.

Assim, propõe-se a adoção de um modelo que integre a TRIZ com outras metodologias de melhoria contínua, visando resolver problemas complexos e encontrar soluções inovadoras de forma mais eficiente e eficaz, especialmente em análise de falhas de ativos industriais.

Portanto, sugere-se a adoção de um modelo que integre a TRIZ com outras metodologias de melhoria contínua, como o RCM, com o objetivo de resolver problemas complexos e encontrar soluções inovadoras de forma mais eficiente e eficaz, especialmente na análise de falhas de ativos industriais. Essa combinação de abordagens tem o potencial de trazer benefícios significativos para as empresas, tais como a redução de custos, o aumento da eficiência operacional e o aprimoramento da qualidade dos produtos e serviços oferecidos. Ao adotar essa abordagem

integrada, as organizações podem alcançar melhores resultados e obter vantagens competitivas, ao enfrentar os desafios cada vez mais complexos da gestão da confiabilidade de ativos industriais.

Quadro 3- Abordagens TRIZ e integração com o RCM

MODELO	Abordagem	Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
TRIZ	Resolução Inventiva de Problemas	Facilita a resolução de problemas complexos.	Pode exigir treinamento significativo para a sua aplicação.
		Promove a inovação e criatividade.	Pode ser necessário um tempo considerável para dominar a metodologia.
		Ajuda a desenvolver soluções mais simples e econômicas.	Não é uma solução única para todos os tipos de problemas.
Integração TRIZ-RCM	Combinação de TRIZ (Teoria de Resolução Inventiva de Problemas) com o RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade)	Aborda problemas complexos de análise de falhas.	Requer coordenação entre equipes com conhecimentos distintos em TRIZ e RCM.
		Oferece a possibilidade de encontrar soluções inovadoras e eficazes.	Pode demandar um período de adaptação organizacional.
		Potencial para redução de custos e aumento da eficiência operacional.	Exige investimento em treinamento e educação para os colaboradores.
		Melhora a qualidade dos produtos e serviços oferecidos.	
		Proporciona vantagens competitivas ao enfrentar desafios na gestão da confiabilidade de ativos industriais.	

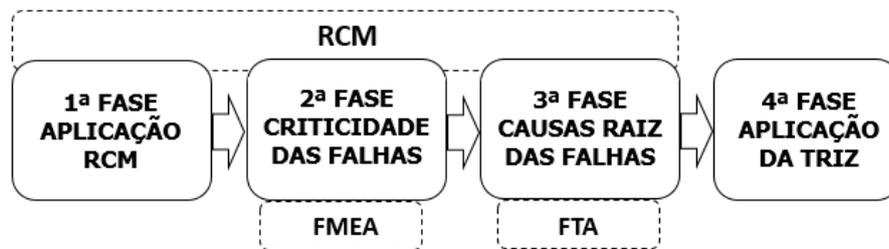
Fonte: O Autor (2022).

O quadro fornece uma visão geral das abordagens TRIZ e da integração da TRIZ com o RCM, destacando seus aspectos positivos e negativos em relação à resolução de problemas e à melhoria da confiabilidade de ativos industriais.

### 3 MODELO PROPOSTO 4FTRIZ

O modelo proposto 4FTRIZ para a utilização da matriz de contradição no processo de análise de falhas de ativos industriais é composto por quatro fases distintas, cada uma delas com subfases sequenciais que desempenham papéis essenciais na melhoria da confiabilidade dos ativos em contextos industriais. Cada fase apresenta vantagens específicas e é indispensável para o êxito geral do modelo. O fluxograma apresentado oferece uma representação visual das fases e subfases do modelo, as quais foram meticulosamente delineadas para assegurar uma abordagem integrada e eficaz na resolução de problemas relacionados à confiabilidade dos ativos industriais. Cada etapa do modelo desempenha um papel crucial no processo, e as subfases contidas em cada uma delas fornecem diretrizes claras sobre como alcançar os objetivos específicos de cada fase. O fluxograma se configura como uma ferramenta essencial para os usuários do modelo, proporcionando uma visão abrangente do processo e auxiliando-os no acompanhamento do progresso à medida que avançam pelas diversas fases e subfases.

Figura 19 – Fases da aplicação do modelo 4FTRIZ



Fonte: O Autor (2022).

Nas Fases 1, 2 e 3, é realizada a aplicação do RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade), que tem como objetivo estabelecer as informações essenciais para a identificação dos modos de falha.

Na Fase 2, as criticidades das falhas são analisadas utilizando a metodologia FMEA (Análise do Modo e Efeito de Falha).

Na Fase 3, ocorre a identificação das causas raiz das falhas, e nessa etapa, é empregada a metodologia FTA (Análise de Árvore de Falhas).

Na última fase, que é a Fase 4, acontece a aplicação da TRIZ (Teoria da Resolução Inventiva de Problemas). Por meio da Matriz de Contradições, são

encontrados os princípios inventivos e soluções para os problemas que foram analisados.

### 3.1 FASE 1: RCM, IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

Na etapa inicial do processo de análise de falhas de ativos industriais, a abordagem começa com a identificação das necessidades de manutenção pela equipe responsável pela manutenção, em colaboração com os profissionais encarregados do processo produtivo, e com o suporte do setor PCM. Essa fase primordial utiliza a metodologia RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade), destacando-se como um passo crucial para compreender os possíveis modos de falha dos ativos envolvidos no processo industrial. Ao analisar dados históricos, tendências e outras ferramentas de coleta de dados, é possível mapear de maneira precisa os modos de falha, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção preventiva.

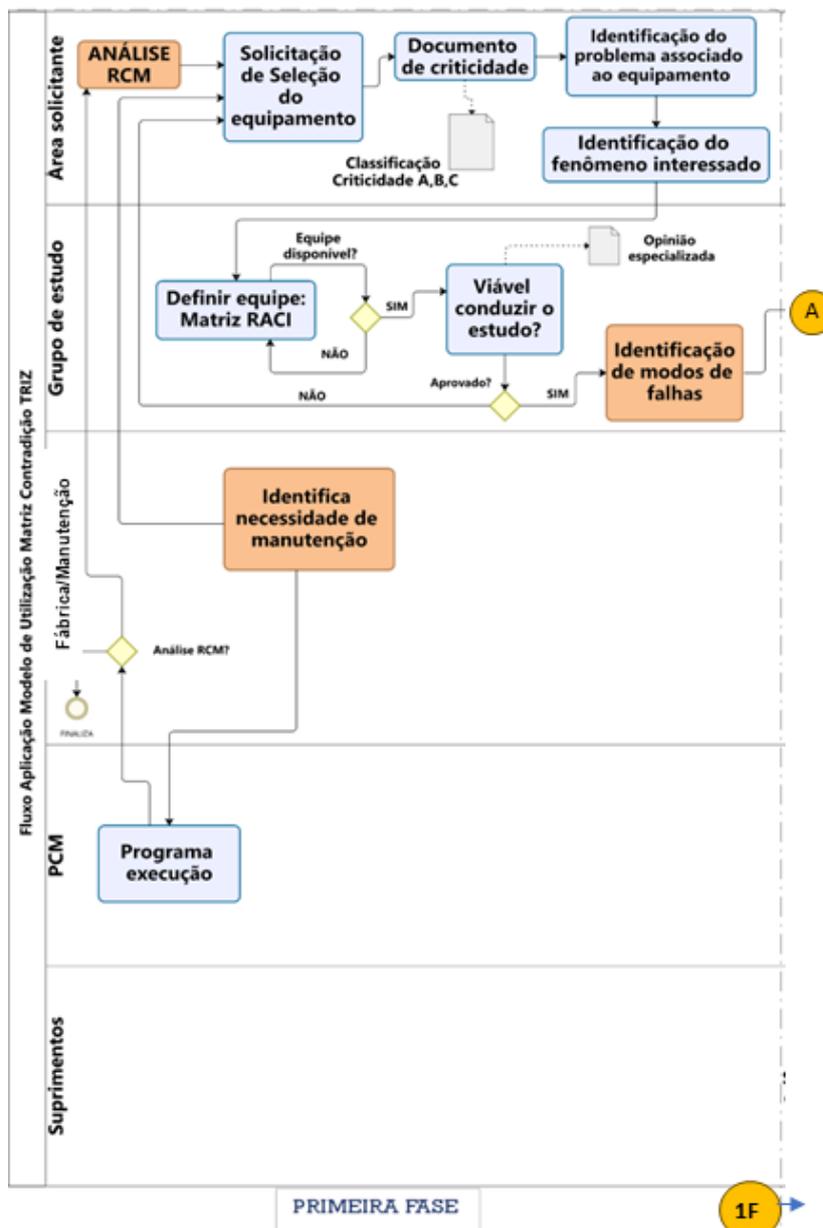
A identificação dos modos de falha constitui o passo inicial e essencial para prevenir e mitigar potenciais falhas futuras. Ao compreender profundamente os modos de falha, torna-se possível adotar estratégias proativas para evitar que essas falhas ocorram, bem como implementar medidas corretivas adequadas quando necessário. O RCM fornece uma estrutura sólida para essa análise inicial, assegurando que todos os modos de falha relevantes sejam identificados e devidamente avaliados.

Portanto, o RCM desempenha um papel fundamental nesta primeira fase do processo de análise de falhas, fornecendo a base para uma compreensão abrangente dos modos de falha dos ativos industriais. Ao empregar o RCM nessa etapa, as empresas podem tomar decisões embasadas em dados sólidos e implementar medidas preventivas eficazes, contribuindo assim para a melhoria da confiabilidade e desempenho dos ativos ao longo do tempo.

O Modelo 4FTRIZ proposto para a aplicação da Matriz de Contradições da TRIZ no processo de análise de falhas de ativos industriais, apresentado pela Figura 20, começa com a área solicitante, que identifica o equipamento proposto e o documento de criticidade. A classificação da criticidade é feita utilizando os níveis A, B e C. O nível A representa equipamentos essenciais com alto risco de segurança ou impacto financeiro em caso de falha, recebendo máxima prioridade na alocação de recursos de manutenção. O nível B refere-se a equipamentos importantes com risco moderado

para a empresa, enquanto o nível C abrange equipamentos menos críticos com baixo risco para o processo. A classificação da criticidade permite uma avaliação objetiva e uma definição clara de prioridades na distribuição de recursos de manutenção que define sua escolha. Esse documento também deve conter a identificação do problema associado ao equipamento e do fenômeno interessado. O grupo de estudo responsável pela aplicação da Matriz de Contradições analisa a viabilidade do estudo, define e formaliza as funções de cada profissional envolvido nos processos, utilizando o Formulário da Matriz RACI. Nesse processo, são consideradas as opiniões de especialistas, a taxa de falha do equipamento e os índices de produtividade.

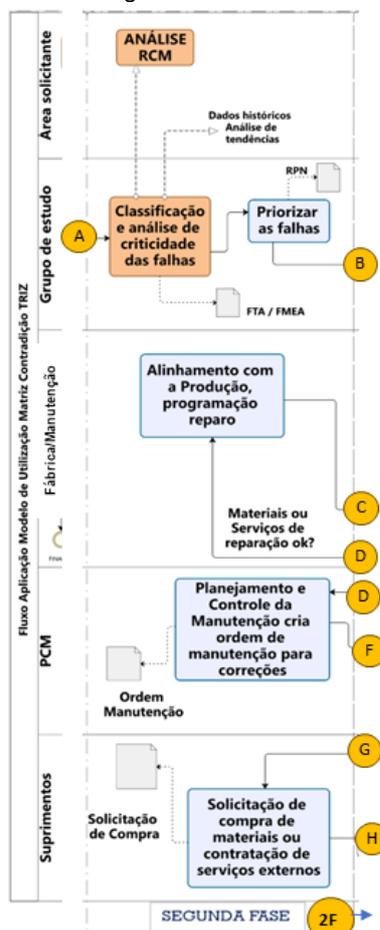
Figura 20 - Primeira fase do Modelo 4FTRIZ



### 3.2 FASE 2 – CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE CRÍTICA DAS FALHAS

A segunda fase do modelo trata da classificação e análise de criticidade das falhas identificadas, apresentada pela Figura 21. As ações são complementadas por um alinhamento estreito com a produção e o planejamento da programação de atividades para reparo, contando ainda com o suporte da área de suprimentos em situações que envolvam serviços externos. Esta fase desempenha um papel crucial na identificação das falhas que apresentam os maiores riscos para a operação do processo industrial, exigindo tratamento prioritário. Com base nessa análise, a equipe de manutenção pode estruturar suas ações de forma a gerenciar os recursos de maneira mais eficaz. Após a aceitação pelo grupo, são realizadas a análise dos modos de falhas, a classificação e análise de criticidade, bem como a priorização com base no *Risk Priority Number* (RPN) derivado do formulário de FMEA do equipamento. Essa priorização direciona os esforços para os modos de falha mais críticos, conforme determinado pela avaliação de criticidade.

Figura 21 – Segunda fase do Modelo 4FTRIZ

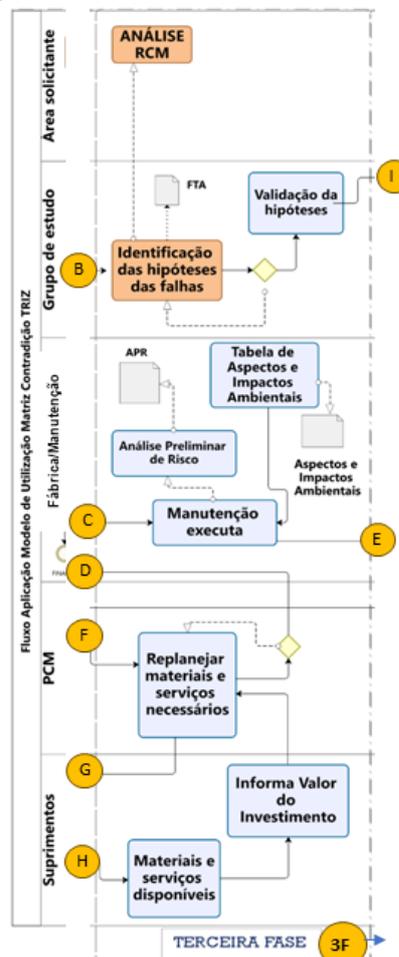


Fonte: O Autor (2023).

### 3.3 FASE 3 – IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA RAIZ

Na terceira fase do modelo, a identificação das causas raiz dos problemas detectados é realizada com o apoio integral da equipe de manutenção e da fábrica. Durante esse estágio crucial, documentos de segurança, análises preliminares de risco, e a programação da execução das atividades desempenham papéis fundamentais. Além disso, o setor de suprimentos pode ser acionado para aquisições de materiais ou serviços externos, caso seja necessário. Esta abordagem abrangente visa não apenas tratar os sintomas, mas determinar as reais causas dos problemas. Ao eliminar essas causas raiz, a probabilidade de recorrência das falhas é reduzida, contribuindo para o aumento da confiabilidade do processo industrial. Como complemento a essa análise, a identificação das hipóteses das falhas é observada por meio do FTA (*Fault Tree Analysis*), uma árvore de falhas que permite analisar sistematicamente a ocorrência indesejada, conforme apresentado na Figura 22 a seguir.

