

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

PEDRO FELLIPE MEDEIROS BITTENCOURT

**APLICAÇÃO DA FMEA EM PROJETO E FABRICAÇÃO DE MOTORES DE ÍMÃ
PERMANENTE PARA VEÍCULOS ELETRIFICADOS: ESTUDO DE CASO**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

PEDRO FELLIPE MEDEIROS BITTENCOURT

**APLICAÇÃO DA FMEA EM PROJETO E FABRICAÇÃO DE MOTORES DE IMÃ
PERMANENTE PARA VEÍCULOS ELETRIFICADOS: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Eduardo Antonio Linck, Me.Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Medeiros Bittencourt, Pedro Fellipe
APLICAÇÃO DA FMEA EM PROJETO E FABRICAÇÃO DE MOTORES
DE IMÃ PERMANENTE PARA VEÍCULOS ELETRIFICADOS: ESTUDO DE
CASO / Pedro Fellipe Medeiros Bittencourt; orientação
de Eduardo Antonio Linck. - Florianópolis, SC,
2024.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Mestrado
Profissional em Mecatrônica. Departamento Acadêmico
de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. E-PTO. 2. FMEA. 3. Gestão da Qualidade. 4. Melhoria
Contínua. I. Antonio Linck, Eduardo. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. III. APLICAÇÃO DA FMEA EM
PROJETO E FABRICAÇÃO DE MOTORES DE IMÃ PERMANENTE
PARA VEÍCULOS ELETRIFICADOS: ESTUDO DE CASO.

APLICAÇÃO DA FMEA EM PROJETO E FABRICAÇÃO DE MOTORES DE IMÃ PERMANENTE PARA VEÍCULOS ELETRIFICADOS: ESTUDO DE CASO

PEDRO FELLIPE MEDEIROS BITTENCOURT

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em 2024 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 26 de Agosto, 2024.

Banca Examinadora:

Eduardo Antonio Linck, Me.

Eduardo Yuji Sakurada, Dr.
IFSC

Erwin Werner Teichmann, Dr.
IFSC

RESUMO

Este trabalho explora a elaboração de um plano de estratégias de gestão da qualidade, com ênfase na aplicação da metodologia FMEA na fabricação de um motor de ímã permanente para e-PTOs (*Electrical Power Take Off*) destinados a veículos eletrificados. Realizado no Instituto Federal de Santa Catarina em colaboração com uma empresa privada, o projeto foca na identificação, análise e mitigação de falhas potenciais durante a fabricação de componentes críticos do motor, como o Eixo do Motor, a Caixa de Passagem, a Flange Hidráulica e a Flange de Fixação do Encoder. Durante a produção, enfrentaram-se desafios como a falta de precisão nos instrumentos de usinagem, que afetou o Eixo do Motor, e a necessidade de frequentes ajustes no código CNC para a Caixa de Passagem. Também foram necessários ajustes nas especificações e processos de fabricação da Flange Hidráulica e da Flange de Fixação do Encoder para garantir a precisão e funcionalidade necessárias. Os dados críticos de manufatura foram registrados e organizados em planilhas FMEA, que mapearam as falhas, suas causas e possíveis soluções. Com base nesses dados, foram desenvolvidos planos de ação PDCA, visando implementar medidas corretivas e promover a melhoria contínua da qualidade e confiabilidade dos processos produtivos. Este estudo destaca a importância da colaboração entre instituições acadêmicas e o setor industrial e propõe que as abordagens de gestão de qualidade adotadas possam ser aplicadas em futuras produções no setor de veículos eletrificados e outras áreas industriais.

Palavras-chaves: e-PTO, FMEA, Gestão da Qualidade e Melhoria Contínua.

ABSTRACT

This work explores the development of a quality management strategy plan, with an emphasis on the application of the FMEA methodology in the manufacturing of a permanent magnet motor for e-PTOs (Electrical Power Take Off) intended for electrified vehicles. Conducted at the Federal Institute of Santa Catarina in collaboration with a private company, the project focuses on identifying, analyzing, and mitigating potential failures during the manufacturing of critical motor components, such as the Motor Shaft, Passage Box, Hydraulic Flange, and Encoder Fixing Flange. During production, challenges were encountered, such as the lack of precision in machining instruments, which affected the Motor Shaft, and the need for frequent adjustments to the CNC code for the Passage Box. Additionally, adjustments to the specifications and manufacturing processes of the Hydraulic Flange and Encoder Fixing Flange were necessary to ensure the required precision and functionality. Critical manufacturing data were recorded and organized into FMEA spreadsheets, which mapped out failures, their causes, and potential solutions. Based on this data, PDCA action plans were developed, aiming to implement corrective measures and promote continuous improvement in the quality and reliability of production processes. This study highlights the importance of collaboration between academic institutions and the industrial sector and suggests that the quality management approaches adopted can be applied in future productions in the electrified vehicle sector and other industrial areas.

Key-words: Continuous Improvement, e-PTO (Electrical Power Take Off), FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) and Quality Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Processos.....	15
Figura 2 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa.....	16
Figura 3 - Ciclo PDCA, a base da gestão da qualidade.....	17
Figura 4 – Exemplo de FMEA aplicado para motor de bombeamento de caixa d`água.....	21
Figura 5 - Mapeamento indicativo dos principais dados do FMEA.....	23
Figura 6 - Fluxograma do estudo de caso.....	26
Figura 7 - Exemplificação da variedade de potenciais de falhas.....	27
Figura 8 - Exemplificação da listagem de efeitos dos potenciais modos de falha.....	27
Figura 9 - Exemplificação do mapeamento de causas.....	29
Figura 10 - Sistema de transmissão de um caminhão para uma PTO.....	32
Figura 11 - Fluxo de funcionamento de uma e-PTO.....	32
Figura 12 - Laboratório de Máquinas Operatrizes (MOP).....	33
Figura 13 - Mapeamento das seções da tabela FMEA.....	35
Figura 14 - Caixa de Passagem Finalizada.....	36
Figura 15 - Primeira execução da peça base da Caixa de Passagem.....	36
Figura 17 - Caixa de passagem danificada.....	37
Figura 18 - Programação da Eletroerosão e o maquinário usinando.....	45
Figura 19 - Primeira etapa do Eixo do Motor.....	45
Figura 20 - Segunda tentativa com falha do Eixo do Motor.....	46
Figura 21 - Flanges Hidráulicas Finalizadas.....	52
Figura 22 - Erro de Furação das Flanges Hidráulicas.....	53
Figura 23 - Flanges Hidráulicas Refeitas.....	53
Figura 24 - Tentativa de fixação da Flange de Fixação do Encoder.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala para Ocorrência de Falha (O) e Gravidade da Falha (G).....	24
Tabela 2 – Escala para Detecção de Falha (D).....	25
Tabela 3 - Índice de Severidade para FMEA de Processos.....	28
Tabela 4 - Índice de classificação de ocorrências de Falhas.....	29
Tabela 5 - Índice de Detecção.....	30
Tabela 6 - Grau de Índice de Número de Prioridade de Risco (NPR).....	31
Tabela 7 – Componentes a ser fabricados.....	34
Tabela 8 - Seção I do FMEA da Caixa de Passagem.....	38
Tabela 9 - Seção II do FMEA da Caixa de Passagem.....	39
Tabela 10 - Seção III do FMEA da Caixa de Passagem.....	40
Tabela 11 - Seção IV do FMEA da Caixa de Passagem.....	40
Tabela 12 - Etapa de Planejamento do PDCA para a Caixa de Passagem.....	41
Tabela 14 - Etapa de Execução do PDCA para a Caixa de Passagem.....	42
Tabela 15 - Etapa de Verificação do PDCA para a Caixa de Passagem.....	43
Tabela 16 - Etapa de Ação do PDCA para a Caixa de Passagem.....	44
Tabela 17 - Seção I do FMEA do Eixo do Motor.....	47
Tabela 18 - Seção II do FMEA do Eixo do Motor.....	48
Tabela 19 - Seção III do FMEA do Eixo do Motor.....	48
Tabela 20 - Seção IV do FMEA do Eixo do Motor.....	49
Tabela 21 - Apresentação da etapa de Planejamento do PDCA para o Eixo do Motor.....	50
Tabela 22 - Apresentação da etapa de Execução do PDCA para o Eixo do Motor.....	50
Tabela 23 - Apresentação da etapa de Verificação do PDCA para o Eixo do Motor.....	51
Tabela 24 - Apresentação da etapa de de Ação do PDCA para o Eixo do Motor.....	51
Tabela 25 - Seção I do FMEA da Flange Hidráulica.....	54
Tabela 26 - Seção II do FMEA da Flange Hidráulica.....	55
Tabela 27 - Seção III do FMEA da Flange Hidráulica.....	56
Tabela 28 - Seção IV do FMEA da Flange Hidráulica.....	56
Tabela 29 - Etapa de Planejamento do PDCA para a Flange Hidráulica.....	57
Tabela 30 - Etapa de Execução do PDCA para a Flange Hidráulica.....	58
Tabela 31 - Etapa de Verificação do PDCA para a Flange Hidráulica.....	58
Tabela 32 - Etapa de Ação do PDCA para a Flange Hidráulica.....	59
Tabela 33 - Seção I da FMEA da Flange de Fixação do Encoder.....	61
Tabela 34 - Seção II da FMEA da Flange de Fixação do Encoder.....	62
Tabela 35 - Seção III da FMEA da Flange de Fixação do Encoder.....	63
Tabela 36 - Seção IV da FMEA da Flange de Fixação do Encoder.....	64
Tabela 37 - Etapa de Planejamento do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder.....	65
Tabela 38 - Etapa de Execução do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder.....	66
Tabela 39 - Etapa de Verificação do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder.....	66
Tabela 40 - Etapa de Ação do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder.....	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
ePTO	Electrical Power Take Off
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
ISO	International Organization for Standardization
MTTF	Mean Time To Failure
NBR	Norma Técnica Brasileira
NPR	Número de Prioridade de Risco
PDCA	Plan, Do, Check, Act
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Problema de pesquisa	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 Justificativa	13
1.5 Estrutura do Trabalho	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Definição de processo e o seu controles	15
2.2 Ciclo PDCA	18
2.3 Conceito e origem de Confiabilidade	19
2.4 Variações da manutenção	20
2.5 Análise de modos e efeitos de falhas (FMEA)	21
2.5.1 Variações do FMEA	22
2.5.2 Conceitos fundamentais do desenvolvimento de FMEA de Processos	22
3 METODOLOGIA	26
3.1 Padrão de projeto	26
3.2 Fluxo de operações para o estudo do projeto	26
3.2.1 Estudo da gestão da qualidade e planejamento da implementação	26
3.2.2 Análise das falhas em potencial	26
3.2.3 Avaliação da severidade dos efeitos de falha	27
3.2.4 Análise das causas e histórico de falhas	28
3.2.5 Determinação do NPR (Número de Prioridade de Risco)	30
3.2.6 Proposta de ações recomendadas	31
4 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO	32
4.1 O projeto	32
4.2 Estrutura e recursos do projeto	33
5 ESTUDO DE CASO	35
5.1. Análise sobre: Caixa de Passagem	35
5.1.1 Caixa de Passagem: Funcionalidade	35
5.1.2 Caixa de Passagem: Mapeamento de falhas	36
5.1.1 Caixa de Passagem: Plano de Ação	38
5.2 Análise sobre: Eixo do Motor	44
5.2.1 Eixo do Motor: Funcionalidade	44
5.2.2 Eixo do Motor: Mapeamento de falhas	44
5.3 Análise sobre: Flange Hidráulica	52
5.3.1 Flange Hidráulica: Funcionalidade	52
5.3.2 Flange Hidráulica: Mapeamento de falhas	52
5.3.3 Flange Hidráulica: Plano de Ação	54
5.4 Análise sobre: Flange de Fixação do Encoder	60