Figura 22 - Terceira fase do Modelo 4FTRIZ

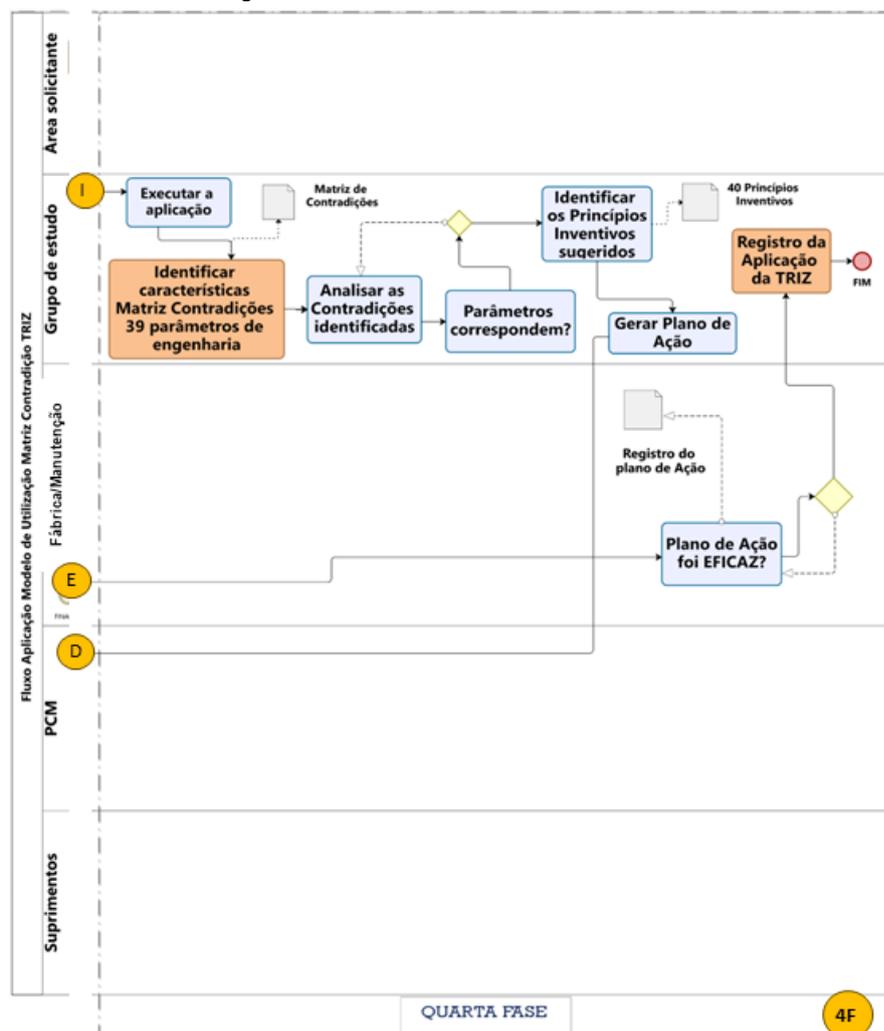


Fonte: O Autor (2023).

### 3.4 FASE 4 – APLICAÇÃO DA TRIZ, BUSCA DE SOLUÇÕES

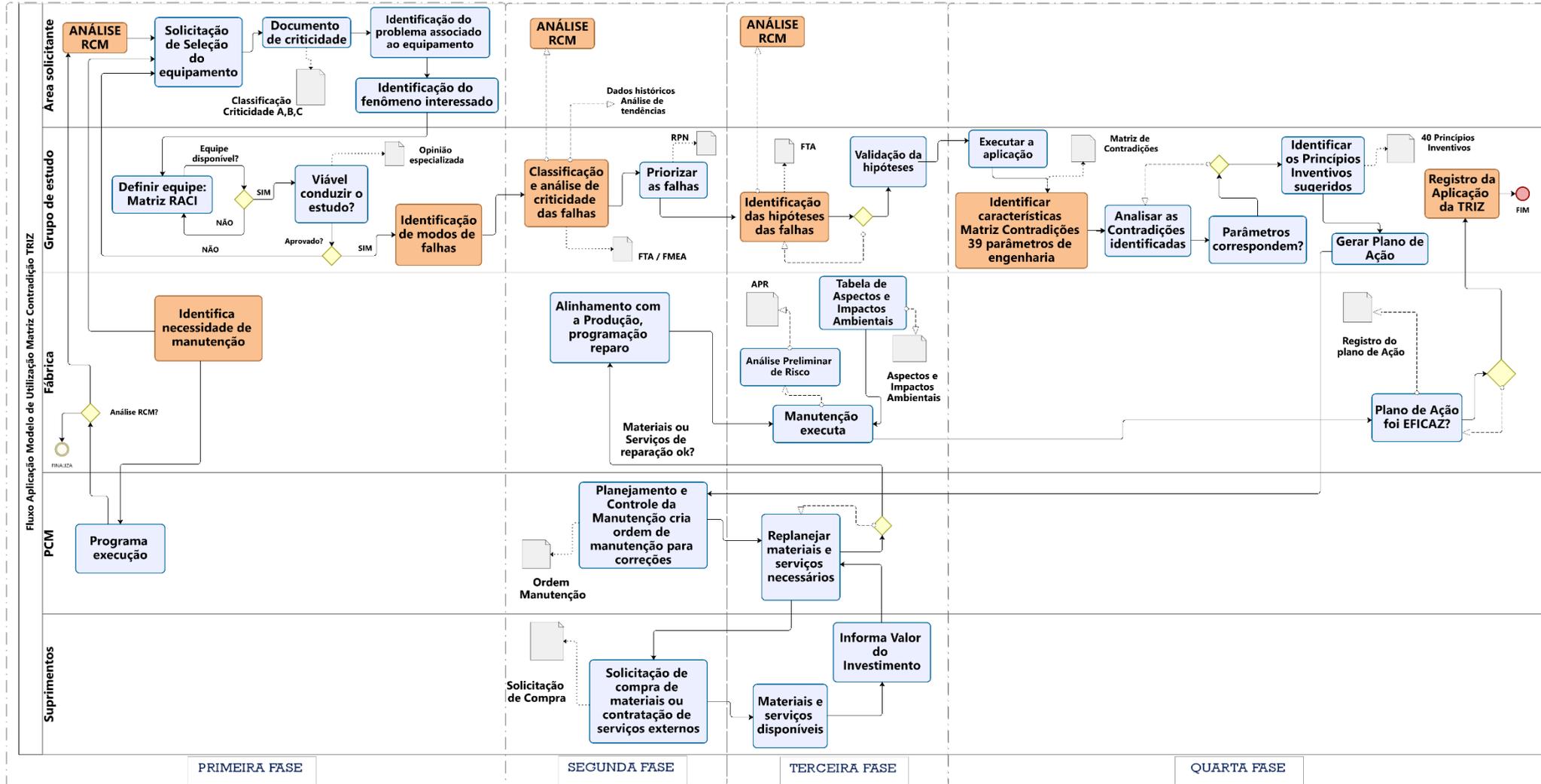
Por último, na quarta fase do processo, em que a metodologia TRIZ é introduzida para agregar particularidades. Nessa etapa, representada pela Figura 22, busca-se soluções inovadoras e eficientes, com o objetivo de abordar de forma abrangente e eficaz as causas raiz das falhas que foram identificadas previamente por meio da FTA. A metodologia TRIZ proporciona uma abordagem estruturada e criativa, que auxilia na geração de ideias e na identificação de soluções não convencionais para superar os desafios encontrados. Combinando a análise minuciosa das falhas com a aplicação dos princípios TRIZ, cria-se estratégias engenhosas e efetivas, que resultam em melhorias significativas nos processos e na resolução de problemas complexos, a Figura 24 apresenta o macrofluxo do processo de aplicação da TRIZ no processo de análise de falhas.

Figura 23 - Quarta fase do Modelo 4FTRIZ



Fonte: O Autor (2023)

Figura 24 – Modelo 4FTRIZ do Uso da Matriz de Contradições



Fonte: O Autor (2023).

Ao iniciar a aplicação da Matriz de Contradições, é essencial avaliar os parâmetros de engenharia que desempenham um papel fundamental na orientação do cruzamento na matriz. Nesse sentido, as práticas de Análise de Modo de Falha e Efeito (FMEA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA) oferecem contribuições significativas.

A utilização do FMEA permite identificar e analisar possíveis modos de falha em um sistema ou processo, bem como avaliar os efeitos dessas falhas. Essa análise detalhada ajuda a compreender as vulnerabilidades do sistema e a priorizar ações corretivas ou preventivas.

Ao aplicar a Matriz de Contradições, as informações obtidas por meio do FMEA fornecem uma visão clara das contradições existentes e dos parâmetros de engenharia relevantes a serem considerados.

Por sua vez, o FTA é uma abordagem sistemática que permite visualizar as causas de falhas potenciais e sua propagação através de uma árvore lógica de eventos. Ao analisar as causas fundamentais das falhas e sua relação com os princípios inventivos da TRIZ, é possível identificar padrões e correlações que podem ser utilizados na Matriz de Contradições. Essa combinação de FTA e Matriz de Contradições ajuda a aprofundar a compreensão das contradições e a desenvolver soluções mais eficazes.

Atualmente, a análise de falhas é realizada através do método "5 Porquês", que busca identificar a causa-raiz de um problema repetindo a pergunta "por que?" sucessivamente. No entanto, ao integrar as práticas de FMEA e FTA no processo de aplicação da Matriz de Contradições, são obtidos benefícios significativos. Essas técnicas não apenas auxiliam na identificação de falhas potenciais, mas também na compreensão de suas causas e efeitos, fornecendo insights valiosos sobre os parâmetros de engenharia relevantes. Essas informações são essenciais para a tomada de decisões informadas na resolução das contradições e no desenvolvimento de soluções inovadoras com base nos princípios inventivos da TRIZ.

Em seguida, é realizada uma análise para verificar a correspondência dos parâmetros sugeridos com a situação atual do problema em análise. Uma vez identificada uma correspondência plausível entre os parâmetros e a situação, é gerado um plano de ação estruturado e eficiente, que visa abordar de forma assertiva as contradições identificadas. Esse plano de ação é elaborado com base nas diretrizes fornecidas pela metodologia TRIZ, permitindo a implementação de soluções

adequadas e eficazes para resolver os desafios enfrentados. O plano de ação é conduzido com a equipe do Planejamento e Controle de Manutenção, com a elaboração de uma ordem de manutenção, planejamentos de materiais, ferramentas e mão de obra necessários para a condução da atividade de manutenção. Caso as necessidades não estejam disponíveis ou a mão de obra seja indisponível, uma solicitação de compra deve ser atribuída ao setor de suprimentos. Uma vez tendo o alinhamento e disponibilidade desses recursos, a atividade corretiva é alinhada junto ao departamento de produção e posteriormente executada, com os devidos documentos para os devidos andamentos Análise Preliminar de Risco (APR). A equipe de Manutenção promove a execução e posteriormente avalia se a ação foi eficaz. Em caso positivo, multiplica-se a ação para outros equipamentos com problemas semelhantes, e o registro do plano de ação é evidenciado, encerrando-se o processo com o registro da aplicação da TRIZ.

## 4 APLICAÇÃO DO MODELO 4FTRIZ NA INDÚSTRIA

A aplicação do modelo 4FTRIZ, foi realizada em uma empresa multinacional de fundição, com diversos parques fabris no Brasil e México, essa matriz foi utilizada como parte de um processo de desenvolvimento de soluções para problemas recorrentes que impactam o processo produtivo. A empresa produz componentes em ferro fundido para a indústria automotiva e para aplicação industrial e na construção civil.

A aplicação seguiu um processo em quatro fases distintas: na Fase 1, 2 e 3, aplicou-se o RCM, com foco no estabelecimento das informações essenciais para identificar os modos de falha. Na Fase 2, prosseguiu-se com a Análise de Criticidade usando a metodologia FMEA, o que envolveu a avaliação das criticidades das falhas e a identificação das mais significativas no equipamento em questão. Em seguida, na Fase 3, realizou-se a Identificação das Causas Raiz através da Análise de Árvore de Falhas (FTA), na qual se destacou a subjetividade nas soluções prévias devido à falta de uma abordagem metodológica precisa. Por fim, na Fase 4, aplicou-se a TRIZ, utilizando a Matriz de Contradições da TRIZ para encontrar possíveis soluções, com foco nos parâmetros "Resistência" (a ser melhorado) e "Facilidade de Reparo" (a ser degradado).

O estudo concentrou-se na análise da máquina de soprar machos de areia, para identificar pontos críticos e oportunidades de melhoria. Essa máquina foi escolhida por apresentar um alto número de falhas, resultando em uma disponibilidade operacional cada vez menor. O estudo proporcionou uma compreensão detalhada do equipamento e sua importância dentro do contexto produtivo.

Respostas para análises de falhas, são decorrentes dos estudos desenvolvidos posteriormente à falha ocorrida, dado uma necessidade de encontrar soluções para problemas de confiabilidade. Ao analisar os problemas encontrados no equipamento, identificou-se a necessidade de buscar soluções baseadas na causa raiz para resolvê-los de forma efetiva. No entanto, percebeu-se que a subjetividade é usada como argumento na busca por soluções. Isso se deve ao fato de não haver uma metodologia assertiva para o processo de resolução de problemas. Para solucionar esse problema, foi utilizada uma metodologia sistemática que permitiu uma abordagem mais objetiva e precisa na identificação e resolução das causas raiz dos problemas. Assim, a

utilização da ferramenta TRIZ, em especial, a matriz de contradições e princípios inventivos, onde parâmetros que queremos melhorar são contrastados com parâmetros que pioram a situação no momento de fazer uma mudança. Com essa abordagem torna-se possível adequar uma série de possíveis princípios capazes de dar uma efetiva e eficiente resposta ao problema, (ALTSHULLER, 1984).

Como proposta ao plano de ação, as características mecânicas da tubulação favorecem ocorrências de falhas, desta forma, as tubulações podem ser reavaliadas e substituídas;

Com o objetivo de identificar os parâmetros que precisam de melhorias, foi selecionado o modo de falha "vazamento de óleo ", e que resultou em um dos maiores tempos de parada da máquina. Essa escolha foi feita de forma aleatória, levando em consideração a significativa duração da parada da máquina, apresentada pela Figura 25.

Após a realização da ação corretiva, de acordo com o Diagnóstico de Análise de Falhas, uma análise mais detalhada dos modos de falhas foi realizada. Como resultado, foram identificados os modos de falhas "Tubulação Avariada" ou "Tubulação Furada".