5.4.1 Flange de Fixação do Encoder: Funcionalidade	60
5.4.2 Flange de Fixação do Encoder: Mapeamento de Falhas	60
5.4.3 Flange de Fixação do Encoder: Plano de Ação	61
6 CONCLUSÃO	68
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	68
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICES	70
APÊNDICE A - FMEA da Caixa de Passagem	70
APÊNDICE B - FMEA Completo do Eixo do Motor	71
APÊNDICE C - FMEA Completo da Flange Hidráulica	72
APÊNDICE D - FMEA Completo da Flange de Fixação do Encoder	73

1 INTRODUÇÃO

Em um cenário contemporâneo, a busca por soluções eficazes e sustentáveis tornou-se uma prioridade global em relação à mitigação dos efeitos ambientais e ao crescimento do desenvolvimento econômico sustentável. Com este propósito, a eletrificação de máquinas industriais e sistemas de transporte se tornou uma alternativa viável para minimizar a dependência de fontes energéticas fósseis e atenuar as emissões de gases indesejados.

Com as tecnologias emergentes para aplicações em desenvolvimento de sistemas industriais e veículos elétricos, a e-PTO (*Electrical Power Take Off*) é uma das tecnologias promissoras que oferece uma solução eficiente e sustentável para transferência de potência em variedade de dispositivos ou implementos auxiliares, como guindastes ou betoneiras. Mas, ao mesmo tempo, a aplicação eficaz da funcionalidade da e-PTO depende muito do processo de fabricação de um maquinário, em termos de eficiência e confiabilidade.

Nesse viés, o presente trabalho propõe um estudo aprofundado das falhas que surgiram nos processos de manufatura de um motor destinado a acionar a e-PTO, buscando principalmente estabelecer e compreender as causas dos problemas críticos encontrados na fabricação deste componente-chave. Desta forma, a abordagem do trabalho que integra os estudos de processos de usinagem e de gestão de qualidade, tem como proposta não apenas identificar as falhas existentes, mas também prescrever medidas de otimização e aprimoramento contínuo que podem estabilizar a confiabilidade e eficácia do processo de produção e, assim, fornecer uma solução sustentável e economicamente viável para produções no contexto da eletrificação de máquinas industriais e sistemas de transporte.

1.1 Problema de pesquisa

Os principais desafios na fabricação de motores de veículos elétricos de ímã permanente são, particularmente, a detecção e correção de falhas nos processos de manufatura. Estas falhas têm implicações no desempenho e na confiabilidade dos motores, que afetam a eficiência e durabilidade dos motores. O problema de pesquisa deste projeto é determinar as falhas críticas que estão ocorrendo dentro do processo de fabricação e estudar maneiras pela qual essas falhas podem ser evitadas ou corrigidas, utilizando a ferramenta de FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falhas). O trabalho irá apresentar planos de ações para os processos de fabricação de componentes-chaves do motor, de modo a trazer a confiabilidade e a qualidade para um nível que satisfaça as necessidades do sistema de produção, mitigando todos os erros detectados por meio da implementação de estratégias de melhoria contínua nos processos.

1.3 Objetivos

Apresenta-se, a seguir, o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é aplicar análise de falhas FMEA completa para um motor de ímã permanente para suas etapas de projeto e fabricação do dispositivo, definindo quais componentes mais críticos utilizando parâmetros da metodologia atual e, desta forma, sugerir formas de evitar ou corrigir as possíveis falhas apresentadas, por meio de um plano de ação.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, apresenta-se, como ações procedimentais, os objetivos específicos:

- Analisar a estrutura do dispositivo e identificar as possibilidades de falhas potenciais na produção de cada componente de um motor de ímã permanente.
- Avaliar a severidade, a probabilidade de ocorrência e a detectabilidade de cada modo de falha.
- Estabelecer e priorizar os modos de falha críticos e propor ações tratativas nos meios de produção do projeto.
- Desenvolver um plano de ação para perpetuar um fluxo de produções de qualidade e estabilidade contra falhas.

1.4 Justificativa

A realização de uma análise de falhas emerge para garantia de confiabilidade e robustez do motor, estabelecendo segurança e funcionalidade em diferentes cenários de operação, tanto para a implementação no projeto atual, quanto em outros do mercado. Com o uso da FMEA, a otimização do processo de desenvolvimento de motores, identificando e analisando potenciais falhas e corrigindo-as em etapas anteriores, precavendo de retrabalhos e custos desnecessários de projeto e produção do dispositivo, além da redução de tempo de lançamento de produto no mercado.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos que podem ser descritos da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução

Este capítulo apresenta a contextualização do tema e são definidos o objeto de pesquisa, os problemas a serem investigados, os objetivos gerais e específicos, a justificativa para o estudo, bem como as limitações enfrentadas.

Capítulo 2: Referencial Teórico

Neste capítulo é abordado o referencial teórico que sustenta este trabalho. Nele, são apresentados os conceitos fundamentais de processos de manufatura, gestão da qualidade, técnicas de análise de falhas, e a evolução das metodologias de manutenção. Além disso, são discutidos os princípios da confiabilidade e os conceitos e implementação da ferramenta FMEA.

Capítulo 3: Metodologia

O terceiro capítulo detalha as metodologias utilizadas para alcançar os objetivos propostos. Descreve-se o padrão de projeto adotado e o fluxo de operações para o estudo do projeto. São discutidos os procedimentos metodológicos, técnicas de pesquisa, e a implementação da FMEA nos processos de fabricação analisados.

Capítulo 4: Caracterização do Projeto

O quarto capítulo apresenta uma descrição detalhada do projeto de desenvolvimento de uma

ePTO (Electric Power Take Off) para veículos híbridos/elétricos. Aqui, são descritos os componentes fabricados, os recursos utilizados, e o ambiente de desenvolvimento.

Capítulo 5: Estudo de Caso

Neste capítulo, são descritas as análises de falhas específicas para os quatro componentes selecionados do motor: Eixo do Motor, Caixa de Passagem, Flange do Motor e Flange de Fixação do Encoder. Para cada componente, são detalhados os processos de fabricação, os empecilhos de processos, e a implementação da FMEA para identificar e agir sobre os mesmos. Por fim, é proposto um plano de ação PDCA (Plan-Do-Check-Act) para melhorias contínuas nos processos.

Capítulo 6: Conclusão

Este capítulo final apresenta as conclusões obtidas a partir das análises realizadas. São discutidos os resultados alcançados, as contribuições do estudo para o projeto e sugestões para trabalhos futuros. A conclusão busca reforçar a importância da implementação da ferramenta FMEA para garantir a qualidade e confiabilidade nos processos de fabricação.

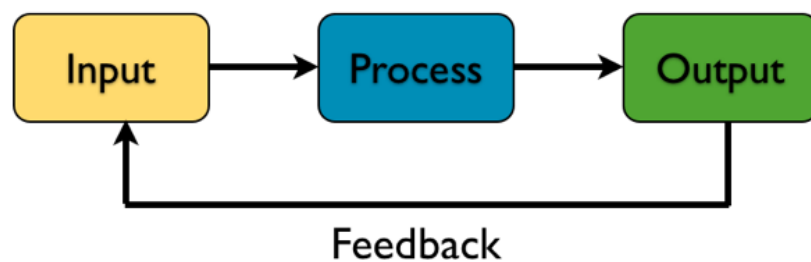
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico do trabalho, é apresentado a introdução teórica aos conceitos base da área de processos e gestão da qualidade, além de metodologias para realização de análise de falhas de projetos e planos de ação para implementação de melhoria contínua em projetos.