Figura 25 – Tempo de reparo

Classe	ano	mês	tempo reparo	tempo entre falha	Causa
ELE	2022	dez	42	5,89	mc149 auxiliar de emergencia
ELE	2023	jan	50	148,14	MC0149 PROB. ABASTECIMENTO DE ADITIVO
MEC	2023	jan	20	3,79	vaz. de oleo mc0149
MEC	2023	jan	300	126,24	vazamento de oleo mc0149
MEC	2023	jan	27	20,88	trocar borracha da placa de gasagem
ELE	2023	jan	30	8,17	MC149 PROB NO CARRO MESA LENTO
MEC	2023	jan	30	30,60	troca de borracha na placa de gasagem
ELE	2023	jan	18	2,68	prob. no amarre inferior mc0149
ELE	2023	jan	30	0,97	Prob. mist. da areia
MEC	2023	jan	20	3,86	Prob. no carro de troca
ELE	2023	jan	20	1,36	PROB. NO CARRO SUPERIOR
MEC	2023	jan	59	6,65	c0149 problema na porta dianteira
ELE	2023	jan	20	46,72	MC149 PROB NO SENSOR DE PRESENÇA PLACA
ELE	2023	jan	10	13,08	Prob. no sensor do carro
MEC	2023	jan	60	19,09	prob. na porta da mc0149
MEC	2023	jan	50	47,90	prob. na movimentação do carro superior mc0149
MEC	2023	jan	40	5,83	CARRO DE MESA PARANDO
MEC	2023	jan	120	77,06	MC149 PROB NA PORTA TRASEIRA
MEC	2023	jan	100	75,57	MC149 SISTEMA HIDRAULICO DESARMANDO
ELE	2023	jan	10	9,42	PROB. NA EXTRAÇÃO DO SENSOR 14
ELE	2023	jan	16	3,92	PROB. NO AMARRE DA PLACA SUPERIOR
ELE	2023	jan	50	13,99	Prob. no carro de troca
ELE	2023	jan	22	10,14	PROB. NO GASADOR
MEC	2023	jan	90	26,85	mc0149 vazamento de oleo no pisador
MEC	2023	jan	90	8,30	Tubulação hidráulica furada
MEC	2023	jan	60	38,25	MC149 TELA DE SOPRO CAIU

Fonte: O Autor (2023)

Para resolver essa falha, foi utilizada a metodologia dos "5 Porquês". É importante ressaltar que essa falha é recorrente, o que indica a necessidade de uma abordagem mais aprofundada.

Após a identificação dos parâmetros de engenharia em conflito utilizando a matriz de contradições TRIZ, foram selecionados os parâmetros 14 e 34 para característica a ser melhorada e degradada, respectivamente. Essa escolha foi baseada na análise dos 39 possíveis conflitos disponíveis na matriz de contradições TRIZ.

O parâmetro 14, "Resistência", foi escolhido para ser melhorado, uma vez que está relacionado com o objetivo de evitar paradas indesejadas por "Tubulação furada". Melhorar a resistência da tubulação pode contribuir significativamente para aumentar sua durabilidade e reduzir a ocorrência dessa falha.

Por outro lado, o parâmetro 34, "Facilidade de Reparo", foi selecionado para ser degradado, pois está correlacionado com o objetivo de diminuir o tempo de parada da máquina caso a falha ocorra novamente. Ao degradar a facilidade de reparo, torna-se mais complexo e demorado o processo de conserto da tubulação.

Com base nos parâmetros escolhidos, a Matriz de Contradições TRIZ permitiu identificar os princípios de invenção direcionadores que podem solucionar esse conflito. Na Figura 26, foram destacados os princípios inventivos 27, 11 e 03, que fornecem abordagens relevantes para lidar com a melhoria da resistência da tubulação e, ao mesmo tempo, a degradação da facilidade de reparo. Esses princípios podem orientar a busca por soluções inovadoras e eficazes para o problema em questão.

Os princípios inventivos referem-se às seguintes informações:

1. Princípio 27: Objetos baratos e de vida curta (Uso e descarte) - sugere substituir um objeto caro por um conjunto de objetos mais baratos, mesmo comprometendo certas qualidades como durabilidade.

2. Princípio 11: Amortecimento Prévio - propõe preparar meios emergenciais de antemão para compensar a baixa confiabilidade de um objeto ou sistema.

3. Princípio 03: Qualidade Local - indica alterar a estrutura de um objeto de uniforme para não-uniforme, alterar o ambiente externo (ou influência externa) de uniforme para não-uniforme; fazer cada parte de um objeto funcionar em condições

mais agradáveis para sua operação; fazer cada parte de um objeto realizar uma função diferente e desejada.

Figura 26 - Matriz de Contradições

TRIZ	CARACTERÍSTICA DEGRADADA	CARACTERÍSTICA MELHORADA	26	27	28	29	30	31	32	33	34
			Quantidade de substância	Confiabilidade	Precisão de medição	Precisão de fabricação	Fatores indesejados atuando no objeto	Efeitos colaterais indesejados	Manufaturabilidade	Conveniência de uso	Mantabilidade
1	Peso do objeto em movimento		03, 26 18, 31	01, 03, 11, 27	28, 27, 35, 26	28, 35, 26, 18	22, 21, 18, 27	22, 35 31, 39	27, 28 01, 36	35, 03 02, 24	02, 27 28, 11
2	Peso do objeto parado		19, 06, 18, 26	10, 28, 08, 03	18, 26, 28	10, 01, 35, 17	02, 19, 22, 37	35, 22, 01, 39	28, 01, 09	06, 13, 01, 32	02, 27, 28, 11
3	Comprimento do objeto em movimento		29, 35	10, 14, 29, 40	28, 32, 04	10, 28, 29, 37	01, 15, 17, 24	17, 15	01, 29, 17	15, 29, 35, 04	01, 25, 10
4	Comprimento do objeto parado			15, 29, 28	32, 28, 03	02, 32, 10	01, 18		15, 17, 27	02, 25	03
5	Área do objeto em movimento		29, 30, 06, 13	29, 09	26, 28, 32, 03	02, 32	22, 33, 28, 01	17, 02, 18, 39	13, 01, 26, 24	15, 17, 13, 16	15, 13, 10, 01
6	Área do objeto parado		02, 18, 40, 04	32, 35, 40, 04	26, 28, 32, 03	02, 29, 18, 36	27, 02, 39, 35	22, 01, 40	40, 16	16, 04	16
7	Volume do objeto em movimento		29, 30, 07	14, 01, 40, 11	25, 26, 28	25, 28, 02, 16	22, 21, 27, 35	17, 02, 40, 01	29, 01, 40	15, 13, 30, 12	10
8	Volume do objeto parado		35, 03	02, 35, 16		35, 10, 25	34, 39, 19, 27	30, 18, 35, 04	35		01
9	Velocidade		10, 19, 29, 38	11, 35, 27, 28	28, 32, 01, 24	10, 28, 32, 25	01, 28, 35, 23	02, 24, 35, 21	35, 13, 08, 01	32, 28, 13, 12	34, 02, 28, 27
10	Força		14, 29, 18, 36	03, 35, 13, 21	35, 10, 23, 24	28, 29, 37, 36	01, 35, 40, 18	13, 03, 36, 24	15, 37, 18, 01	01, 28, 03, 25	15, 01, 11
11	Tensão, pressão		10, 14, 36	10, 13, 19, 35	06, 28, 25	03, 35	22, 02, 37	02, 33, 27, 18	01, 35, 16	11	02
12	Forma		36, 22	10, 40, 16	28, 32, 01	32, 30, 40	22, 01, 02, 35	35, 01	01, 32, 17, 28	32, 15, 26	02, 13, 01
13	Estabilidade do objeto		15, 32, 35		13	18	35, 24, 30, 18	35, 40, 27, 39	35, 19	32, 35, 30	02, 35, 10, 16
14	Resistência		29, 10, 27	11, 3	3, 27, 16	3, 27	18, 35, 37, 1	15, 35, 22, 2	11, 3, 10, 32	32, 40, 25, 2	27, 11, 3

Fonte: O Autor (2023)

De acordo com o princípio considerado, sugere-se que as características mecânicas da tubulação favorecem ocorrências de falhas, dessa forma, as tubulações podem ser reavaliadas e substituídas. O Quadro 4 apresenta o modo de falha observado, o tempo de parada utilizado para a correção, bem como o objetivo da implementação da Matriz de Contradições da TRIZ para esta dada falha com as sugestões dos parâmetros da matriz e possíveis soluções de melhoria.

Quadro 4 – Parâmetros de Engenharia e soluções de melhoria

MODO DE FALHA	TUBULAÇÃO FURADA	
TEMPO DE REPARO	300 MINUTOS	
OBJETIVO	EVITAR PARADAS INDESEJADAS POR "TUBULAÇÃO FURADA", DIMINUIR O TEMPO DE PARADA PARA ESTA FALHA	
PARÂMETRO A SER MELHORADO	14 RESISTÊNCIA	"O TANTO QUE UM OBJETO É CAPAZ DE RESISTIR A ALTERAR SUAS CARACTERÍSTICAS EM RESPOSTA A UMA FORÇA. RESISTÊNCIA A QUEBRA".
PARÂMETRO PIORADO	34 FACILIDADE DE REPARO	

Fonte: O Autor (2023)

#### 4.1 APRESENTAÇÃO DO PROCESSO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TRIZ

O *workshop* realizado no mês de fevereiro de 2023, com a participação de times multifuncionais diretamente envolvidos na manutenção dos equipamentos e na gestão e execução dos processos, mostrou-se como um marco importante para o processo de contextualização e exposição do método em questão, composto pelos seguintes participantes:

1. 1 Supervisor da área de Confiabilidade
2. 1 Supervisor da área da Automação Industrial
3. 2 Especialistas do setor de Análises de Falhas
4. 2 Especialista em projetos industriais

Ao contar com a presença de profissionais de diferentes áreas, o *workshop* possibilitou a troca de experiências e a identificação de perspectivas diversas em relação à implementação da Matriz Contradições da TRIZ. Essa diversidade de conhecimentos e visões foi fundamental para enriquecer a compreensão dos desafios enfrentados pela equipe e para identificar possíveis contradições nos processos e nos equipamentos analisados.

A abrangência da exemplificação durante o *workshop* também desempenhou um papel crucial na apresentação do método, permitindo que os participantes pudessem visualizar casos concretos em que a Matriz Contradições da TRIZ foi aplicada com sucesso. Essa contextualização torna o método mais tangível e facilita sua assimilação pelos profissionais envolvidos, preparando-os para aplicá-lo em suas respectivas áreas de atuação.

A etapa subsequente, focalizando na avaliação da ferramenta em si e não nas soluções técnicas propostas pela TRIZ, adquiriu uma importância crucial. A validação, realizada por meio de um questionário, desempenhou um papel essencial na verificação da eficácia da implementação da Matriz Contradições da TRIZ. Ao colher o *feedback* dos participantes do *workshop* e de outros envolvidos no processo, foi possível obter informações valiosas sobre os resultados alcançados e sobre as áreas que poderiam ser aprimoradas.

A contribuição dessa pesquisa se manifesta não apenas na validação do método, mas também na identificação de possíveis ajustes e melhorias que podem

ser feitos para aprimorar ainda mais a eficácia da Matriz Contradições da TRIZ. Além disso, o questionário permitiu que os profissionais expressassem suas opiniões e sugestões, tornando-os parte ativa do processo de implementação e refinamento do método.

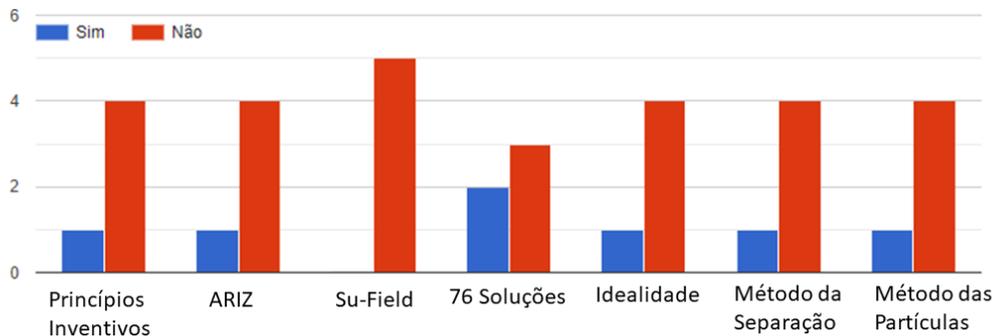
Portanto, a explicitação das aprendizagens durante o *workshop* e a contribuição da pesquisa por meio da validação proporcionam uma base sólida para a continuidade do desenvolvimento da Matriz Contradições da TRIZ. Com o engajamento e a participação ativa dos profissionais envolvidos, é possível fortalecer ainda mais essa abordagem e potencializar seus resultados em termos de otimização de processos, resolução de problemas e melhoria contínua no contexto da manutenção dos equipamentos e da gestão operacional.

Foi disponibilizado um formulário após a apresentação do modelo para coletar questionamentos dos participantes. O formulário, o qual pode ser verificado no Anexo II, foi desenvolvido utilizando a plataforma do Google Forms, e as principais questões eram direcionadas para os participantes. O questionário incluía perguntas como "Qual a sua função na Companhia?", "Qual a sua avaliação da proposta apresentada?", "Você já conhecia a Matriz de Contradições da TRIZ?" e "Você conhecia sobre a Metodologia TRIZ ou algumas de suas ferramentas?". Além disso, foi solicitado que os participantes comentassem brevemente sobre seu conhecimento em alguma das ferramentas citadas, se tinham lido sobre elas em artigos, literatura ou na internet. Uma das questões específicas do formulário dizia respeito à apresentação da utilização da Matriz de Contradições como implemento de uma padronização nas respostas de uma causa raiz. Os participantes foram questionados sobre o que achavam da abordagem apresentada.

Como resultado parcial, as respostas do questionário mostraram que os participantes foram questionados sobre a abordagem apresentada, começando com informações pessoais e setores de atuação, antes de serem questionados sobre seu conhecimento da metodologia TRIZ. Observando a Figura 27, foi constatado que nenhum dos participantes tinha conhecimento da Matriz de Contradições e Princípios Inventivos até o envio do convite para o *workshop*.

Posteriormente, dois questionamentos contribuíram para essa análise parcial da apresentação da metodologia TRIZ, a saber:

Figura 27 – Respostas questionário



Fonte: O Autor (2023)

1. Comente brevemente o seu conhecimento de alguma das ferramentas citadas, lida em algum artigo, literatura, internet;

As respostas mais significativas foram:

"Por meio da solução de problemas em equipamentos específicos, é possível implementar melhorias em novos projetos."

"A ferramenta TRIZ nasceu como metodologia de resolução de problemas de engenharia, mas com o tempo foi aplicada em outras áreas. Durante meus estudos, encontrei artigos relacionados à aplicação de TRIZ em softwares, que é a área em que atuo."

"Conhecia muito pouco, apenas por meio de artigos e vídeos na Internet um dia antes da apresentação, mas é uma ferramenta que possui uma metodologia que nos leva a trabalhar nos pontos mais vulneráveis."

"Entrei em contato com a metodologia através de estudos sobre engenharia de confiabilidade (ferramentas para análise de falhas)."

2. A apresentação da utilização da Matriz de Contradições como implemento de uma padronização nas respostas de uma causa raiz, como exemplificado, é oportuna, qual o seu parecer?

"De forma que a análise se baseia no conhecimento, a utilização da metodologia é interessante para aumentarmos o nível de confiabilidade dos equipamentos, capacitando todos os componentes a atingirem o máximo de sua vida útil."

"A ferramenta TRIZ tem espaço na utilização do atual método de análise de falhas utilizada na empresa como agregador na solução dos problemas complexos de manutenção, norteando as soluções do time de manutenção."

"Toda ferramenta que auxilia na resolução de falhas é bem-vinda. A aplicação de TRIZ voltada a problemas de manutenção, que é o dia a dia, me parece interessante, saindo um pouco das ferramentas padrões da literatura. Vejo como uma oportunidade de aprendizado e uma ampliação da gama de ferramentas de resolução de problemas."

"Sim, estabelecería uma metodologia para avaliar os planos de ação que seriam implementados."

"Sim, no entanto, penso que a equipe participante do processo é essencial (brainstorming). A metodologia pode auxiliar no processo FRACAS e no processo de análise de efeitos e modos de falha na metodologia RCM."

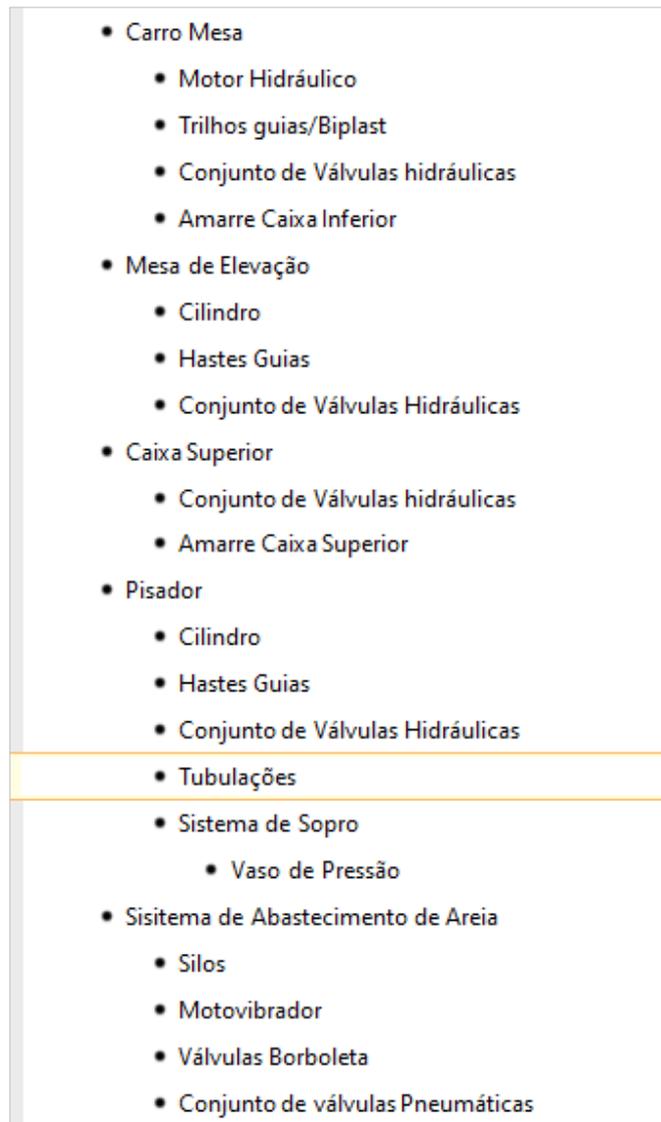
#### 4.2 APRESENTAÇÃO DO MODELO 4FTRIZ

O Modelo 4FTRIZ proposto para a aplicação da Matriz de Contradições da TRIZ no processo de análise de falhas dos ativos industriais tem início com duas etapas fundamentais. Primeiramente, é realizada a identificação do equipamento em questão, seguida pela classificação de sua criticidade nos níveis A, B e C, conforme apresentado pela Figura 29 a seguir. Essa classificação é crucial, pois determina a prioridade na alocação de recursos de manutenção, direcionando esforços para os equipamentos mais críticos. Os componentes da máquina analisada estão listados na Figura 28 a seguir, o modo de falha estudado é "tubulações".

Em seguida, o documento prossegue com a identificação do problema associado ao equipamento e do fenômeno interessado. Esse passo é essencial para delinear claramente o foco da análise e compreender os desafios específicos relacionados ao equipamento em análise.

A implementação do modelo 4FTRIZ será realizada em equipamentos classificados com criticidade A, visando uma otimização mais eficiente dos recursos disponíveis. A Figura 29 complementa o Modelo 4F TRIZ, apresentando as informações e definições elaboradas pela equipe de engenharia de manutenção. As análises detalhadas das definições de criticidade levam em consideração a pontuação atribuída a cada equipamento, abrangendo critérios essenciais como segurança, meio ambiente, qualidade, produção, custos e tempo de restabelecimento.

Figura 28 – Principais componentes do equipamento analisado



Fonte: O Autor (2023)

Dessa forma, o modelo proporciona uma estrutura eficaz para a análise de falhas dos ativos industriais, permitindo uma abordagem sistemática e direcionada à resolução de problemas e à tomada de decisões informadas em relação à manutenção dos equipamentos.

O modelo tem como ponto de partida a aplicação da RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade), onde se analisam dados históricos e tendências para identificar os modos de falha dos ativos. Essa identificação é de suma importância para prevenir e mitigar possíveis falhas no futuro, permitindo a adoção de estratégias proativas e a implementação de medidas corretivas.

Figura 29 – Matriz de Classificação ABC

MTRIZ DE CLASSIFICAÇÃO ABC					Eixos de Decisão									
Engenharia de Manutenção					CELULA PRODUÇÃO MACHOS LA-21 CELULA 6 MAQUINA DE SOPRO LORAMENDI 149 BR10-BR10-BLO-MAC-LE2-L21 1005737						Definição Criticidades		Instruções das Definições	
Identificação de Área e Equipamentos					Definições das CRITICIDADES						Resultados			
Área Detalle	Orden	Descrição Equipamento	Tag	SAP	Segurança	Meio Ambiente	Qualidade	Produção	Custos	Tempo	Pontos	Criticidade ABC		
Carro Mesa	1	Motor Hidráulico			2	1	1	3	1	4	47			
Carro Mesa	2	Trilhos Guia												
Carro Mesa	3	Conjunto de Válvulas Hidráulicas												
Carro Mesa	4	Amarre Caixa Inferior												
Mesa de elevação	5	Cilindro												
Mesa de elevação	6	Hastes Guias												
Mesa de elevação	7	Conjunto de Válvulas Hidráulicas												
Caixa Superior	8	Conjunto de Válvulas Hidráulicas												
Caixa Superior	9	Amarre Caixa Superior												
Pisador	10	Cilindro												
Pisador	11	Hastes Guias												
Pisador	12	Conjunto de Válvulas Hidráulicas												
Pisador	13	Tubulações												
Pisador	14	Sistema de Sopro - Vaso de Pressão												
Sistema de Abastecimento de Areia	15	Silos												
Sistema de Abastecimento de Areia	16	Motovibrador												
Sistema de Abastecimento de Areia	17	Válvulas Borboleta												
Sistema de Abastecimento de Areia	18	Conjunto de Válvulas Pneumáticas												
Carro Superior	19	Cabeçote de Sopro												
Carro Superior	20	Cabeçote de Gasagem												
Carro Superior	21	Cilindro de Translação												
Carro Superior	22	Conjunto de Trilhos e Rodas												
Carro Superior	23	Conjunto de Válvulas Hidráulicas												
Sistema Carros de Troca	24	Carro de Translação												
Sistema Carros de Troca	25	Cilindro												
Sistema Carros de Troca	26	Conjunto de Válvulas Hidráulicas												
Gasador	27	Reservatório de Gás												
Gasador	28	Motobomba de Gás												
Gasador	29	Resistência de Aquecimento												
Gasador	30	Conjunto de Válvulas Pneumáticas												
Gasador	31	Painel Elétrico												
Gasador	32	Medidor de Vazão												
Extração Externa	33	Cilindros												
Extração Externa	34	Hastes Guias												
Bandeja de Limpeza	35	Cilindros												

Fonte: O Autor (2023)



Figura 31 – Matriz RACI

RACI Matriz		Papéis e Responsabilidades																		
		Responsável, Autoridade, Consultado, Informado																		
Aplicação TRIZ	PAPÉIS	ESPECIALISTA					ESPECIALISTA				ESPECIALISTA				SUPERVISOR					
		Sponsor	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Gerente de Projeto	Líder Técnico	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Consultor	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função	Consultor	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função
Processos ou Atividades	Status	Área 1 - Avançada					Área 2 - Engenharia				Área 3 - Grupo AF				Área 4 - PCP					
<b>Fase 1 / Atividade</b>																				
	Entregável/Tarefa 1		C		A		R					C								
	Entregável/Tarefa 2						A	R				S								
<b>Fase 4 / Atividade</b>																				
	Entregável/Tarefa 1		R	A	C	I														
	Entregável/Tarefa 2				A		R													
<b>Fase 3 / Atividade</b>																				
	Entregável/Tarefa 1		R	A	C	I														
	Entregável/Tarefa 2																			
<b>Fase 4 / Atividade</b>																				
	Entregável/Tarefa 1																			
	Entregável/Tarefa 2																			
	Entregável/Tarefa 3																			
R	<b>Responsável</b>	Responsável por realizar a tarefa ou projeto.																		
A	<b>Autoridade</b>	Quem irá validar a atividade e o recebimento do trabalho. Somente um por tarefa.																		
C	<b>Consultado</b>	Profissional a ser consultado antes da tomada de decisão.																		
I	<b>Informado</b>	Deve ser informado após a decisão tomada.																		
S	<b>Suporte</b>	Auxilia o responsável pela tarefa ou projeto.																		

Fonte: O Autor (2023)

O FMEA apresentado para a máquina de sopro em estudo organiza seus grupos funcionais de acordo com os principais componentes da máquina, incluindo informações abrangentes sobre a ferramenta. Contudo, o foco principal recai sobre o grupo funcional de tubulações, onde a Matriz de Contradições da TRIZ foi aplicada, destacando a importância dessa abordagem na análise. Na segunda fase do modelo, ocorre a classificação e análise de criticidade das falhas identificadas, com priorização daquelas que representam os maiores riscos para a operação do processo industrial. A equipe de engenharia de manutenção utiliza o formulário de FMEA do equipamento e o Risk Priority Number (RPN) para orientar suas ações de manutenção de maneira mais eficaz, conforme exemplificado na Figura 32.

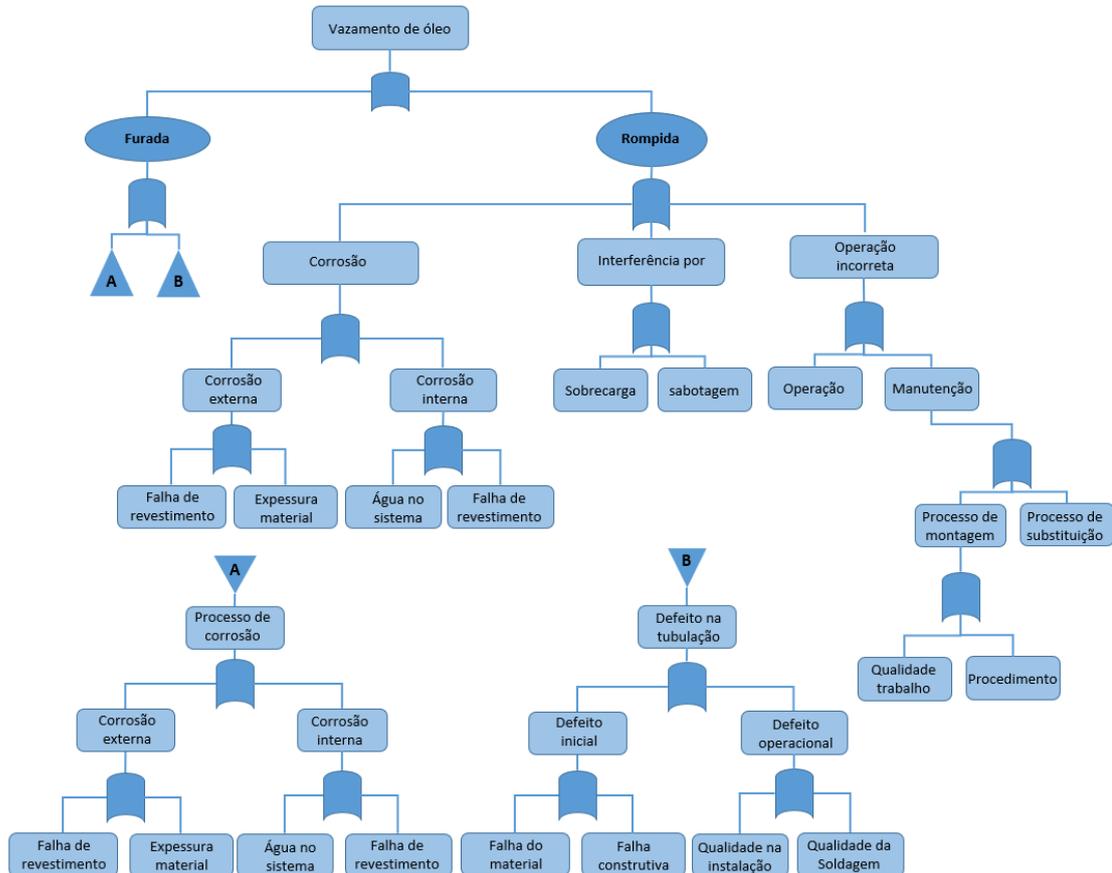
Figura 32 – FMEA Máquina de Sopro

FMEA - ANÁLISE DE EFEITOS E MODOS DE FALHA - EQUIPAMENTO																						
RPN - Risk Priority Number										DATA INÍCIO: 24/07/2023		DATA FIM: 24/10/2023										
VALOR		RISCO		ESTRATÉGIA						Nº REVISÃO: 0		DATA REVISÃO:										
0 a 125		Baixo		Aceitar o Risco																		
126 a 500		Médio		Propor Ação de Redução de Risco																		
501 a 1000		Alto		Definir Ação Através do RCM																		
ÁREA: GERAL EQUIPAMENTO: Máquina de Moldagem										APROVADO POR: Mikelly												
MISSÃO PRINCIPA Moldagem de machos de areia																						
● SÍMBOLO ESPECIAL - SEGURANÇA OU LEGISLAÇÃO																						
GF	GRUPO FUNCIONAL	FO	FUNÇÃO OPERACIONAL	MF	MODOS DE FALHA POTENCIAL	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEVERIDADE CLASSIFICAÇÃO	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCCORRÊNCIA	PADRÕES & CONTROLES ATUAIS DE PREVENÇÃO	DETECÇÃO	RPN	AÇÕES DE REDUÇÃO DE RISCO	RESPONSÁVEL	PRAZO	STATUS	SEVERIDADE OCORRÊNCIA	REAVLIAÇÃO DETECÇÃO	RPN			
1	Cilindros	A	Transformar a força ou energia hidráulica em força mecânica	1	Travamento do cilindro	Corrosão	9	Desgaste acentuado dos elementos	7	Não existente?	3	189	Criar plano de trabalho de troca dos cilindros	Rodinaldo	15/02/2012	Concluído	7	4	5	140		
				2	Contaminação do fluido hidráulico	Corrosão	7	Falha acionamento	6	Plano de trabalho 0000	4	168	Criar plano de trabalho para análise preditiva.	Rafael	15/02/2012	Concluído	7	3	6	126		
				3	Aquecimento	Vazamento de óleo	4	Contaminação	5	Plano de trabalho 8251	2	40	PT existente e concisa	Mauro	31/01/2012	Concluído	5	8	4	160		
				4	Desalinhamento	Travamento do cilindro	6	Desgaste dos elementos guia	5	Não existente	7	210	Criar plano de trabalho de inspecao das correntes e	Rodinaldo	31/01/2012	Concluído	7	3	3	63		
				5	Quebra da haste	Perda função de prensagem	5	Travamento do conjunto guia	7	Não existente	4	140	Instalar tensor na corrente de acionamento dos rolos	Mauro Almeida	31/01/2012	Concluído	5	4	3	60		
				6	Desalinhamento	Vazamento de óleo		Desgaste dos elementos guia														
				7	Desalinhamento	Vazamento de óleo		Vibração														
2	Hastes Guias																					
3	Conjunto Válvulas Hidráulicas		Regular, direcionar e controlar o fluxo e a pressão do fluido hidráulico																			
4	Tubulações		Transportar os fluidos	1	Rompida	Vazamento	9	S	Vibração													
				2	Rompida	Vazamento	10	C	Falha na Soldagem das juntas													
				3	Rompida	Vazamento	9	C	Material Inadequado													
				4	Rompida	Vazamento	7	S	Fixações frouxas													
5	Sistema de Sopro																					
RPN Médio 125															RPN Médio 65							

Fonte: O Autor (2023)

Na terceira fase, a identificação das causas raiz dos problemas é realizada, visando eliminar as verdadeiras origens das falhas e aumentar a confiabilidade do processo industrial. O uso do *Fault Tree Analysis* (FTA), apresentado na Figura 33, complementa essa análise, permitindo uma abordagem sistemática das ocorrências indesejadas.