2.1 Definição de processo e o seu controles

De acordo com Harrington e Liske (1993), processos são definidos como uma sequência de etapas ou atividades estruturadas para alcançar um resultado específico, organizados de forma que por meio do propósito (resultado buscado) organizados em uma série de processos, transformam recursos, os *inputs* (insumos, informações, recursos), em resultados concretos, os *outputs* (produtos valiosos para o cliente ou para a empresa). Conforme na Figura 1, este conceito pode ser estruturado em um diagrama de blocos que evidencia a sequência da estrutura, além de evidenciar o *feedback* sendo reaproveitado para a melhoria contínua, que será um conhecimento esclarecido em capítulos posteriores.

Figura 1 - Diagrama de Processos



Fonte: Systems (2024).

Já na visão de processos de Kaoru Ishikawa, renomado engenheiro japonês de controle de qualidade, ele conceituou os processos de forma ampla e abrangente, onde todos os fluxos, além das atividades produtivas dentro de uma organização, eram consideradas processos. Processos corporativos como a comunicação interna, as metodologias de tomada de decisões e resoluções de problemas, tinham causas e efeitos nos processos da organização, logo em sua visão de melhoria contínua, podem ser gerenciados e melhorados progressivamente, evidenciando uma visão holística da abordagem de gestão japonesa.

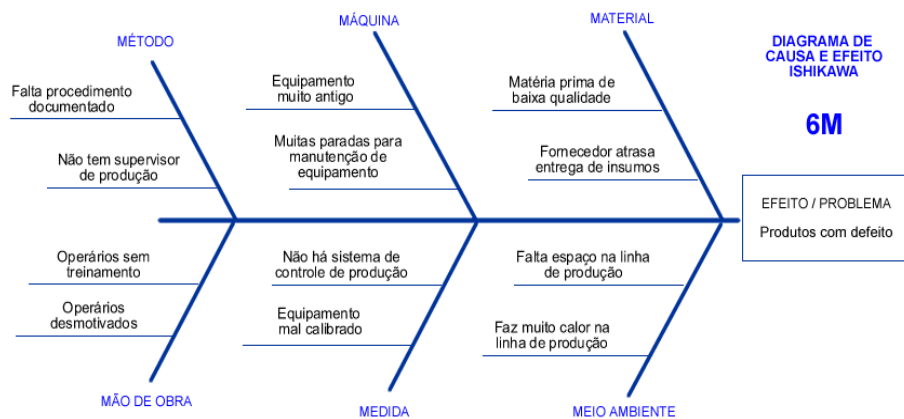
Desenvolvido em meados de 1943, o Diagrama de Ishikawa (também conhecido como Diagrama Espinha de Peixe, Diagrama de Causa e Efeito), é uma ferramenta que evidencia o conceito de Ishikawa, com funcionalidade de analisar os processos, em diferentes perspectivas, relacionando causas potenciais para um determinado cenário, seja para causas de possíveis problemas, quanto para bons resultados. Esta ferramenta é constituída de 6 tópicos de análises de causas:

- **Método:** Refere-se a revisão de como o processo é executado. Possíveis falhas: Treinamento inadequado, procedimentos insuficientes ou fluxos de trabalho ineficientes.
- **Máquina:** Diz respeito à avaliação dos equipamentos ou maquinários utilizados nos processos. Possíveis falhas: Mau funcionamento de maquinário, desgaste dos componentes mecânicos, elétricos e outros.

- Meio Ambiente: Refere-se à análise do ambiente físico e de trabalho onde os processos ocorrem. Possíveis falhas: ruído, poeira, temperatura ou iluminação.
- Material: Trata-se do exame do nível de qualidade dos materiais utilizados pelos processos. Possíveis falhas: Baixa qualidade ou análise incorreta na recepção do insumo.
- Mão de obra: Remete ao diagnóstico de desempenho dos operadores envolvidos no processo. Possíveis falhas: falta de capacitação, desmotivação ou sobrecarga de trabalho.
- Medição: Descreve a apuração da precisão das ferramentas, métodos e dados utilizados nos processos. Possíveis falhas: Calibrações incorretas, métodos de processamento de dados equivocados.

Na Figura 2, temos um exemplo de elaboração e documentação das causas em cada uma das análises de um produto.

Figura 2 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa



Fonte: Gerencial Informática (2023).

Nesse viés, Campos (1992) em "Controle da Qualidade Total", as causas de possíveis falhas devem ser continuamente monitoradas por meio de indicadores estabelecidos para sintomas de cada processo, a fim de controlar e monitorar a qualidade de todos os processos, por meio de identificação, análise e padronização para estabelecer uma estrutura preventiva de falhas, garantindo que o cliente ou a organização não recebam resultados não conformes.

2.3 Desenvolvimento histórico da Gestão da Qualidade

De acordo com Rose Mary Juliano Longo (1996), em seu artigo 'Gestão da Qualidade: Evolução Histórica, Conceitos Básicos e Aplicação na Educação', a preocupação com a qualidade de bens e serviços é uma questão antiga, pois os consumidores sempre se preocuparam em inspecionar o que recebiam em uma transação comercial. Isso caracterizou o que é conhecido como a era da inspeção, na qual o foco estava no produto final e na detecção de defeitos por meio de inspeções intensivas.

Com o advento da produção em massa, surgiu a era do controle estatístico, que introduziu técnicas de amostragem e outros procedimentos estatísticos. Organizacionalmente, isso se refletiu na criação de setores dedicados ao controle de qualidade. Os sistemas de

qualidade começaram a ser desenvolvidos e implementados desde a década de 30 nos Estados Unidos e, um pouco mais tarde, nos anos 40, no Japão e em outros países.

O conceito definitivo de qualidade teve início com W.A. Shewhart, um estatístico norte-americano, na década de 1920. Ele questionava a qualidade e a variabilidade na produção de bens e serviços, o que o acarretou a desenvolver o Controle Estatístico de Processo (*CEP*) e criando o Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check e Action*), também conhecido como Ciclo Deming da Qualidade, representado na Figura 3.

Figura 3 - Ciclo PDCA, a base da gestão da qualidade



Fonte: Periard (2011).

Logo após a Segunda Guerra Mundial, o Japão se apresenta ao mundo literalmente destruído e precisando iniciar seu processo de reconstrução. W.E. Deming foi convidado pela Japanese Union of Scientists and Engineers (*JUSE*) para proferir palestras e treinar empresários e industriais sobre controle estatístico de processo e sobre gestão da qualidade. O Japão inicia, então, sua revolução gerencial silenciosa, que se contrapõe, em estilo, mas ocorre paralelamente, à revolução tecnológica “barulhenta” do Ocidente e chega a se confundir com uma revolução cultural. Essa mudança silenciosa de postura gerencial proporcionou ao Japão o sucesso de que desfruta até hoje como potência mundial (Longo, 1996).

A partir do período pós-guerra, a gestão da qualidade tornou-se uma preocupação central, trazendo consigo uma nova filosofia gerencial baseada no desenvolvimento e aplicação de conceitos, métodos e técnicas adequadas. A gestão da qualidade total, como ficou conhecida, marcou uma mudança na abordagem, deslocando o foco do produto ou serviço para a concepção de um sistema de qualidade e planejamento estratégico de acordo com as necessidades dos consumidores e do mercado, visando a sobrevivência das empresas em um ambiente competitivo.

A qualidade passou a ser vista não apenas como um aspecto do produto, mas como um problema abrangente de empresas, envolvendo todos os aspectos de sua operação, onde a competitividade e o desempenho das organizações podem ser comprometidos por diversos fatores, como a falta de capacitação dos recursos humanos, modelos gerenciais ultrapassados, decisões baseadas em informações insuficientes e de posturas que não incentivam a melhoria contínua dos processos.

Portanto, é imprescindível que as empresas estejam atentas a esses desafios e adotem práticas de gestão estratégica eficientes para garantir sua sustentabilidade e sucesso no

mercado atual. A busca por inovação, capacitação dos colaboradores, atualização e adaptação constante dos processos e alinhados com métodos de confiabilidade para desempenhar processos de alta produtividade, para desta forma, garantir estabilidade de seus processos e, por consequência, resultar em produtos de qualidade.

2.2 Ciclo PDCA

Conforme citado no tópico anterior, a ferramenta PDCA é uma das práticas de controle e melhoria contínua de processos que pode ser implementada na gestão da qualidade de uma organização. A sigla PDCA denota os passos do ciclo: Plan, Do, Check, Act. A prática foi inicialmente desenvolvida nos anos 30 por Walter A. Shewhart e foi popularizada nas décadas de 50, principalmente através da experiência da aplicação no Japão por William Edward Deming. O ciclo é um fluxo de quatro passos:

1. Planejamento (Plan):

- **Identificar a Área do Processo:** O primeiro passo é identificar a área do processo ou o problema para o qual se requer melhoria. Isso é feito observando os dados criticamente para onde as coisas estão indo errado ou onde existem áreas de melhoria.
- **Estabelecer Metas:** Tendo identificado a área do problema, objetivos claros e mensuráveis são definidos para o processo de melhoria. As metas devem ser específicas, alcançáveis, relevantes e limitadas no tempo..
- **Esboço do Plano de Ação:** Após a definição das metas, deve ser definido um plano de ação. O plano de ação conterá todas as atividades que levarão à realização das metas e os recursos e metodologias necessárias para alcançar sua conclusão.