Figura 33 – FTA Tubulação Hidráulica



Fonte: O Autor (2023)

Na quarta fase do processo, a metodologia TRIZ é integrada para apresentar soluções inovadoras e eficientes para as causas fundamentais previamente identificadas pela Análise de Árvore de Falhas (FTA). A Figura 34 ilustra essa etapa, que tem como objetivo abordar de maneira abrangente e eficaz os desafios identificados. A aplicação dos princípios TRIZ resulta em estratégias inteligentes e efetivas, gerando melhorias significativas nos processos e na resolução de problemas complexos, conforme evidenciado no modelo 4FTRIZ.

Inicialmente, o especialista determina quais parâmetros de engenharia são mais apropriados e relevantes para o modo de falha em estudo. Uma vez identificados, esses parâmetros são correlacionados em uma matriz bidimensional. Neste exemplo, os parâmetros 14 (Resistência) e 34 (Manutenabilidade) são analisados, resultando

na identificação de três princípios inventivos TRIZ: "Qualidade Localizada", "Amortecimento Prévio" e "Uso e Descarte".

Com base nos princípios inventivos identificados, é conduzida uma análise específica do modo de falha, neste caso, relacionado a tubulações furadas. Soluções e planos de ação são propostos em consenso com outros especialistas do equipamento. A conclusão resultante é então identificada, aplicada e registrada no histórico de aplicações do modelo 4FTRIZ e no sistema de gestão. Esse processo garante uma abordagem sistemática e documentada para a resolução de problemas e melhoria contínua.

Figura 34 – Soluções Propostas Metodologia TRIZ

39 parâmetros de engenharia TRIZ		40 princípios inventivos da TRIZ		MODO DE FALHA	
1	Peso do objeto em movimento	1	Segmentação ou Fragmentação	TEMPO DE REPARO	TUBULAÇÃO FURADA
2	Peso do objeto parado	2	Remoção ou Extração		300 MINUTOS
3	Comprimento do objeto em movimento	3	Qualidade Localizada	OBJETIVO	EVITAR PARADAS INDESEJADAS POR "TUBULAÇÃO FURADA", DIMINUIR O TEMPO DE PARADA PARA ESTA FALHA
4	Comprimento do objeto parado	4	Assimetria		
5	Área do objeto em movimento	5	Fusão ou Consolidação	PARÂMETRO A SER MELHORADO	14 RESISTÊNCIA
6	Área do objeto parado	6	Universalização		CAPACIDADE DE RESISTIR E ALTERAR SUAS CARACTERÍSTICAS EM RESPOSTA A UMA FORÇA. RESISTÊNCIA A QUEBRA
7	Volume do objeto em movimento	7	Aninhamento	PARÂMETRO PIORADO	34 MANTENABILIDADE
8	Volume do objeto parado	8	Contrapeso		FACILIDADE DE REPARO
9	Velocidade	9	Compensação prévia		
10	Força	10	Ação prévia		
11	Tensão, pressão	11	Amortecimento prévio		
12	Forma	12	Equipotencialidade		
13	Estabilidade do objeto	13	Inversão		
14	Resistência	14	Recurvação		
15	Durabilidade do objeto em movimento	15	Dinamização		
16	Durabilidade do objeto parado	16	Ação parcial ou excessiva		
17	Temperatura	17	Transição para nova dimensão		
18	Brilho	18	Vibração mecânica		
19	Energia gasta pelo objeto em movimento	19	Ação periódica		
20	Energia gasta pelo objeto parado	20	Continuidade de ação útil		
21	Potência	21	Aceleração		
22	Perda de energia	22	Transformação de prejuízo em lucro		
23	Perda de substância	23	Retoolimentação		
24	Perda de informação	24	Mediação		
25	Perda de tempo	25	Autosserviço		
26	Quantidade de substância	26	Cópia		
27	Confiabilidade	27	Uso e descarte		
28	Precisão de medição	28	Substituição de meios mecânicos		
29	Precisão de fabricação	29	Construção pneumática ou hidráulica		
30	Fatores indesejados atuando no objeto	30	Uso de filmes finos e membranas flexíveis		
31	Efeitos colaterais indesejados	31	Uso de materiais porosos		
32	Manufaturabilidade	32	Mudança de cor		
33	Conveniência de uso	33	Homogeneização		
34	Mantenabilidade	34	Descarte e regeneração		
35	Adaptabilidade	35	Mudança de parâmetros e propriedades		
36	Complexidade do objeto	36	Mudança de fase		
37	Complexidade de controle	37	Expansão térmica		
38	Nível de automação	38	Uso de oxidantes fortes e atmosferas enriquecidas		
39	Produtividade	39	Uso de atmosferas inertes		
		40	Uso de materiais compostos.		

Princípio 27: Objetos baratos e de vida curta (Uso e descarte) - sugere substituir um objeto caro por um conjunto de objetos mais baratos, mesmo comprometendo certas qualidades como durabilidade.		
Princípio 11: Amortecimento Prévio - propõe preparar meios emergenciais de antemão para compensar a baixa confiabilidade de um objeto ou sistema.		
Princípio 03: Qualidade Local - indica alterar a estrutura de um objeto de uniforme para não-uniforme, alterar o ambiente externo (ou influência externa) de uniforme para não-uniforme; fazer cada parte de um objeto funcionar em condições mais agradáveis para sua operação; fazer cada parte de um objeto realizar uma função diferente e desejada.		

Fonte: O Autor (2023)

Em resumo, o modelo proposto consiste em quatro fases: (1) identificação dos modos de falha através do RCM; (2) classificação e análise de criticidade das falhas priorizando ações de manutenção; (3) identificação das causas raiz utilizando FTA; e (4) aplicação da metodologia TRIZ para propor soluções inovadoras e eficientes. Esse processo proporciona uma abordagem integrada e eficaz para a análise de falhas em ativos industriais, melhorando sua confiabilidade e desempenho.

Assim, o Modelo 4FTRIZ e o uso do RCM e da Matriz de Contradições da TRIZ proporcionam uma base sólida para a compreensão dos modos de falha dos ativos industriais, a tomada de decisões embasadas em dados sólidos e a implementação de medidas preventivas e corretivas eficazes, contribuindo para melhorar a confiabilidade e o desempenho dos ativos ao longo do tempo.

## 5 AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO 4F TRIZ

Após a análise dos resultados delineada nas seções anteriores, este capítulo concentra-se na avaliação do modelo proposto. Durante essa etapa, a discussão foi retomada em colaboração com os gestores e especialistas em gestão de ativos da fábrica. Para o processo de contextualização e exposição do método em questão, composto pelos seguintes participantes:

1. 2 Especialista da área de Confiabilidade
2. 1 Coordenador da área de Projetos Industriais e Automação Industrial
3. 2 Especialistas do setor de Análises de Falhas
4. 2 Especialista em projetos industriais
5. 1 Supervisor de Produção

Com o objetivo de realizar uma avaliação inicial do método pela perspectiva da empresa, foi conduzida uma nova pesquisa. A participação desses especialistas irá acrescentar discernimento, oferecendo uma contribuição valiosa para a ampliação da compreensão da viabilidade e do impacto potencial do método proposto.

Para essa finalidade, foi apresentado um novo questionário aos gestores participantes, contendo as informações resultantes da análise anterior. Dessa forma, foram convidados a oferecer comentários e sugestões de aprimoramento para o método. O questionário foi dividido em quatro critérios distintos, nomeadamente: clareza, eficácia, aplicabilidade e alcance dos objetivos. Esse processo de avaliação permite uma visão abrangente sobre a percepção da equipe de gestão em relação à proposta e orientará eventuais ajustes e refinamentos futuros.

A ferramenta adotada para coleta de dados durante a avaliação da sistemática proposta foi a Escala Likert, (LIKERT, R., ROSLOW, S.; MURPHY, G., 2006). Essa abordagem é amplamente utilizada em pesquisas de satisfação e avaliação, pois permite que os respondentes expressem suas opiniões e percepções de forma graduada, atribuindo um valor numérico a cada afirmação apresentada. As respostas são pontuadas em uma escala que varia geralmente de 1 a 5, onde 1 representa "discordo totalmente" e 5 "concordo totalmente".

Durante o *workshop*, os profissionais da equipe de Engenharia de Confiabilidade foram apresentados à sistemática proposta e convidados a participar

da avaliação respondendo ao questionário baseado na Escala *Likert*. Essa etapa proporcionou uma análise quantitativa dos dados coletados, permitindo mensurar o grau de concordância ou discordância em relação às afirmações propostas e, assim, identificar tendências e padrões de resposta.

Além disso, o questionário incluiu espaço para comentários e sugestões de melhoria, permitindo a obtenção de *feedback* qualitativo. Essa abordagem enriqueceu a análise, possibilitando uma compreensão mais aprofundada das percepções dos participantes e fornecendo insights para aprimorar a sistemática de acordo com as necessidades e expectativas da empresa.

A aplicação da Escala *Likert* como instrumento de coleta de dados demonstrou-se eficaz para obter uma visão abrangente da receptividade da sistemática proposta, identificando pontos fortes e áreas de oportunidade. Ao reunir as percepções quantitativas e qualitativas dos gestores, foi possível realizar uma avaliação mais completa e embasar decisões para o desenvolvimento contínuo do método. Dessa forma, a combinação da metodologia da Escala *Likert* com o questionário de avaliação personalizado tornou-se uma ferramenta relevante para a análise e discussão dos resultados obtidos na avaliação da sistemática proposta, contribuindo para a efetividade da pesquisa e para a obtenção de informações fundamentais para aprimorar a metodologia e garantir resultados mais positivos no ambiente fabril da empresa. A pesquisa detalhada encontra-se no Apêndice A e contempla as seguintes perguntas para cada critério, que devem ser respondidas em uma escala de 1 (discordo totalmente) até 5 (concordo totalmente):

#### Critério 1: Clareza

As diretrizes do método foram apresentadas de forma clara e compreensível?

Os objetivos do método foram explicitados de maneira fácil de entender?

As etapas da sistemática proposta foram claras e bem definidas?

As informações e requisitos necessários para a aplicação do método foram explicados de maneira clara?

#### Critério 2: Capacidade

O método demonstra potencial para solucionar problemas e identificar oportunidades de melhoria?

A sistemática proposta se mostrou adequada para a realização de análises de falhas nos setores fabris?

O método possui recursos e ferramentas suficientes para alcançar os objetivos propostos?

O método demonstra capacidade de ser adaptado a diferentes contextos e áreas da empresa?

#### Critério 3: Aplicação

A aplicação do método foi realizada de maneira prática e factível?

Os profissionais envolvidos se sentiram preparados para aplicar a sistemática proposta?

A aplicação do método trouxe resultados relevantes e úteis para a empresa?

O método pode ser facilmente incorporado aos processos existentes na empresa?

#### Critério 4: Alcance dos objetivos

O método atingiu os objetivos propostos na análise de falhas e aplicação de melhorias?

O método contribuiu para a otimização dos processos fabris e a redução de falhas?

Os resultados obtidos com a sistemática proposta foram satisfatórios em relação aos objetivos estabelecidos?

O método se mostrou efetivo na busca por soluções e melhorias no ambiente fabril da empresa?

Avaliar esses critérios permitirá obter uma visão mais abrangente sobre a efetividade e aplicabilidade do método proposto, além de fornecer insights valiosos para aprimorá-lo de acordo com as necessidades e expectativas da empresa. O *feedback* dos gestores e especialistas é de suma importância para o desenvolvimento contínuo da metodologia, visando garantir resultados mais positivos e um impacto significativo nos processos fabris e nas análises de falhas da organização. A Figura 35 apresenta o instrumento de avaliação.

Figura 35 – Critérios avaliados

CRITÉRIO	PERGUNTA AVALIADA	DISCONCORDO TOTALMENTE	DISCORDO	INDIFERENTE	CONCORDO	CONCORDO TOTALMENTE
Clareza	As diretrizes do método foram apresentadas de forma clara e compreensível? Os objetivos do método foram explicitados de maneira fácil de entender? As etapas da sistemática proposta foram claras e bem definidas? As informações e requisitos necessários para a aplicação do método foram explicados de maneira clara?					
Capacidade	O método demonstra potencial para solucionar problemas e identificar oportunidades de melhoria? A sistemática proposta se mostrou adequada para a realização de análises de falhas nos setores fabris? O método possui recursos e ferramentas suficientes para alcançar os objetivos propostos? O método demonstra capacidade de ser adaptado a diferentes contextos e áreas da empresa?					
Aplicação	A aplicação do método foi realizada de maneira prática e factível? Os profissionais envolvidos se sentiram preparados para aplicar a sistemática proposta? A aplicação do método trouxe resultados relevantes e úteis para a empresa? O método pode ser facilmente incorporado aos processos existentes na empresa?					
Alcance dos objetivos	O método atingiu os objetivos propostos na análise de falhas e aplicação de melhorias? O método contribuiu para a otimização dos processos fabris e a redução de falhas? Os resultados obtidos com a sistemática proposta foram satisfatórios em relação aos objetivos? O método se mostrou efetivo na busca por soluções e melhorias no ambiente fabril da empresa?					

Fonte: O Autor (2023)

## 5.1 PROCEDIMENTO DA AVALIAÇÃO

O objetivo do procedimento de avaliação foi testar a eficácia e viabilidade da sistemática proposta. O *workshop* contou com a participação de 10 profissionais da indústria, todos com ampla experiência na área, com o propósito de avaliar a aplicabilidade da sistemática em questão e obter feedbacks relevantes para aprimorar o processo. O procedimento foi conduzido em cinco etapas distintas:

### Preparação do Evento:

Na primeira etapa, organizado o *workshop* e planejadas todas as atividades que seriam realizadas durante o evento. Elaborado dois exercícios para que os participantes pudessem executá-los posteriormente. Além disso, foram preparados materiais de apoio necessários para a execução dos exercícios.

### Apresentação da Problemática:

Na segunda etapa, foi realizado uma apresentação da problemática em estudo, explicando o objetivo do trabalho de pesquisa em que os participantes colaboraram. Essa contextualização foi essencial para que todos compreendessem a relevância e o propósito da sistemática a ser avaliada.

### Referência Teórica:

A terceira etapa proporcionou uma referência teórica detalhada sobre o assunto em questão, abordando as fases de planejamento e aplicação da Matriz de Contradições nos processos de análise de falhas em ativos industriais. Essa base

teórica foi essencial para que os participantes pudessem compreender o contexto no qual a sistemática se encaixava.