2. Execução (Do):

- **Implementação do Plano:** Esta é a etapa onde o plano de ação desenvolvido na etapa anterior é implementado. A implementação deve ser estruturada e controlada, de modo que cada atividade do plano seja atendida conforme projetado.
- **Execução e Monitoramento:** Enquanto a execução está em andamento, a etapa deve ser monitorada de tempos em tempos para garantir que as atividades sejam realizadas corretamente e no prazo. O monitoramento ajuda a detectar qualquer desvio do plano em andamento e ajuda na correção do desvio na hora certa.

Verificação (Check):

- **Análise dos Resultados:** Após a ação ser tomada, os resultados devem ser verificados. Isto deve ser feito com a ajuda da análise dos dados que foram coletados durante a implementação. Aqui, os resultados reais devem ser comparados com os resultados esperados que foram decididos durante a etapa de planejamento.
- **Avaliação do Desempenho:** O estudo deve tentar determinar se os objetivos foram cumpridos e, se não, tentar encontrar a causa da discrepância. Se os resultados forem insatisfatórios, deve-se determinar o que deu errado e por quê. Isso pode levar à investigação das causas do erro.

- **Verificação Contínua:** Em alguns casos, a verificação pode ser feita enquanto o processo está sendo executado (verificação em tempo real) para que as coisas possam ser corrigidas imediatamente. Em outras, o controle é executado após a implementação do plano, no qual métodos estatísticos são usados para decidir o desempenho do processo.

Ação (Act):

- **Ação Corretiva ou Preventiva:** Após os resultados da etapa de controle, a organização é mandada tomar medidas. Se o plano estiver em andamento, o novo processo ou melhoria deve ser padronizado. Isto significa documentar e incorporar a nova norma no procedimento de operações da empresa.
- **Padronização:** Após a aplicação comprovada de uma solução, ela deve ser incorporada nas operações reais da empresa. Isto inclui implementar mudanças nos procedimentos, treinamentos e comunicar a nova prática aos funcionários.

Em cada ciclo concluído do PDCA, o processo melhora e a organização atinge um novo nível de qualidade. O ciclo não apenas resolve os problemas apresentados, mas também impede que surjam outros, pois o final de um ciclo significa um novo aprendizado e uma melhoria no processo. Esta ferramenta pode ser aplicada a qualquer processo ou projeto, não importa o tipo de negócio, e é uma ferramenta genérica para gestão da qualidade e melhoria contínua, permitindo que organizações ajam prontamente em relação a problemas e oportunidades de melhorias na confiabilidade de seus processos (BUENO, 2013).

2.3 Conceito e origem de Confiabilidade

De acordo com a NBR 5462 (1994), confiabilidade é a probabilidade de um componente, máquina, equipamento ou sistema, desempenhar sua função conforme o projeto e condições de operação, durante um determinado período.

Sendo uma das suas primeiras aplicações técnicas no setor aeronáutico, que semeou o seu valor tecnológico por volta do término da Primeira Guerra Mundial, a confiabilidade foi inicialmente implementada em estudos comparativos em aviões para análise e medição do número de acidentes por hora de voo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Durante a Segunda Guerra Mundial, um grupo de engenheiros da equipe de von Braun trabalhou, na Alemanha, no desenvolvimento dos mísseis V-1. Após o término da guerra, soube-se que todos os protótipos desenvolvidos falharam quando testados, explodindo antes (durante o voo) ou aterrissando antes do alvo. O matemático Robert Lusser foi contratado para analisar o sistema operacional dos mísseis. A partir de sua análise, Lusser propôs a lei da probabilidade de um produto com componentes em série, em que estabelecia que a confiabilidade de um sistema em série é igual ao produto das confiabilidades de suas partes componentes. Como consequência direta, sistemas em série compostos por muitos componentes tendem a apresentar baixa confiabilidade e o efeito da melhoria de confiabilidade dos componentes individualmente sobre o sistema tende a ser pequeno (Fogliatto:Ribeiro, 2009, p.3).

No período da Guerra Fria, os Estados Unidos realizou grandes passos na área da confiabilidade, devido ao foco no desenvolvimento de mísseis intercontinentais e, principalmente, na área espacial, para se tornar a primeira nação a enviar uma missão tripulada à Lua, com isso, em 1963, surgiu no país norte-americano a primeira associação de engenheiros para desenvolvimento de estudos na área da confiabilidade, o *IEEE* -

Transactions on Reliability (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Segundo os mesmos autores, a confiabilidade, em 1970, esteve centrada nos riscos relacionados à construção e operação de usinas nucleares e outras áreas de que buscavam segurança de seus processos. Com isso, Rausand & Høyland (2003), engenheiros de produção, estabeleceram como princípios:

- **Análise de risco e segurança:** Usufruem da confiabilidade para avaliar riscos dos processos. Técnicas como a análise de modos e efeitos de falhas (FMEA) e a análise da árvore de falhas são usadas para identificar as possíveis causas de falhas.
- **Qualidade:** A adoção das normas ISO-9000 por empresas aumentou a importância das técnicas de gestão e garantia da qualidade. Confiabilidade e qualidade caminham interligadas, com a primeira sendo vista como uma característica essencial para garantia de qualidade em projetos e para a otimização de produtos e processos.
- **Otimização da manutenção:** Manutenções visam prevenir ou restaurar sistemas ao seu estado operacional padrão, desta forma, a confiabilidade é essencial para garantir estabilidade das operações dentro do sistema produtivo, reduzindo custos e melhorando a disponibilidade e segurança aos equipamentos.
- **Proteção ambiental:** A confiabilidade pode ser utilizada como uma ferramenta para otimizar operações de sistemas de controle de poluição, desde o controle de emissões até sistemas de controle de tratamento de resíduos líquidos.
- **Projeto de Produtos:** A confiabilidade proporciona alto valor técnico no desenvolvimento de produtos, sendo utilizadas por meio de técnicas quantitativas e qualitativas, como o FMEA.

Desta forma, o conceito de confiabilidade deve incluir a ideia de tempo, ou seja, a inexistência de falhas ao longo de um período específico. No entanto, a avaliação prática da ocorrência de falhas durante esse período é limitada: as decisões empresariais sobre manutenção e garantia de produtos e serviços se baseiam em previsões futuras, ou seja, na expectativa de quanto tempo as falhas serão evitadas. Portanto, lidamos com probabilidades (ROCHA, 2019). Assim, este conceito está diretamente relacionado à capacidade de um determinado componente ou sistema de operar continuamente, sem falhas ou interrupções indesejadas, evidenciando a importância dos conhecimentos técnicos e práticos de manutenção nas operações dos processos.

2.4 Variações da manutenção

Baseando-se nos conceitos definidos por Rocha (2019) e pela norma NBR 5462, que define a manutenção como “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (ABNT, 1994, p.6). As suas variações podem ser definidas por:

- **Manutenção corretiva:** É a manutenção realizada após a ocorrência de certa falha, com o propósito de restaurar o item para que ele retorne a desempenhar sua função requerida, por meio de reparação, restauração ou substituição dos componentes incapacitados para que o maquinário volte a operar corretamente (ABNT, 1994).

- **Manutenção preventiva:** É a manutenção realizada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, com objetivo de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de certo item (ABNT, 1994). Esta variação seria uma manutenção programada, seguindo critérios prescritos e planejados (geralmente após um determinado período de uso ou por outras medidas de utilização) para estabelecer ações destinadas a reduzir ou eliminar a probabilidade de falhas, por meio de verificações, substituição de peças, limpezas e calibrações (LAFRAIA, 2014).
- **Manutenção preditiva:** “Manutenção que garante a qualidade de serviço desejada através da aplicação sistemática de técnicas de análise e supervisão centralizada, minimizando a manutenção preventiva e reduzindo a corretiva” (ABNT, 1994, p. 7). Esta técnica se destaca por diagnosticar através do monitoramento e alarme de sinais como aumento de temperatura, vibração e ruído, que indicam deterioração, permitindo intervenções apenas quando estritamente necessário para maximizar a funcionalidade da máquina e prevenir falhas.

2.5 Análise de modos e efeitos de falhas (FMEA)

Ferramenta que difundiu-se no final dos anos 40 para o desenvolvimento de novos dispositivos para operações militares, avaliação de confiabilidade de sistemas aeroespaciais da *NASA*, e permeou-se para a os indústria automobilística, amplamente implementado por empresas como *Ford Motor Company*, e até mesmo setores da saúde, construção civil, entre outros. A FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), trata-se de uma metodologia de análise de falhas potenciais de projetos e processos e o que a ocorrência deste empecilho pode causar no seu contexto, proporcionando, por uma análise geral, identificar ações para promover uma melhoria contínua dos serviços executados, provando ser uma ferramenta proativa garantindo qualidade, segurança e confiabilidade. Na Figura 4, é apresentado um exemplo de implementação da ferramenta para um motor de bombeamento de caixa d'água.

Figura 4 – Exemplo de FMEA aplicado para motor de bombeamento de caixa d'água

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA POTENCIAL								
Nº. FMEA: 122		Data de Início: 27-08-2012		Responsável: Cristiano				
Área: Resfriamento de Cubas		Revisão: 01		Preparado por: João		Telefone: (15) 3021-6257		
Sistema: Bombeamento		Equipe: João, Felipe, Pedro						
Nome do Componente	Função do componente	Modo(s) de falha	Efeito(s) Potencial(is) de Falha(s)	OCORR (tab1) (O)	SEVER (tab2) (S)	DETEC (tab3) (D)	RISCO (RPN) (O)*(S)*(D)	Ação Corretiva Recomendada
M212 - Motor Elétrico	Bombear água para a caixa d'água central	Estator - Falha de isolamento	Perda de Fluxo	1	3	5	15	
		Estator - Enrolamento danificado	Perda de Fluxo	4	4	6	96	Realizar inspeção mensal no estator
		Estator – Rotor Queimado	Perda de Fluxo	4	4	5	80	Realizar termografia mensalmente
		Estator - Vibração Excessiva	Perda de Fluxo	5	6	5	150	Realizar análise de vibração mensalmente
		Estator – Rolamento Travado	Perda de Fluxo	5	6	6	180	Realizar inspeção semanal no rolamento

Fonte: Critisystems (2012).