#### Apresentação da Sistemática Proposta:

Na quarta etapa, foi apresentado aos participantes a sistemática proposta. Detalhado o fluxo de processos, a Matriz de Contradições TRIZ e as ferramentas e templates necessárias para o registro de informações. Esse momento foi fundamental para que os profissionais tivessem uma visão completa da metodologia a ser aplicada.

#### Aplicação da Sistemática:

A quinta etapa foi dedicada à aplicação prática da sistemática em si. Com base em duas falhas apontadas no sistema de gestão, todos os participantes participaram da aplicação. Os participantes tiveram uma hora para trabalhar no exercício proposto. Fui incumbido da responsabilidade de mediar, conduzir e apresentar os resultados. Cada grupo recebeu informações detalhadas, incluindo um texto de contextualização do processo e características da Matriz de Contradições, bem como o passo a passo a ser desenvolvido.

O objetivo dessa aplicação prática era que os participantes seguissem todos os passos da sistemática proposta, registrando as informações relevantes em seus respectivos templates. Essa atividade permitiu testar a eficácia e aplicabilidade da sistemática em casos reais de análises de falhas.

Ao final do *workshop*, realizamos um momento de discussão e coleta de feedback dos participantes. Suas opiniões, sugestões e observações foram registradas para análise posterior, visando aperfeiçoar a sistemática e garantir sua efetividade.

Esse procedimento de avaliação permitiu verificar a utilidade e eficácia da sistemática proposta, bem como identificar possíveis melhorias para sua aplicação futura em projetos de desenvolvimento de produtos e transferência de tecnologia.

## 5.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO

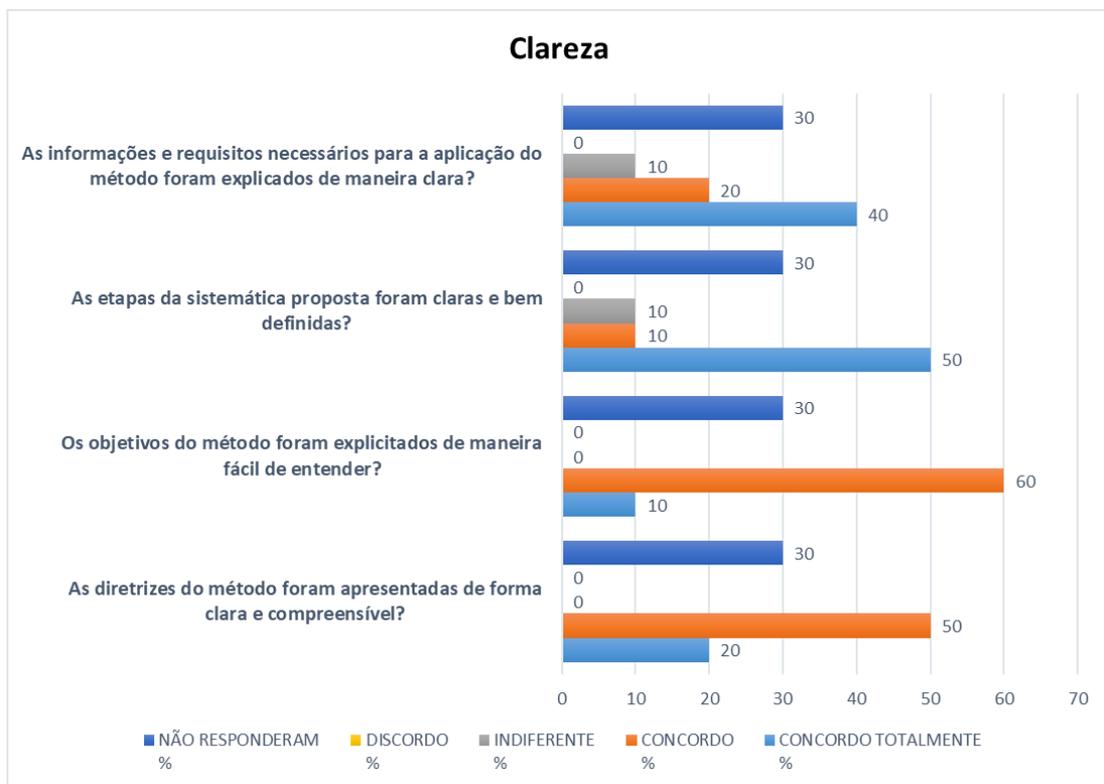
Após analisar os resultados e avaliar os aspectos de Clareza, Capacidade, Aplicação e Alcance dos Objetivos, observou-se que os dados evidenciam resultados satisfatórios, ao mesmo tempo em que apontam oportunidades de melhoria na execução do método.

No que diz respeito à dimensão "Clareza", as questões que abordaram a compreensão das diretrizes do método e a explicitação dos objetivos apresentaram os seguintes resultados: metade dos participantes (50%) que responderam à pesquisa concordaram com essas afirmações, enquanto 20% manifestaram concordância total. Contudo, 30% optaram por não responder a essas duas questões iniciais.

Quanto à terceira questão dentro do mesmo âmbito analisado, que considerou se as etapas da sistemática proposta eram claras e bem definidas, observou-se que 50% dos participantes manifestaram total concordância, 10% concordaram, 10% mostraram indiferença e 30% não emitiram resposta.

Na última questão pertencente a esse aspecto, que avaliou se as informações e requisitos necessários para a aplicação do método foram explanados de maneira clara, 40% dos participantes responderam com total concordância, 20% expressaram concordância, 10% se mostraram indiferentes e, novamente, 30% não registraram resposta.

Figura 36 – Aspecto Clareza



Fonte: O Autor (2023)

Na dimensão "Capacidade", na primeira questão que considerou o potencial do

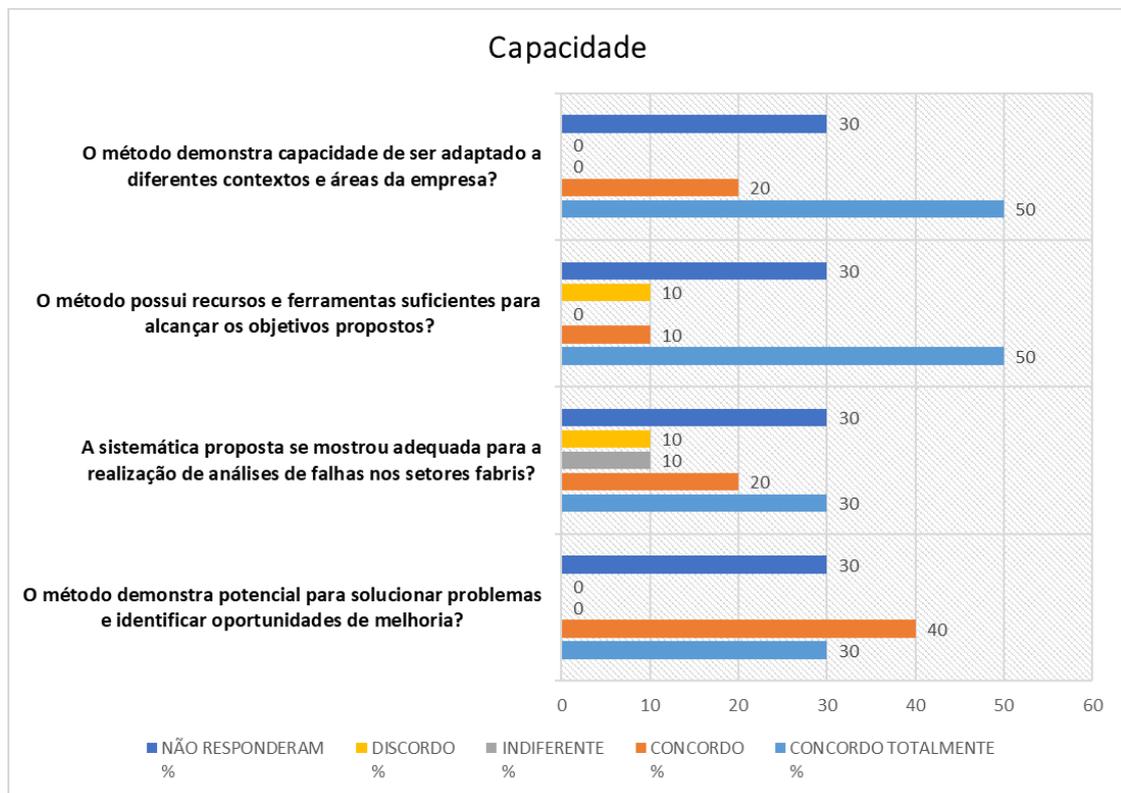
método para solucionar problemas e identificar oportunidades de melhoria, observou-se que 30% dos participantes manifestaram total concordância, 40% concordaram e 30% optaram por não responder.

No que se refere à segunda questão, que avaliou a adequação da sistemática proposta para a realização de análises de falhas nos setores fabris, constatou-se que 30% responderam com total concordância, 20% concordaram, 10% mostraram indiferença, 10% discordaram e 30% não forneceram resposta.

Quanto à terceira questão, que explorou se o método dispunha de recursos e ferramentas suficientes para atingir os objetivos propostos, 50% dos participantes afirmaram concordância total, 10% concordaram, 10% discordaram e 30% não responderam.

Na última questão desta dimensão examinada, que indagou sobre a capacidade do método de se adaptar a diferentes contextos e áreas da empresa, 50% dos participantes responderam concordância total, 20% concordaram e 30% não responderam.

Figura 37 – Aspecto Capacidade



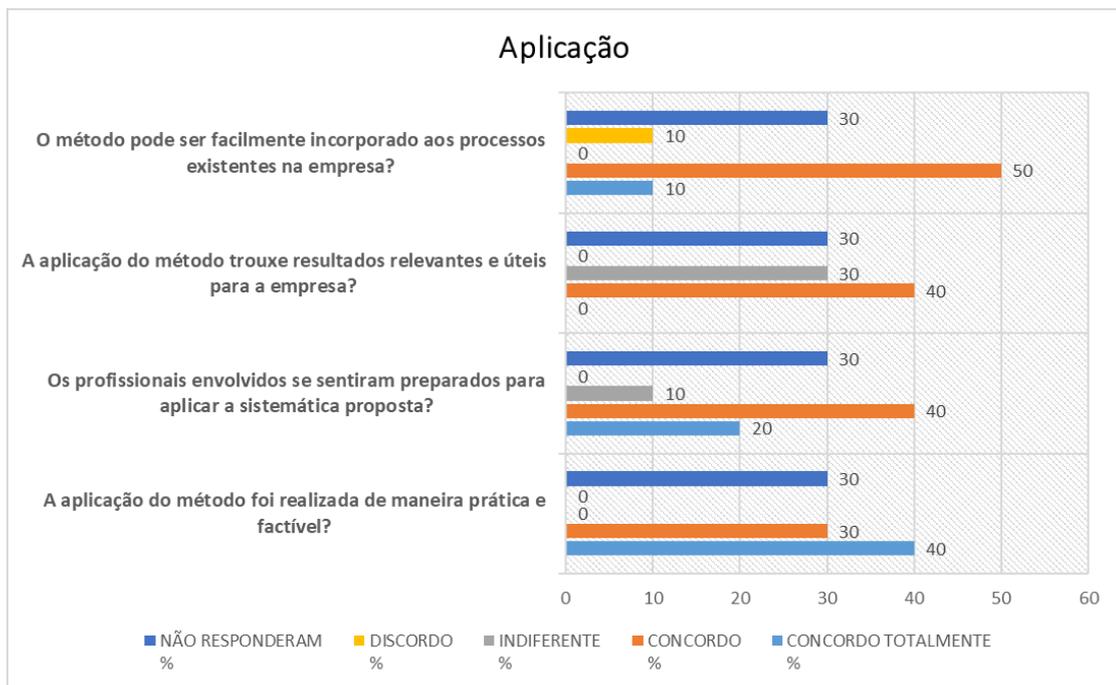
Na dimensão "Aplicação", na primeira questão que considerou a realização prática e viável do método, constatou-se que 40% dos participantes responderam com total concordância, 30% concordaram e 30% não deram resposta a essa pergunta.

Na segunda questão, que avaliou se os profissionais envolvidos se sentiram preparados para implementar a sistemática proposta, observou-se que 20% concordaram totalmente, 40% concordaram, 10% demonstraram indiferença e 30% não forneceram resposta.

Quanto à terceira questão analisada, que investigou se a aplicação do método gerou resultados relevantes e úteis para a empresa, foi registrado que 40% responderam com concordância, 30% ficaram indiferentes e 30% não responderam.

Na última questão desta dimensão, 10% dos participantes manifestaram concordância total, 50% concordaram, 10% discordaram e 30% não forneceram resposta.

Figura 38 – Aspecto Aplicação



Fonte: O Autor (2023)

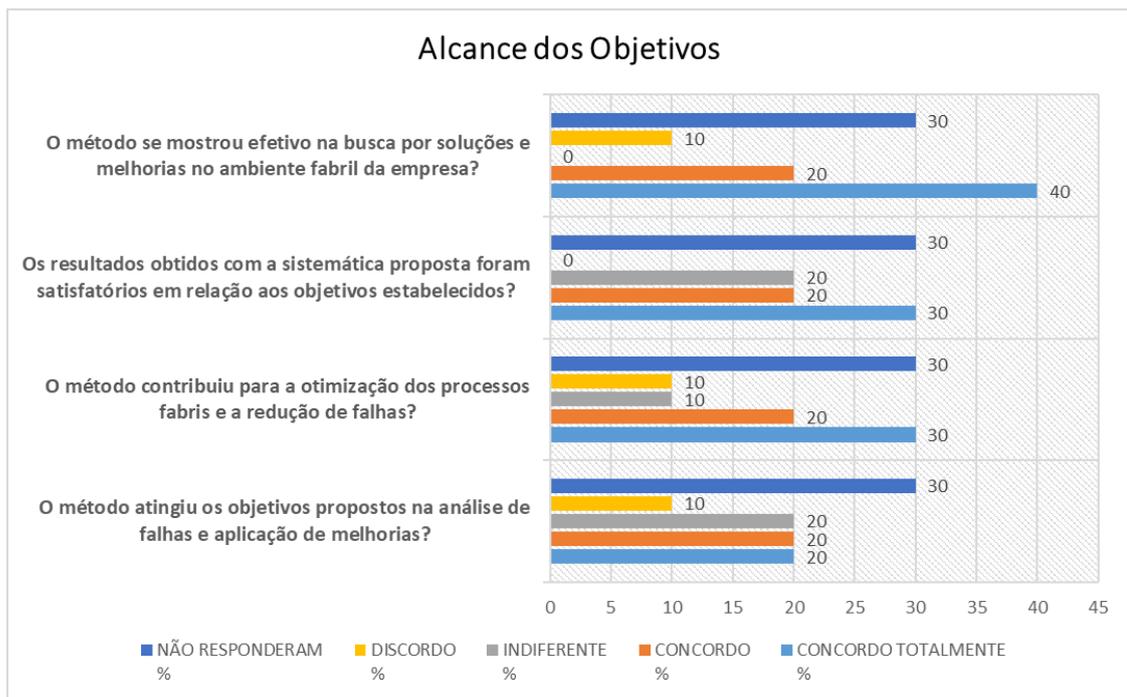
Na análise do critério "Alcance dos Objetivos", na primeira questão que considerou se o método alcançou os objetivos propostos na análise de falhas e aplicação de melhorias, foi observado que 20% dos participantes responderam com total concordância, 20% concordaram, 20% se mantiveram indiferentes, 10% discordaram e 30% não forneceram resposta.