Conforme Schmitt (2015), esta ferramenta tem a finalidade de detectar quais componentes de um sistema necessitam de uma atenção minuciosa para potenciais falhas que podem ocasionar comprometimento de suas funções, estruturando uma hierarquia de “Modos de Falha” identificados na FMEA. Schneider (2001), acrescenta que é importante entender que a falha ocorre quando um item não consegue desempenhar suas funções adequadamente,

enquanto o modo de falha se refere ao efeito observado quando essa falha acontece em um componente.

2.5.1 Variações do FMEA

Dentre esta ferramenta, existem variantes do FMEA que podem ser usadas no desenvolvimento do projeto do produto, bem como no processo, como observado por Toledo e Amaral (2005). Embora os processos e as formas de realizar a análise sejam os mesmos, as diferenças variam de acordo com as intenções, o que leva a diferentes classificações:

- **FMEA de Produto:** É uma técnica analítica empregada por equipes de engenharia para revisar e documentar várias maneiras pelas quais a falha, bem como suas causas e efeitos, podem ocorrer em um produto durante o estágio de projeto. A técnica é capaz de proporcionar uma análise detalhada dos subsistemas e módulos de um produto, e a análise pode ser conduzida para minimizar as chances de falha, levando em consideração os requisitos do projeto de forma neutra. Além de melhorar a qualidade e confiabilidade do produto, a FMEA de projeto melhora a fabricação e montagem, fornece um formato legível que pode ser usado para rastrear ações corretivas, e fornece uma base para a revisão/mudança futura. O principal beneficiário é o usuário final, mas também inclui engenheiros e projetistas envolvidos no processo (Fogliatto; Ribeiro, 2011).
- **FMEA de Processo:** Semelhante a ferramenta superior, mas é centrado em descobrir, analisar e eliminar modos de falha potenciais em cada etapa, atividade e prática de um processo. Aplicada a processos de fabricação e de negócios, o método do processo garante que todas as maneiras possíveis pelas quais um processo pode falhar, suas causas e efeitos sejam descobertos a fim de reduzir os riscos de falha e melhorar a qualidade do produto. O FMEA de Processo também prioriza os modos de falha, determina ação corretiva e documenta os resultados para referência futura e revisão/aperfeiçoamento do processo. Além da vantagem para os consumidores de ter produtos mais confiáveis, ele envolve o engenheiro e o projetista que têm que se certificar de que cada etapa do processo está sendo constantemente revisitada e melhorada (Fogliatto; Ribeiro, 2011).

2.5.2 Conceitos fundamentais do desenvolvimento de FMEA de Processos

Analisando dentre as variações citadas do tópico anterior, a Análise de Modo e Efeito de Falha de Processo, é uma técnica de análise sistemática usada por equipes de desenvolvimento para garantir que todos os possíveis modos de falha, bem como causas e efeitos associados, sejam considerados e discutidos em detalhes ao avaliar processos industriais ou administrativos. Esse método envolve uma análise cuidadosa de todos os estágios, métodos e funções da operação a fim de apontar aquelas falhas que são propensas a resultar em produtos que não estão à altura do padrão. Pode-se dizer que a palavra falha, no contexto do FMEA de processo, é aquela coisa que está inclinada a fazer com que o produto seja de qualidade inferior, portanto, é extremamente essencial que todas as falhas possíveis sejam identificadas e avaliadas através do conhecimento da equipe (Fogliatto, Ribeiro, 2011). Como pode ser visto na Figura 5, o processo é organizado em fluxos que orientam a implementação da metodologia de forma sequencial e detalhada, apresentando os dados essenciais explorados nas etapas seguintes.

Figura 5 - Mapeamento indicativo dos principais dados do FMEA

1

AdvanceConsultoria.com empresa melhor, resultado melhor		FMEA														
Nome do Processo ou Produto:				Preparado por:				Página de								
Responsável:				Data FMEA:				Rev: / /								
Bapa do Processo	Entrada Chave do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeitos de Falha Potencial	Severidade	Causas Potenciais	Ocorrência	Controles Atuais	Deteção	NPR	Ações Recomendadas	Responsável	Ações Tomadas	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR
Colocara bala na catapulta	bala	bala fora da especificação	não encaixar na caçamba	8	especificação incorreta	3	auditoria do sistema da qualidade	5	90	reverte atualizar as especificações das matérias primas críticas	Engenharia	idem recomendada	6	1	5	30
Colocara bala na catapulta	caçamba	caçamba quebrar	parar o processo	8	fadiga, desgaste	4	manutenção preventiva	8	256	implantar rotina de inspeção	Manutenção	idem recomendada	8	2	3	48
Posicionaro braço no ângulo	escala	escala incorreta	distorção nos lançamentos	5	escala não aferida	7	testes de aferição	8	280	implantar rotina de aferição	Metrologia	idem recomendada	5	3	4	60
Posicionaro braço no ângulo	especialista em ângulo	posicionam ento incorreto	distorção nos lançamentos	5	falta de treinamento	7	conferência do posicionamento	8	280	treinamento do especialista	RH	idem recomendada	5	5	3	75
Executar o disparo	operador	não realizar o disparo	parar o processo	8	greve	4	cima organizacional e plano de remuneração	8	256	reestruturação salarial e aumento da motivação	RH	idem recomendada	8	4	3	96
Executar o disparo	elástico	não realizar o disparo	parar o processo	8	rompimento do elástico	8	manutenção preventiva	4	256	substituir matéria prima do elástico	Engenharia	idem recomendada	8	2	4	64

2 3 4 5 6 7 8 9 10

Fonte: Adaptado de AdvanceConsultoria (2014).

Para a implementação por completo desta ferramenta pela equipe, deve-se estabelecer um fluxo de etapas e dados para o para preenchimento e elaboração deste instrumento:

- 1. Cabeçalho: É a seção que preenche detalhes como número do documento, identificação do processo e dos itens analisados, modelo do produto, departamento de execução, informações do coordenador e do participante, e datas de importância, incluindo a data de início, data de revisão e data de término. Os detalhes ajudam a indicar como rastrear e arquivar o FMEA nos negócios.
- 2. Função/Processo: Identifica cada etapa e operação do processo sob consideração, juntamente com a razão ou requisito para o qual a respectiva operação está sendo realizada. Deve-se usar a terminologia do processo aqui e não ser muito descritivo. Se houver mais de um requisito para uma determinada operação, cada requisito deve ser listado separadamente. O preenchimento dessas colunas em sua totalidade ajuda na visualização do processo, identifica as falhas e também orienta as discussões técnicas. A sequência de ações tem que ter sentido na lógica do procedimento, de modo a ter um processamento de dados claro e não contraditório.
- 3. Modo de Falha: É a descrição de como um processo pode falhar em cumprir as especificações ou requisitos definidos. É uma descrição das não-conformidades que são de se esperar no processo, as quais a equipe de engenharia é forçada a estudar com base nas ocorrências do passado, eventos documentados e observações comparativas. Esses modos de falha incluem todas as falhas possíveis, incluindo falhas que ocorrem em condições muito específicas, que podem ter um efeito na qualidade do produto. É muito importante identificar e documentar esses modos, de forma que, no futuro, a falha possa ser evitada.

- 4. O Efeito de Falha: É o efeito que a falha tem no processo ou produto, que é experimentado pelo cliente. Esse efeito pode ser sentido pelo processo que está exatamente na linha, pelo revendedor, ou pelo cliente. Cada modo de falha geralmente tem um efeito, que pode variar desde um problema no processo subsequente - por exemplo, uma peça mal posicionada - até defeitos de desempenho no produto, por exemplo, níveis excessivos de ruído, falta de potência ou problemas de manuseio.
- 5. Severidade da falha (S): É uma avaliação qualitativa do efeito que um modo de falha tem no sistema e na satisfação do cliente. É graduado em uma escala de 1 a 10, onde 1 é o efeito mais baixo e 10 é o efeito mais alto. A avaliação deve ser realizada em nome do cliente final e do plano de processos de manufatura, elaborado em consenso pela equipe e pode incluir a opinião de especialistas, para, desta forma, poder classificar falhas nas operações industriais.
- 6. Causa da Falha: É a origem do problema que leva ao modo de falha de um processo. A identificação da causa é muito crucial porque é uma falha no processo que pode ser eliminada ou controlada. O julgamento do melhor tipo é considerando o conhecimento aplicado pela equipe e o trabalho sistemático. A lista de causas de falha deve ser feita de forma muito particular e detalhada para que a realização de ações corretivas possa ser fácil. Exemplos, incluem medições imprecisas e desvios dos procedimentos, como torque incorreto ou uma máquina fora de calibração.
- 7. Ocorrência de falha (O): É a estimativa da probabilidade de ocorrência de uma causa ou modo de falha. A probabilidade geralmente é estimada com base na experiência passada e na capacidade de processamento, se houver. Caso contrário, ou adicionalmente, ela é estimada subjetivamente, sendo classificada como baixa, moderada ou alta. A classificação varia de 1 a 10, conforme ilustrado na Tabela 1, em que o critério selecionado deve ser consistente para manter a conformidade dos estudos e está relacionado à taxa de falhas do processo.