Na segunda questão, que avaliou se o método contribuiu para otimizar os processos fabris e reduzir falhas, constatou-se que 30% responderam com total concordância, 20% concordaram, 10% mostraram indiferença, 10% discordaram e 30% não deram resposta.

Para a terceira questão deste critério analisado, que investigou se os resultados obtidos com a sistemática proposta foram satisfatórios em relação aos objetivos estabelecidos, foi registrado que 30% concordaram totalmente, 20% concordaram, 20% manifestaram indiferença e 30% não responderam.

Finalizando esta análise, na quarta e última questão, que questionou se o método se mostrou efetivo na busca por soluções e melhorias no ambiente fabril da empresa, 40% responderam com concordância total, 20% concordaram, apenas 10% discordaram e 30% não responderam.

Figura 39 – Aspecto Alcance dos Objetivos



Fonte: O Autor (2023)

Após a análise minuciosa dos resultados e a consideração dos quatro aspectos avaliados - Clareza, Capacidade, Aplicação e Alcance dos Objetivos - emerge uma compreensão abrangente das percepções dos participantes em relação à implementação do método. A avaliação revelou tantas áreas de sucesso quanto oportunidades valiosas de aprimoramento para otimizar a integração da metodologia proposta nos processos da empresa.

Na dimensão "Clareza", destacou-se que a maioria dos participantes, cerca de 50%, concordou que as diretrizes do método foram apresentadas de forma compreensível, enquanto 20% expressaram concordância total. No entanto, é relevante observar que uma parcela considerável, 30%, optou por não responder a essas questões iniciais. A clareza das etapas da sistemática também foi percebida positivamente por 50% dos participantes, com 10% demonstrando indiferença e outros 30% não fornecendo resposta. A questão sobre a explicação clara dos requisitos necessários recebeu 40% de concordância total, sugerindo um entendimento favorável, mas 30% não registraram resposta, apontando para uma área de incerteza.

A dimensão "Capacidade" indicou uma percepção favorável quanto ao potencial do método para solucionar problemas e identificar oportunidades de melhoria, com 30% concordando totalmente e 40% concordando. No entanto, a adequação da metodologia para análises de falhas nos setores fabris mostrou uma distribuição mais diversificada de respostas, com 10% discordando. A questão sobre os recursos e ferramentas suficientes para alcançar os objetivos propostos recebeu 50% de concordância total, evidenciando um aspecto positivo. A adaptação a diferentes contextos também foi percebida positivamente por metade dos participantes.

No âmbito da "Aplicação", a maioria considerou a aplicação prática e viável do método, 40% concordando totalmente e 30% concordando, embora 30% não tenham respondido. A preparação dos profissionais para a implementação teve 20% de concordância total e 40% de concordância, indicando um nível satisfatório de preparo, porém, novamente, 30% não responderam. Embora a aplicação tenha gerado resultados relevantes e úteis para 40%, 30% não emitiram opinião, o que pode sugerir uma área de possível melhoria. A capacidade do método em ser efetivo na busca por soluções e melhorias foi notada por 40% com concordância total, mas 30% permaneceram sem resposta.

Na última dimensão, "Alcance dos Objetivos", a avaliação dos resultados revelou uma gama variada de percepções. O alcance dos objetivos propostos na análise de falhas e aplicação de melhorias obteve 20% de concordância total, enquanto 20% concordaram e 20% mantiveram-se indiferentes. O método contribuindo para otimizar os processos fabris e reduzir falhas foi percebido positivamente por 30%, embora 30% não tenham fornecido resposta. A satisfação dos resultados em relação aos objetivos estabelecidos recebeu 30% de concordância

total, indicando uma percepção positiva, porém 30% não responderam. Quanto à efetividade do método na busca por soluções e melhorias no ambiente fabril, 40% demonstraram concordância total, sugerindo sucesso, mas 30% não responderam.

Nesse contexto, identifica-se a necessidade de fortalecer a comunicação das diretrizes e objetivos do método, bem como a clareza das etapas e dos requisitos necessários para a aplicação. A adequação do método para análises de falhas nos setores fabris também requer uma abordagem mais refinada. Além disso, a participação e respostas dos envolvidos podem ser otimizadas, garantindo uma percepção abrangente das vantagens da implementação. A contínua avaliação e ajuste da metodologia visando às particularidades dos diversos contextos também são aspectos relevantes para garantir um alcance mais amplo e efetivo dos objetivos estabelecidos.

Em síntese, esta análise oferece um panorama da eficácia e da viabilidade do método proposto. Ao reconhecer as áreas de destaque e os pontos a serem aprimorados, a empresa está posicionada para aplicar medidas específicas que maximizem os benefícios da metodologia, impulsionando ainda mais o seu sucesso na busca por soluções e melhorias no ambiente fabril. O resumo desta análise pode ser verificado no Apêndice A.

## 6 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresenta um modelo da aplicação da Matriz de Contradições TRIZ em análises de falhas em equipamentos industriais. No primeiro capítulo, foi realizada a introdução do trabalho, incluindo a contextualização, justificativa, identificação das lacunas e descrição do problema de pesquisa. Foram declarados os objetivos, destacadas as contribuições esperadas e descrita a estrutura do estudo. Na seção de revisão teórica, foram discutidos os temas norteadores da pesquisa, que consiste no estudo de análises de falhas em ativos industriais e a aplicação da TRIZ nesse contexto.

A partir da execução do procedimento metodológico, foram analisados e apresentados os benefícios da utilização da Matriz de Contradições e dos Princípios Inventivos na Análise de Falhas de uma Máquina de Soprar Machos em uma unidade produtiva. Foi observada uma maior agilidade na análise de falhas devido à padronização dos parâmetros de engenharia e a otimização dos recursos disponíveis. No entanto, também foi identificado o pouco conhecimento da TRIZ e suas ferramentas, o que demanda treinamentos e ampliação da difusão da utilização da ferramenta.

Para contribuir para a redução das lacunas identificadas, é proposto um modelo de apoio em formato de fluxograma, que inclui a viabilidade do estudo, a priorização das falhas e a validação das hipóteses de falhas. Além disso, é apresentada uma planilha eletrônica dinâmica para aplicação nas análises. O modelo proporciona vantagens, como a facilidade na escolha dos parâmetros de engenharia e a criatividade no desenvolvimento de hipóteses de falhas, mas também tende à subjetividade na escolha dos parâmetros.

As principais contribuições deste estudo são a proposta de implementação da ferramenta em ativos críticos da empresa, a facilidade na escolha de parâmetros influenciadores nas falhas, a compilação das principais contribuições e aspectos de falhas em máquinas e equipamentos, a proposta de modelo estruturado para aplicação nos estudos de confiabilidade, a estruturação do modelo e aplicação da Matriz de Contradição TRIZ no processo de análise de falhas de ativos industriais e o fluxograma orientativo para o andamento da aplicação da TRIZ. O modelo foi testado para verificar se o objetivo do estudo foi atendido.

É importante destacar algumas limitações na aplicação do modelo proposto para utilização da Matriz de Contradição TRIZ e dos princípios inventivos no processo de análise de falhas de ativos industriais. Primeiramente, é necessário que se tenha acesso às informações técnicas e de engenharia do equipamento analisado, além do conhecimento prévio das ferramentas da TRIZ e sua aplicabilidade. Outra condição é que os envolvidos no processo de análise de falhas possuam habilidades e conhecimentos técnicos suficientes para compreender e aplicar o modelo proposto. Além disso, pode haver resistência ou falta de interesse na adoção de uma nova metodologia, o que pode prejudicar a implementação do modelo. Por fim, é importante lembrar que o modelo não é uma solução infalível para todos os problemas de análise de falhas, e que deve ser adaptado e ajustado para cada situação específica.

Em resumo, o modelo delineado neste estudo apresenta uma abordagem integrada e eficiente para aprimorar a confiabilidade dos ativos industriais, mitigando possíveis falhas futuras. Cada fase desse modelo contribui para elevar a confiabilidade dos ativos, e a aplicação da metodologia TRIZ na etapa final possibilita à equipe de manutenção buscar soluções inovadoras e criativas para resolver as problemáticas identificadas. Recomenda-se, para pesquisas subsequentes, a estruturação de etapas visando a estimativa e otimização dos custos das soluções propostas, além de expandir o escopo da metodologia para abarcar a viabilidade do estudo e a avaliação da criticidade dos equipamentos. Em síntese, considerando a amplitude deste estudo, é seguro afirmar que o objetivo de desenvolver um modelo de aplicação da Matriz de Contradições da TRIZ na análise de falhas de ativos industriais foi alcançado, com contribuições notáveis para o campo industrial, e perspectivas promissoras para futuras investigações.

O cerne deste estudo consistiu em desenvolver um modelo que integra a Matriz de Contradições da TRIZ no processo de avaliação de falhas em ativos industriais. À luz desse objetivo, é notável que cada um dos objetivos específicos traçados foi alcançado com sucesso:

a) Por meio de uma análise detalhada e sistemática, foram identificados e examinados diversos exemplos em que a TRIZ foi empregada com êxito na análise de falhas, fornecendo uma compreensão abrangente das aplicações práticas dessa metodologia.

- b) Por meio de um exame detalhado, ficou claro que tanto a Matriz de Contradições quanto o Método dos Princípios Inventivos - TRIZ, desempenham um papel importante como ferramentas facilitadoras para resolver os desafios técnicos decorrentes da análise de falhas na gestão de ativos industriais.
- c) A formulação do modelo de análise de falhas em ativos industriais, com a incorporação hábil da Matriz de Contradições da TRIZ, demonstra a aplicabilidade prática e a capacidade dessa metodologia em aprimorar a capacidade de diagnóstico de falhas e na criação de soluções inovadoras.
- d) A realização da avaliação prática do modelo proposto, por meio da interação com profissionais da indústria, confirmou sua viabilidade, eficácia e valor tangível em situações reais de aplicação.

Em decorrência, a sinergia obtida ao unir a Matriz de Contradições com procedimentos padronizados não apenas enfatiza a importância de um processo confiável e bem-sucedido na abordagem das falhas em maquinários de fundição, mas também conduz a melhorias tangíveis e substanciais no desempenho dos equipamentos, na redução das falhas, no incremento da produtividade e na garantia de um processo de fundição mais eficiente e seguro. Os resultados alcançados validam a relevância dos objetivos estabelecidos e sinalizam para um avanço promissor no campo da análise e resolução de falhas em ativos industriais.

Considerando as perspectivas para pesquisas futuras nesta área, é recomendável explorar diversas direções que podem ampliar significativamente o campo de estudo. Em primeiro lugar, destaca-se a importância do aprimoramento da metodologia proposta neste estudo, visando torná-la ainda mais robusta e abrangente. Esse aprimoramento pode envolver a inclusão de métricas específicas para estimar e otimizar os custos das soluções sugeridas, proporcionando uma análise mais abrangente do impacto financeiro das ações corretivas.

Outra direção relevante para investigações futuras é a expansão do escopo da metodologia, considerando a avaliação da viabilidade do estudo e a análise da criticidade dos equipamentos. Essa abordagem mais abrangente oferece uma visão holística da gestão de ativos industriais, auxiliando as organizações na priorização eficaz de suas ações de manutenção.

Além disso, é importante explorar a integração da metodologia TRIZ com tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT) e análise de dados avançada,

para aprimorar ainda mais a confiabilidade dos ativos industriais. Essa sinergia pode resultar em soluções inovadoras e eficazes para desafios complexos.

Outra sugestão é a realização de estudos de caso em diferentes setores industriais, validando assim a aplicabilidade da metodologia em contextos variados. Isso permitiria a identificação de desafios específicos de cada setor e o desenvolvimento de soluções correspondentes.

Além disso, a promoção de programas de treinamento e educação para profissionais da indústria sobre a metodologia TRIZ e suas aplicações na análise de falhas em ativos industriais é fundamental para superar lacunas de conhecimento identificadas.

Investigar as barreiras à adoção da metodologia, incluindo a resistência à mudança por parte dos profissionais da indústria, e desenvolver estratégias para facilitar a implementação bem-sucedida é uma área que merece atenção.

Realizar avaliações de impacto após a implementação da metodologia em empresas industriais seria relevante para medir os benefícios tangíveis alcançados, como confiabilidade de ativos, eficiência operacional e redução de custos.

Outra direção importante seria expandir a aplicação da metodologia para ativos críticos em diferentes setores, indo além das máquinas de fundição, para avaliar sua eficácia e adaptabilidade em diversas situações.

Finalmente, desenvolver ferramentas de software ou aplicativos que auxiliem na aplicação da metodologia TRIZ é uma iniciativa prática para torná-la mais acessível e fácil de usar para os profissionais da indústria. A promoção da colaboração interdisciplinar entre engenheiros, cientistas da computação, especialistas em TRIZ e profissionais da indústria também é necessária para enriquecer ainda mais a abordagem de análise de falhas. Essas considerações proporcionam um panorama abrangente para orientar pesquisas futuras e a evolução desta metodologia na prática industrial.

Em resumo, o estudo oferece uma base sólida para futuras pesquisas na área de análise de falhas em ativos industriais, destacando a importância da metodologia TRIZ e seu potencial para impulsionar melhorias significativas na gestão de ativos e na confiabilidade industrial. O desenvolvimento contínuo e a aplicação prática dessas recomendações podem contribuir para avanços substanciais nesse campo e proporcionar benefícios significativos para as organizações industriais.

## 7 REFERÊNCIAS

ACHOUCH, M. et al. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. *Applied Sciences*, v. 12, n. 16, p. 8081, 12 ago. 2022.

ALMEIDA, B. G.; FABRO, E. Industria 4.0 como ferramenta na engenharia de manutenção com base na metodologia TPM. *Scientia cum Industria*, v. 7, n. 2, p. 23–39, 1 abr. 2019.

ALMANNAI, B.; GREENOUGH, R.; KAY, J. A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 24, n. 4, p. 501–507, ago. 2008.

ALTSHULLER, G. S. *Innovation Algorithm: TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*. First Edition Worcester: Technical Innovation Center, 1999.

ALTSHULLER, G.S. (1984) *Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*. CRC Press, London. 1984.

ALTSHULLER, G. S. *40 Principles: TRIZ Keys to Technical Innovation*, Technical Innovation Center, Inc., 2002.

ANDREOLI, T. P.; AHLFELDT, R. *Organização de sistema de produção: decisões estratégicas e táticas*. Curitiba: Intersaberes, 2014.

BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. *Scientia cum Industria*, v. 7, n. 2, p. 12–22, 23 abr. 2019.

BELSKI, I. *Cognitive foundations of TRIZ problem-solving tools*. 2008.

CARVALHO, A. C.; DE JESUS, J. S.; QUONIAN, L. A metodologia criativa TRIZ analisada por meio de um estudo em patentes. *Exacta*, v. 14, n. 4, p. 579–592, 21 dez. 2016.

CARDOSO, V. et al. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações / Use of industry 4.0 technologies in predictive maintenance through monitoring equipment and facilities. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 1, p. 7063–7083, 26 jan. 2022.