Tabela 1 – Escala para Ocorrência de Falha (O) e Gravidade da Falha (G)

Nunca	Raramente	Muito baixa	Baixa	Moderado para baixo	Moderada	Moderada alto	Alto	Muito Alto	Sempre
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fonte: Elaboração própria (2024).

- 8. Detecção (D): É a probabilidade de verificação da capacidade dos controles existentes na detecção dos modos de falha antes que o processo ou a etapa do processo avance para a próxima etapa. A detecção é classificada em um índice de 1 a 10, onde 1 é a melhor avaliação de detecção e 10 é a pior, conforme exibido na Tabela 2. A detecção é uma função da capacidade dos sistemas de controle existentes, como uma amostragem estatística e dispositivos à prova de erro. Os controles são ajustados para minimizar a pontuação e melhorar a eficácia na identificação de falhas.

Tabela 2 – Escala para Detecção de Falha (D)

Nunca Detecta	Raramente	Muito baixa	Baixa	Moderado para baixo	Moderada	Moderada alto	Alto	Muito Alto	Sempre Detecta
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Fonte: Elaboração própria (2024).

- 9. NPR (Número de Prioridade de Risco): É a fórmula para priorização da tratativa de falhas que é usada em conjunto com as medidas de ação corretiva e preventiva de um processo. Ela é determinada pelo produto das classificações de um modo de falha de severidade, ocorrência e detecção, onde a relação é: $NPR = S \times O \times D$. O valor obtido varia de 1 a 1.000, e quanto maior for o NPR, maior será a prioridade para intervir. O NPR ajuda na priorização de questões de alto risco com limites definidos e o princípio de Pareto indicando o que precisa ser corrigido.
- 10. Ações Recomendadas: São métodos sugeridos para controlar os riscos associados às causas das falhas identificadas. Após a análise e identificação de riscos, as ações são tomadas para minimizar a severidade, a ocorrência ou a detecção de falhas. As ações podem incluir modificações nos processos, novos controles, tecnologias alternativas ou modificações de design. É crítico que essas ações sejam realizadas e controladas, pois são a saída principal que se deve ter da utilização da ferramenta FMEA.

A manutenção do FMEA é crucial para garantir que todas as ações corretivas adequadas sejam tomadas. A documentação FMEA deve ser revisada continuamente quanto a atualizações mais recentes no projeto ou no processo pelo engenheiro de área. Isso se estende à revisão de desenhos, especificações e procedimentos de montagem, teste e aceita. O FMEA é um documento dinâmico que deve registrar todas as alterações feitas de modo que a reavaliação de riscos e contenção ocorram continuamente ao longo do ciclo de vida do projeto ou processos.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta quais as metodologias utilizadas para a condução do trabalho proposto de acordo com os objetivos específicos previamente estabelecidos, além de apresentar qual o modelo de projeto e o fluxo de operações de análise de falhas e proposta de soluções que serão efetuadas em cada etapa do trabalho.

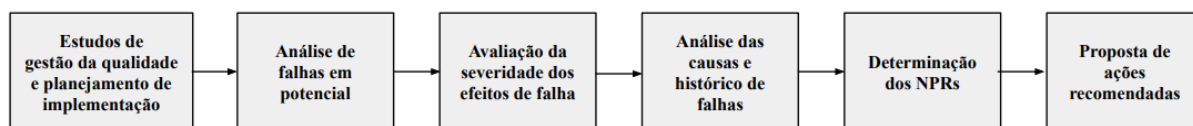
3.1 Padrão de projeto

Este trabalho utilizará como modelo o estudo de caso. Conforme Sampieri, Collado e Lucio (2006), um estudo de caso é uma descrição detalhada dos passos do estudo, em que se inclui o caso e o ambiente. Chemin (2015) acrescenta que o estudo adota essa estratégia na busca de um conhecimento profundo e pode incluir um ou múltiplos casos.

3.2 Fluxo de operações para o estudo do projeto

Este tópico apresentará os passos de desenvolvimento das análises de falhas para cada componente analisado no desenvolvimento do motor elétrico. O fluxo de operações de descrição de cada etapa será de acordo com o fluxograma evidenciado na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma do estudo de caso



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.2.1 Estudo da gestão da qualidade e planejamento da implementação

O estudo começa por entender criticamente a ferramenta FMEA, por meio de estudos de diversas fontes bibliográficas, servindo para um entendimento mais profundo do tema, bem como das definições básicas. O foco principal era compreender os conceitos de processos e o desenvolvimento da gestão da qualidade ao longo dos anos. Também era necessário entender os vários tipos de manutenção disponíveis para, de fato, implementar as correções devidas no desenvolvimento das peças.

Em sequência, inicia-se o planejamento de implementação pela determinação dos objetivos e do escopo da análise, ou seja, a decisão sobre o que exatamente deve ser analisado, os componentes ou os processos. Em segundo lugar, a formação de equipes de trabalho com o mesmo líder - de preferência pequenas - e com todos os membros das disciplinas de área, qualidade, desenvolvimento e produção representados. Por fim, deve ser realizado o agendamento de reuniões antecipadamente e considerado aceitável por todas as pessoas envolvidas.

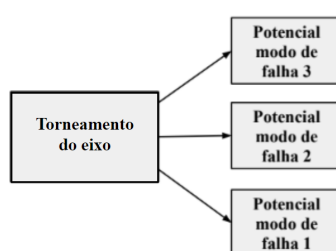
3.2.2 Análise das falhas em potencial

Após os estudos fundamentais de gestão da qualidade, passa-se para a análise dos processos realizados na manufatura dos componentes, investigando e registrando cada etapa dos trabalhos efetuados pelos bolsistas e técnicos para, ao longo das manufaturas, implementar a FMEA.

Ao longo de cada processo, inicia-se o levantamento dos potenciais modos de falha relacionados às etapas do processo que podem ocorrer nas usinagens de cada componente analisado. Os mesmos são levantados em conjunto a equipe, composta pelos integrantes da bolsa de pesquisa, dentro de reuniões por meio de *Brainstorming*, e pela análise de relatórios de histórico de falhas das produções do projeto.

Os modos de falha potenciais associados aos materiais, bem como as falhas associadas às máquinas ou ferramentas do processos, à mão de obra e aos métodos de trabalho, são considerados minuciosamente para a análise. Para cada etapa de usinagem, a equipe pode extrair diversas potenciais falhas que podem ser originadas durante as usinagens. A Figura 7 exemplifica genericamente o caso.

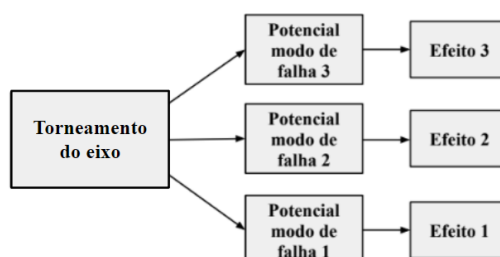
Figura 7 - Exemplificação da variedade de potenciais de falhas



Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a identificação dos modos de falha, a equipe procede à identificação dos possíveis efeitos associados a cada um dos modos de falha registrados, e em sequência, são documentados na planilha de FMEA, em sua coluna correspondente. A Figura 8 descreve o caso .

Figura 8 - Exemplificação da listagem de efeitos dos potenciais modos de falha



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.2.3 Avaliação da severidade dos efeitos de falha

Em sequência, a equipe avalia a severidade dos efeitos de falha, com base na medida em que um efeito de falha afetaria os processos internos e/ou o cliente final. As pontuações foram dadas de acordo com uma tabela de referência de FMEA de processos que dá regras para designar o nível de severidade de cada efeito. As pontuações atribuídas foram registradas na coluna de severidade do formulário, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Índice de Severidade para FMEA de Processos

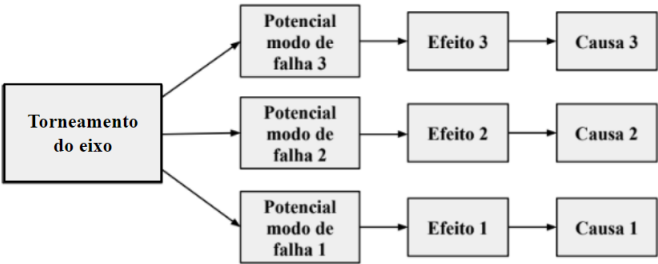
Ranking de Severidade		
Pontuação	Descrição	Efeito
10	Falha em atingir requisitos de segurança e/ou requisitos legais	Pode pôr em perigo operador (máquina ou montagem) sem aviso
9		Pode pôr em perigo operador (máquina ou montagem) com aviso
8	Perda ou degradação da função primária	100% do produto pode ter de ser sucateado. Linha parada ou suspensão das entregas.
7		Uma parte da produção em scrap (não reparável). Desvio de processo primário com a redução de velocidade em linha de produção e/ou uso mão de obra adicional.
6	Perda ou degradação da função secundária	100% da produção corrente pode ser retrabalhada offline para tornar-se aceitável.
5		Uma parte da produção precisa ser retrabalhada para tornar-se aceitável.
4	Aborrecimento que irão importunar a manufatura	100% da produção corrente precisa ser retrabalhada em um processo produtivo subsequente antes de ser processado.
3		Uma parte da produção corrente precisa ser retrabalhada em um processo produtivo subsequente antes de ser processada.
2		Singela inconveniência para operador, processo ou operação.
1	Sem efeito	Defeito não discernível

Fonte: Adaptado de Chrysler LLC (2008).

3.2.4 Análise das causas e histórico de falhas

Para cada modo de falha potencial, todas as suas possíveis causas que podem resultar são mapeadas e registradas pela equipe, como pode ser exemplificado na Figura 9. Após a identificação das mesmas, as causas são registradas na coluna correspondente na planilha FMEA.

Figura 9 - Exemplificação do mapeamento de causas



Fonte: Elaboração própria (2024).

A avaliação das ocorrências de falhas é realizada com base no histórico de falhas de processos que ocorrem durante as manufaturas do projeto. As pontuações de nível de ocorrência foram registradas em suas devidas colunas no FMEA, e este nível é baseado nas estabelecidas por Chrysler (2008), conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Índice de classificação de ocorrências de Falhas

Escala de Classificação de Ocorrência		
Pontuação	Descrição	Índice de Potencial de Falha
10	Muito Alto	≥ 100 em mil (≥ 1 em 10)
9	Alto	50 em mil (1 em 20)
8		20 em mil (1 em 50)
7		10 em mil (1 em 100)
6	Moderado	2 em mil (1 em 500)
5		0.5 em mil (1 em 2.000)
4		0.1 em mil (1 em 10.000)
3	Baixo	0.01 em mil (1 em 100.000)
2		≤ 0.001 em mil (1 em 1.000.000)
1	Muito Baixo	Falha é eliminada através de controles preventivos.

Fonte: Adaptado de Chrysler LLC (2008).

Com a determinação das ocorrências, procede-se a estimar o índice de detecção das causas e potenciais de falha antes do proceder das futuras operações, etapa crucial para priorização das falhas, baseando-se nos índices determinados na tabela 5, que evidencia as classificações em uma escala quantitativa de acordo com a forma como a falha é detectada e quais seus critérios.

Tabela 5 - Índice de Detecção

Escala de Detecção			
Oportunidade de detecção	Critério	Pontuação	Probabilidade de Detecção
Sem oportunidade de detecção	Não há processo atual de detecção; Não pode ser detectado ou não foi analisado.	10	Quase impossível
Difícil de ser detectado em todos os estágios	Modo de falha e/ou causa não é fácil de ser detectada (ex auditorias amostrais e aleatórias)	9	Muito remoto
Detecção do problema após processamento ou etapa de processo	Detecção do Modo de falha após o processamento pelo operador através de meios como (visão/tato/audição)	8	Remoto
Detecção de problema na fonte	Detecção do modo de falha em estações cuja o operador utiliza visão, audição ou tato, ou após a montagem utiliza um dispositivo passa-não-passa manual, medição de torque manual, check)	7	Muito baixo
Detecção de problema após processamento ou etapa de processo	Detecção do modo de falha após processamento pelo operador com o uso pelo operador de medição de dados variáveis em dispositivo, ou na estação com uso de detecção por atributo utilizando ferramenta passa-não-passa, verificação de torque manual, check list, etc	6	Baixo
Detecção do problema na fonte	Modo de falha ou causa detectada na estação pelo operador através do uso de instrumento de medição por dados variáveis com controles automáticos que irão detectar um defeito e alertar o operador (luz, alarme, etc.). Medição realizada no setup ou verificação de primeira peça (aplica-se para o set-up apenas)	5	Moderado
Detecção do problema após o processamento ou etapa de processo	Detecção do modo de falha após o processamento por controles automatizados que irão detectar uma situação discrepante e segregar a peça para evitar que siga no processo produtivo.	4	Moderado alto
Detecção do problema na fonte	Detecção do modo de falha na estação com controles automatizados que irão detectar discrepâncias e automaticamente travar a peça na estação para prevenir o processamento	3	Alto
Detecção do erro e/ou prevenção do problema	Falha (causa) detectada na estação por controles automatizados que irão detectar o erro e prevenir que discrepâncias ocorram na peça.	2	Muito alto
Detecção não aplicada. Prevenção do erro	Falha (causa) prevenida como resultado de design do fixture, máquina ou peça. Peças discrepantes não podem ser feitas pois um dispositivo a prova de erro foi implementado.	1	Quase certo

Fonte: Adaptado de Chrysler LLC (2008).

3.2.5 Determinação do NPR (Número de Prioridade de Risco)

Por fim, a equipe procede para a determinação do Nível de Risco (NPR) de cada processo, baseando-se nos graus evidenciados na tabela 6. A proposta é estabelecer NPRs de forma que os modos de falha pudessem ser priorizados a quais seriam mais impactantes ao se concentrar nas ações para reduzir o risco associado a cada falha.

Tabela 6 - Grau de Índice de Número de Prioridade de Risco (NPR)

Número de Prioridade de Risco (NPR)		
Classificação	Índice	Crítérios de classificação
Baixo Risco	$1 \leq \text{NPR} \leq 120$	Processo sem necessidade de tomada ação imediata no prazo recorrente (ação futura)
Risco Moderado	$120 \leq \text{NPR} \leq 360$	Processo vulnerável e requer ações corretivas e/ou preventivas a médio prazo
Alto Risco	$360 \leq \text{NPR}$	Requer parada imediata do fluxo de produção e exige um plano de ação corretivo

Fonte: Elaboração própria (2024).

A Tabela 6, foi elaborada em colaboração com a equipe do projeto de usinagem e o técnico mecânico envolvido no projeto, garantindo uma avaliação abrangente no contexto que será uma produção que se diversifica das industriais, por nesse caso, se tratar de uma manufatura realizado em uma instituição acadêmica, onde serão produzidas poucas unidades do dispositivo do projeto, o e-PTO.

3.2.6 Proposta de ações recomendadas

Depois que a avaliação de riscos e a estimativa do NPR (Número de Prioridade de Risco) são calculadas, a próxima etapa é sugerir todas as possíveis ações pelas quais os riscos podem ser minimizados. As ações que são aconselhadas incluem: prevenção total do tipo de falha, prevenção total da causa da falha, medidas que previnem a ocorrência da falha, e medidas que aumentam as chances de detecção do tipo ou da causa da falha.

Com as ações a serem realizadas, um plano de ação será desenvolvido utilizando as ferramentas PDCA, a fim de proporcionar melhoria contínua no decorrer dos processos de forma sistemática e eficiente.

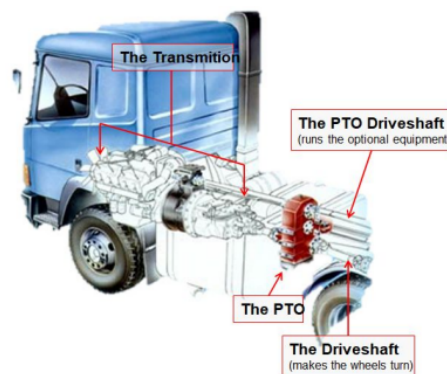
4 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO

Este capítulo abordará qual o projeto analisado e onde este trabalho foi realizado, evidenciando os sujeitos envolvidos e a organização do projeto.

4.1 O projeto

O projeto analisado consiste no desenvolvimento de uma TDP (Tomada de Potência), também conhecido internacionalmente como *PTO* (*Power Take Off*), a qual seria, de acordo com Araújo (2020), um dispositivo veicular que permite a transmissão de energia, por meio de um eixo rotacionado pelo motor de um veículo específico, para acionamento de implementos externos como guindastes, sistema de compactação de lixo e betoneiras, variando entre implementos de transmissão hidráulica ou mecânica. A Figura 10 ilustra de forma detalhada o sistema de transmissão de energia de um caminhão para uma PTO, evidenciando os principais componentes e o funcionamento desse processo.

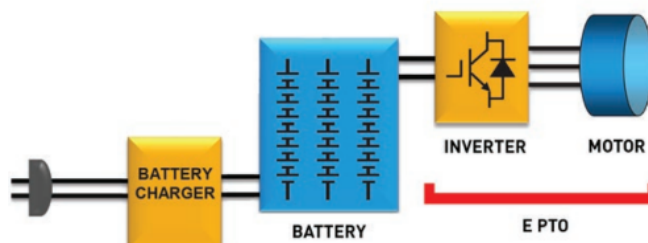
Figura 10 - Sistema de transmissão de um caminhão para uma PTO



Fonte: Verizon Connect (2024).

Entretanto, com a proposta de soluções sustentáveis, eficientes e a adoção de tecnologias inovadoras, o dispositivo PTO produzida neste projeto será destinado para veículos híbridos/elétricos, também conhecida como *ePTO* (*Electric Power Take Off*), a qual seria, de acordo com Joffrey (2021), um sistema composto de um inversor de frequência, dispositivo que gerencia a velocidade do motor por meio da variação da frequência da corrente elétrica e tensão fornecida ao motor, e um motor elétrico alimentado por um banco de baterias (Fonte de energia CC), como evidenciado na Figura 11, ilustrando a representação bateria do sistema sendo recarregada.

Figura 11 - Fluxo de funcionamento de uma e-PTO



Fonte: Joffrey (2021).

4.2 Estrutura e recursos do projeto

O projeto desenvolvido consiste em uma parceria entre uma empresa privada, que terá seu nome mantido em sigilo, e o projeto de pesquisa de Eletrificação de Sistemas Hidráulicos Embarcados em Veículos de Utilidades do Departamento Metal Mecânico (DAMM) do Instituto Federal de Santa Catarina, financiado pela instituição EMBRAPPII (Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial).

O projeto do protótipo da *ePTO* tem como autoria a empresa colaboradora, a qual é especializada em desenvolvimento de projetos de integração de *hardware* e *software* no setor de mobilidade elétrica automotiva. O sistema projetado, terá como componentes: um motor elétrico de ímã permanente, estrutura do banco de baterias, um inversor de frequência e uma interface hidráulica como saída da tomada de força.