CARVALHO, M. A. de. *Modelo prescritivo para a solução criativa de problemas nas etapas iniciais do desenvolvimento de produtos*. Florianópolis: UFSC, 1999.

CASOTTI, B.P., BEL FILHO, E. Del; CASTRO, P.C.de. *Indústria de fundição: situação atual e perspectivas*. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.33, p. 121-162, mar. 2011.

CHANG, M.-K. et al. Application of risk based inspection in refinery and processing piping. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 18, n. 4-6, p. 397–402, jul. 2005.

CHEONG, S. et al. TRIZ and innovation culture at Samsung Electro-Mechanics Company. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.osaka-gu.ac.jp/php/nakagawa/TRIZ/eTRIZ/epapers/e2009Papers/eCheongTRIZSymp2008/09eP-Cheong-TRIZSymp2008-090709.pdf>>.

CONFORTO, Edivandro Carlos e AMARAL, Daniel Capaldo e SILVA, Sérgio Luis da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. 2011, Anais. Porto Alegre, RS: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011. Acesso em: 27 nov. 2023.

DEMARQUE, E.; MASSARANI, M. TRIZ: teoria para a resolução de problemas inventivos aplicada ao planejamento de processos na indústria automotiva. 16 out. 2015.

DIAS, A. S. M. DA E. Proposta de um modelo de referência para a concepção e desenvolvimento de novos produtos. Disponível em: <<https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/3973>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

DIETER, G. *Engineering Design A Materials and Processing Approach*, McGrawHill. 2000.

EKMEKCI, I.; NEBATI, E. E. Triz Methodology and Applications. *Procedia Computer Science*, v. 158, p. 303–315, 2019.

ELLIOT, J.B. Risk analysis, two tools you can use to assure product safety and reliability, Booth Scientific, 1998.

ENVIRONMENT, E. Accelerated Life Testing – Classic or CALT «Electronic Environment. Disponível em: <<https://www.electronic.se/2015/03/09/accelerated-life-testing-classic-or-calt>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FMEA Handbook (with Robustness Linkages) Failure Mode Effects Analysis and Version 4.2 [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://fsp.portal.covisint.com/documents/106025/14555722/FMEA+Handbook+v4.2/4c14da5c-0842-4e60-a88b-75c18e143cf7?version=1.0>>.

GEISBUSH, J.; ARIARATNAM, S.T. Reliability centered maintenance (RCM): literature review of current industry state of practice. In: Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2023; Vol. 29, No. 2. pp. 313-337.

GONÇALVES, F. C. Uma abordagem multistakeholder para análise de árvore de falhas no setor terciário. repositorio.ufba.br, 2 maio 2018.

GORDON, W.J. J. Synectics: The Development of Creative Capacity. New York: Harper & Row. 1961

HALLQUIST, E. J.; SCHICK, T. Best practices for a FRACAS implementation. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1285523>>.

HELPER, D. G. et al. Nível de maturidade para indústria 4.0: Um estudo de caso em empresa de parafusos / Maturity level for industry 4.0: A case study in a screw company. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 11, p. 102801–102818, 8 nov. 2021.

HSIEH, H.T; CHEN, J. L. Using TRIZ methods in friction stir welding design. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 46, n. 9-12, p. 1085–1102, 11 jul. 2009.

HU, Z.; MAHADEVAN, S. Accelerated Life Testing (ALT) Design Based on Computational Reliability Analysis. Quality and Reliability Engineering International, v. 32, n. 7, p. 2217–2232, 26 nov. 2015.

HUA, Z. et al. Integration TRIZ with problem-solving tools: a literature review from 1995 to 2006. International Journal of Business Innovation and Research, v. 1, n. 1/2, p. 111, 2006.

ILEVBARE, I. M.; PROBERT, D.; PHAAL, R. A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice. Technovation, v. 33, n. 2-3, p. 30–37, fev. 2013.

KE, C. et al. An integrated design method for remanufacturing process based on performance demand. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 118, n. 3-4, p. 849–863, 8 set. 2021.

KIM, J.H.; KIM, I.S.; LEE, H.W.; PARK, B.O. A Study on the Role of TRIZ in DFSS. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems. 5. 22-29. 2012.

KRASNOSLOBODTSEV, V.; LANGEVIN, R. Applied TRIZ in high-tech industry. Altshuller Institute for TRIZ Studies. Disponível em: <<https://new.aitriz.org/articles/TRIZFeatures/6B7261736E6F736C6F626F64747365762D31323033.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

LAU, D. K. The role of TRIZ as an inventive tool in technology development and integration in China. 27 abr. 2004.

LI, Z.; WANG, K.; HE, Y. Industry 4.0 - Potentials for Predictive Maintenance. Disponível em: <<https://www.atlantis-press.com/proceedings/iwama-16/25862217>>.

LIKERT, R.; ROSLOW, S.; MURPHY, G. A simple and reliable method of scoring the Thurstone attitude scales. *Personnel Psychology*, v. 46, n. 3, p. 689–690, set. 1993.

LIMA, K. DOS S. Instituto de Ensino Superior de Londrina, Curso de Administração, Empowerment nas Organizações: Implementação e Desafios. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.inesul.edu.br/revista/arquivos/arq-idvol\\_68\\_1591803163.pdf](https://www.inesul.edu.br/revista/arquivos/arq-idvol_68_1591803163.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2023.

LIMA, M. L. P. (2006). Atitudes: estrutura e mudança. In J., Vala & M. B. Monteiro (Eds.). *Psicologia social*. (pp. 187-225). Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

LIN, C.-S.; CHEN, L.-S.; HSU, C.-C. An innovative approach for RFID product functions development. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 12, p. 15523–15533, nov. 2011.

LIN, S. Y.; WU, C. T. Application of TRIZ inventive principles to innovate recycling machine. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 8, n. 5, p. 168781401664730, maio 2016.

LIN, C.S.; SU, C.T. An innovative way to create new services: applying the triz methodology. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, v. 24, n. 2, p. 142–152, jan. 2007.

LIVOTOV, P. Method for Quantitative Evaluation of Innovation Tasks for Technical Systems, Products and processes. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=133b47578a3cb1de4303c98c06750b4f2863087c>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

LIVOTOV, P.; PETROV, V., TRIZ Innovation Technology. Product Development and Inventive Problem Solving. TRIZ Handbook-Content. Berlin: TriS Europe GmbH, 2019.

MANN, D.; DOMB, E. 40 Inventive Principles for Business. Disponível em: <<https://the-trizjournal.com/40-inventive-business-principles-examples/>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

MARQUES, J.F. et al. Aplicação da Metodologia TRIZ e da Manutenção Autónoma em Atividades de Manutenção Industrial. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/157629615.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

MARTÍNEZ, G.A.S., Résumé de LOB1251 - Introdução a Inovação Sistemática com TRIZ (2018) - Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/course/info.php?id=62250&lang=fr>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

MARTÍNEZ, L. B. et al. The Graphical Analysis for Maintenance Management Method: A Quantitative Graphical Analysis to Support Maintenance Management Decision Making. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 29, n. 1, p. 77–87, 27 jan. 2012.

MATOS, L. M. R. DE. Aplicação da ferramenta metodológica TRIZ no desenvolvimento de novos produtos industriais em empresas nacionais. Disponível em: <<https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/7968>>.

MENDES, J.; CRUZOALDO, R.; PEREIRA, D. Engenharia de confiabilidade - um estudo de caso para avaliação do desempenho do sistema de descarga de minério “virador de vagões” durante o primeiro ano de operação. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2014\\_TN\\_STO\\_196\\_112\\_24503.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2014_TN_STO_196_112_24503.pdf)>.

MIL-HDBK-2155 FAILURE REPORTING ANALYSIS CORRECTIVE TAKEN. Disponível em: <[http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-2000-2999/MIL-HDBK-2155\\_21714/](http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-2000-2999/MIL-HDBK-2155_21714/)>. Acesso em: 27 nov. 2023.

MOEHRLE, M. G. What is TRIZ? From Conceptual Basics to a Framework for Research. *Creativity and Innovation Management*, v. 14, n. 1, p. 3–13, mar. 2005.

MOUBRAY, J., *Reliability-Centered Maintenance*, New York: Industrial Press, 2001.

NAVAS H. Fundamentos do TRIZ: Parte IX - Algoritmo de Resolução Inventiva de Problemas (ARIZ). v. 58, n. 1, p. 5–5, 1 jan. 2015.

PASCUAL, F.; MEEKER, W.; ESCOBAR, L. Accelerated Life Test Models and Data Analysis. *Springer Handbook of Engineering Statistics*, p. 397–426, 2006.

PERES, C., Luís Fernando. *Metodologia para gerenciamento de risco: foco na segurança e na continuidade*. 2009.

GERALDO, J.; PIRES, C.; LATIN, M. Metodologia TRIZ uma opção para solução de problemas orientada ao ser humano e desenvolvendo competências. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos16/5424121.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

PRINCE, G. M. The practice of creativity: a manual for dynamic group problem-solving. Williamsville, Vt: Echo Point Books & Media, 2012.

RAVINDRAN, V.; SHANKAR, S. Systematic reviews and meta-analysis demystified. *Indian Journal of Rheumatology*, v. 10, n. 2, p. 89–94, jun. 2015.

REBELATO, M. G.; FERNANDES, J. M. R.; RODRIGUES, A. M. Proposta de integração entre métodos para planejamento e controle da qualidade. *Revista Gestão Industrial*, v. 4, n. 2, 1 nov. 2008.

REIS, C.; HEIDRICH, F.; BLUMETTI FACÓ, J.F. O impacto competitivo na indústria brasileira com a aplicação dos conceitos da indústria 4.0., 2017.

FEY, V., & RIVIN, E. (2005). *Innovation on Demand: New Product Development Using TRIZ*. Cambridge: Cambridge University Press. 2005.

ROONEY, J. J.; HEUVEL, L.N. V. Root cause analysis for beginners. *Quality progress*, v. 37, n. 7, p. 45-56, 2004.

SALGADO, M. DE F. P. Aplicação de técnicas de otimização à engenharia de confiabilidade. *repositorio.ufmg.br*, 28 mar. 2008.

ANNIBAL PARRACHO SANT'ANNA; ROBERTO MAGALHÃES PINTO. Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA. *Sistemas & Gestão*, v. 5, n. 3, p. 179–191, 3 mar. 2011.

SAVRANSKY, S. D. *Engineering of Creativity*. [s.l.] CRC Press, 2000.

SILVA, B. R. DE S.; SILVA, F. P. DA. Gestão da manutenção industrial: Utilização de Ferramentas de Gestão Visual para Solucionar Altos Índices de Downtime em uma Fábrica de Embalagens Metálicas. *Episteme Transversalis*, v. 12, n. 1, 29 abr. 2021.

ALIZADEH, S.S. et al. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Technique: A Literature Review. *Scientific Journal of Review*, v. 4, n. 1, p. 1–6, 27 jan. 2015.

SIQUEIRA, I. P.; Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação. Qualitymark, 2005.

SHAMAYLEH, A.; AWAD, M.; ABDULLA, A. O. Criticality-based reliability-centered maintenance for healthcare. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 6 set. 2019.

SHIE, A.-J. et al. A Fuzzy Design Decision Model for New Healthcare Service Conceptualization. *International Journal of Fuzzy Systems*, v. 23, n. 1, p. 58–80, 14 set. 2020.

SOBREIRA, J.V.; *Desafios para a Manutenção na perspectiva da Indústria 4.0; Dissertação - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Departamental de Engenharia Mecânica*, 2018.

STAMATIS, D. H. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Milwaukee, Wisc.: Asq Quality Press, 2003.

TUNGA, I. et al. Addressing European Ocean Energy Challenge: The DTOceanPlus Structured Innovation Tool for Concept Creation and Selection. *Energies*, v. 14, n. 18, p. 5988, 21 set. 2021.

TODINOV, M. Domain-independent approach to risk reduction. *Journal of Risk Research*, v. 23, n. 6, p. 796–810, 21 jun. 2019.

TRIZ Conference in Praga. Disponível em: <<http://www.triz-solver.com/index.php/konferentsii/228-triz-praga-2014>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

VACCARO, F. J. et al. Negative strap corrosion in valve-regulated lead acid batteries and its analysis by accelerated life testing. 19 nov. 2002.

VIVEROS, P. et al. Resolution of reliability problems based on failure mode analysis: an integrated proposal applied to a mining case study. *Production Planning & Control*, v. 29, n. 15, p. 1225–1237, 18 nov. 2018.

XENOS, H.G. *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. Minas Gerais: DG, 1998. p. 18, 19, 24.

KENJI, A. *Aplicação do mapeamento de árvore de falhas (FTA) para melhoria contínua em uma empresa do setor automobilístico*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2007\\_tr580442\\_0041.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr580442_0041.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2023.

YAMASHINA, H.; ITO, T.; KAWADA, H. Innovative product development process by integrating QFD and TRIZ. *International Journal of Production Research*, v. 40, n. 5, p. 1031–1050, jan. 2002.

YANG, M.; TSAI, M.-T. Analysis and Application of Energy Management in Industry 4.0 with TRIZ Methodology. v. 6, n. 3, p. 30–45, 31 mar. 2021.

WAN, J. et al. A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 13, n. 4, p. 2039–2047, ago. 2017.

WANG, J., SHEN, D., DANG, N., CONG, L. Case Study: Fracture of shaft head of centrifugal pump. Proceedings of the 17th International Conference "TRIZfest 2022". August 31- September 1-3, 2022.



## ANEXO II

Formulário enviado aos participantes para apresentação da TRIZ, suas ferramentas, aplicações e particularidades.

Figura 41 – Formulário enviado

### MATRIZ DE CONTRADIÇÕES TRIZ

---

MATRIZ DE CONTRADIÇÕES TRIZ - ANÁLISE DE FALHAS EM ATIVOS INDUSTRIAIS

---

E-mail \*

E-mail válido

Este formulário está coletando e-mails. [Alterar configurações](#)

TRIZ



Modelo de utilização da Matriz de Contradição TRIZ no processo de análise de falhas de ativos industriais

Qual o seu nome?

Texto de resposta curta

Qual o seu melhor e-mail?

Texto de resposta curta

Qual a sua função na Companhia?

Texto de resposta curta

De acordo a apresentação realizada em 10 fevereiro 2023, qual a sua avaliação da proposta

	1	2	3	4	5	
A Metodologia é interessante, porém não se aplica ao nosso dia a dia	<input type="radio"/>	A Metodologia é interessante e pode ser aplicada ao nosso dia a dia				

Você já conhecia a Matriz de Contradições da TRIZ?

	1	2	3	4	5	
Já conhecia e vi algumas de suas aplicações	<input type="radio"/>	Não conhecia				

Você conhecia sobre a Metodologia TRIZ ou algumas de suas ferramentas?

Listadas abaixo, informe quais conhecia:

	Sim	Não
Princípios Inventivos e a Matriz d...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
ARIZ – Algoritmo de Resolução I...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
SuField - Substância Campo-Sub...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
76 Soluções Padrão	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Idealidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Padrões de Evolução	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Análise de Interações	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Comente brevemente o seu conhecimento de alguma das ferramentas citadas, lida em algum artigo, literatura, internet;

Texto de resposta curta

.....

A apresentação da utilização da Matriz de Contradições como implemento de uma padronização nas respostas de uma causa raiz, como exemplificado, é oportuna, qual o seu parecer?

Texto de resposta curta

.....