A bolsa de pesquisa de Eletrificação de Sistemas Hidráulicos Embarcados em Veículos de Utilidades teve como recursos físico disponível o laboratório de Máquinas Operatrizes (MOP), que conta com equipamentos de usinagem como tornos convencionais, fresadoras, máquinas de eletroerosão a fio, centro de usinagem CNC ROMI D600 e o centro de torneamento GL240. Já para os recursos humanos, a bolsa tem como participantes pesquisadores e técnicos em mecânica e hidráulica, e bolsistas. Os integrantes têm como compromisso a utilização de 20 horas semanais para atuação de suas tarefas específicas e realização de reuniões para revisar e estabelecer o planejamento de atividades.

Figura 12 - Laboratório de Máquinas Operatrizes (MOP)



Fonte: Elaboração própria (2024).

A fabricação dos componentes foi de responsabilidade tanto da bolsa de pesquisa quanto de empresas terceirizadas contratadas pela empresa parceira. Dessa forma, ressalta-se que todos os processos analisados neste estudo de caso abordam apenas a fabricação de componentes do motor elétrico realizado pelo projeto de pesquisa.

Tabela 7 – Componentes a ser fabricados

Projeto	Componente
Bateria	Suporte de fixação DE
Bateria	Suporte de fixação DD
Bateria	Suporte de fixação TE
Bateria	Suporte de fixação TE
Bateria	Suporte de fixação TD
Motor	Rotor
Motor	Eixo
Motor	Suporte do rotor
Motor	Estator
Peças de montagem para motor	Dente guia do estator
Peças de montagem para motor	Cilindro guia do estator
Peças de montagem para motor	Chapa guia do estator
Motor	Jaqueta interna
Motor	Jaqueta externa
Motor	Chaveta
Motor	Tampa dos conectores
Motor	Suporte do estator
Motor	Caixa de passagem
Motor	Flange hidráulica
Motor	Flange de fixação do encoder
Inversor	Estrutura
Flange IN	Flange IN
Flange OUT	Flange OUT

Fonte: Elaboração própria (2024).

5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo descreve a fabricação das peças do motor elétrico e a implementação dos processos metodológicos. A análise e a proposta de planos de ação foram implementadas em quatro componentes críticos do projeto: Eixo do Motor, Caixa de Passagem, Flange do Motor e Flange de Fixação do Encoder.

Para cada tópico referente a um componente específico, haverá uma descrição de sua funcionalidade e um breve relatório sobre os processos de execução, alinhado com os empecilhos relatados pelos participantes do projeto. Por fim, será apresentada a implementação da ferramenta FMEA, evidenciada por quatro seções da planilha elaborada, anexada no apêndice do respectivo componente.

Cada uma das seções evidenciadas a seguir, exemplificado na Figura 13, seguirá uma explicação dos pontos críticos da tabela de FMEA de cada componente, em que as seções I e III explicitam os modos, efeitos e causas de falhas nos processos, enquanto as seções II e IV tratam de seus respectivos graus de severidade, ocorrência, detecção, NPR e das propostas de ações sugeridas para cada operação relacionada em sua seção par, conforme evidenciado na figura abaixo.

Figura 13 - Mapeamento das seções da tabela FMEA

Operação/Processo	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	RPN (S x O x D)	Ações Sugeridas
Usinagem das Flanges - Manual	Erro de usinagem manual	Redução técnica insuficiente	Desvios dimensionais	3	1	5 possível comparar as medidas finais com o desenho	200	Implementar treinamento técnico Estabelecer supervisão contínua Verificar configurações das máquinas
Usinagem das Flanges - CNC	Falha de programação	Produção de peça fora da especificação	Produção de peça fora da especificação	3	0	0	100	Revisar rotinas de programação Implementar procedimento rigoroso de setup Calibrar regularmente as máquinas
Função das Flanges - Posição	Função fora de posição	Uso de ferramentas desgastadas	Parafusos incorretos	7	7	6 só na montagem	200	Treinamento em leitura de desenhos técnicos Substituição preventiva de ferramentas Uso de sistemas de centralização automática
Função das Flanges - Diâmetro	Função com diâmetro incorreto	Seleção incorreta de brocas	Problemas de usinagem	7	4 acurados, poucos visíveis	5	200	Implementar checklist de verificação de ferramentas Manutenção preventiva das brocas Verificação detalhada da especificação
Controle de Qualidade - Função Incorreta	Função incorreta não detectada	Falha na inspeção manual	Peças repetidas	9	6	5	100	Processo de inspeção mais rigoroso Uso de equipamentos de medição precisos Treinamento em técnicas de inspeção
Controle de Qualidade - Alinhamento Incorreto	Função com alinhamento incorreto	Dependência de habilidades individuais	Necessidade de retificação complexa	3	4	5	200	Processo de alinhamento mais rigoroso Substituição de ferramentas desgastadas Verificar sistemas automatizados de verificação
Montagem das Flanges - Faltas Anteriores	Retrabalho decorrente de falhas anteriores	Defeito registrado no plano de controle	Parafusos desalinhados	3	3	3	100	Rastrear falhas de trabalho Gerar conformidade com especificações Estabelecer aprovação de cada etapa
Montagem das Flanges - Retrabalho Ineficiente	Retrabalho ineficiente ou inadequado	Falhas acumuladas no processo	Aumento dos custos	7	3 causas ocultas	4	100	Alocar recursos e tempo adequados Revisar procedimentos de retificação Estabelecer critérios claros para reuso de peças

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a descrição das análises de falhas identificadas para cada componente, é apresentado, de forma detalhada, um plano de ação PDCA com propostas para a melhoria contínua a serem implementadas nos processos.

5.1. Análise sobre: Caixa de Passagem

5.1.1 Caixa de Passagem: Funcionalidade

A caixa de passagem é o componente que abriga, protege e contém as conexões entre o motor e a rede de suprimento de energia. Ela fornece acesso aos fios para que a manutenção, inspeção e reparo possam ser realizados de maneira segura e eficaz. Além disso, essa peça também ajuda a proteger os componentes elétricos contra danos mecânicos, umidade, poeira e

outras impurezas que podem causar falhas no motor, evitando curto-circuitos e mantendo a integridade do sistema elétrico.

Figura 14 - Caixa de Passagem Finalizada



Fonte: Elaboração própria (2024).

5.1.2 Caixa de Passagem: Mapeamento de falhas

A produção da Caixa de Passagem enfrentou problemas técnicos, principalmente, em relação à compatibilidade do código da programação CNC, oferecida pela empresa privada, e o design de peça em relação ao centro de usinagem disponível. Desde a primeira tentativa de usinagem no centro de usinagem D600, conforme ilustrado na Figura 15, foram identificadas incompatibilidades de ferramentas do maquinário, com as ferramentas do código, e a inclusão de operações desnecessárias no programa CNC utilizado. Essas inadequações resultaram em erros durante a usinagem, prejudicando a operação pela necessidade de reajustes constantes.

Figura 15 - Primeira execução da peça base da Caixa de Passagem



Fonte: Elaboração própria (2024).

Além disso, falhas no sistema eletrônico de alarme do centro de usinagem ocasionaram interrupções abruptas, contribuindo para atrasos no processo produtivo. Após a retomada das produções, obteve-se sucesso na execução completa de um dos lados do

componente. Contudo, a usinagem do segundo lado apresentou novos desafios, exigindo revisão e ajustes no código de usinagem via software de manufatura assistida *SprutCam*. Foram necessárias correções no referenciamento G55 do código (zeramento dos eixos fora do zero fixo) e modificações no mapeamento das ferramentas utilizadas do código de usinagem de seu segundo lado, evidenciando falhas de revisão do código CNC pela empresa privada.

Durante a usinagem do segundo lado, ocorreu uma falha crítica: a peça quebrou, resultando em perda total, como mostrado na Figura 17. A fixação inadequada, realizada com seis parafusos em uma placa de suporte que não proporcionou estabilidade suficiente, devido a alta vibração durante a usinagem, levou ao colapso estrutural da peça, quebrando metade do arco lateral.

Figura 17 - Caixa de passagem danificada



Fonte: Elaboração própria (2024).

A necessidade de desenvolver uma chapa de suporte específica surgiu da falta de referências adequadas e da complexidade geométrica da peça. O posicionamento inicial não foi ideal, causando colisões com os limites do centro de usinagem e exigindo edições no programa CNC. Essas falhas indicam deficiências na preparação e planejamento do processo, além de problemas na comunicação entre a equipe de programação e a operação de usinagem.

Após a fabricação de um novo suporte e com ajustes efetivos do código CNC pelo técnico mecânico, a usinagem da Caixa de Passagem foi finalmente concluída. No entanto, ainda eram necessários ajustes finais e a realização de rosqueamento. Os bolsistas do projeto, responsáveis por essa etapa, enfrentaram dificuldades na fixação e centralização da peça na placa de quatro castanhas do torno convencional. A utilização do relógio comparador para garantir a precisão foi dificultosa pela incompatibilidade entre a geometria da peça e o equipamento disponível, resultando em novos atrasos.

Esses problemas ressaltam a importância de uma preparação sólida, incluindo revisão de compatibilidades do código CNC com o maquinário e ferramentas disponibilizados, bem como o treinamento técnico apropriado para a equipe envolvida. Ficou evidente durante as produções a necessidade de definir claramente as responsabilidades, especialmente no que diz respeito à programação CAM. É fundamental que o programador CAM seja responsável pela elaboração e revisão corretas do código de usinagem, garantindo a consistência com as ferramentas e referências do centro de usinagem, evitando sobrecarregar o técnico mecânico com ajustes constantes.

Em síntese, as falhas no processo de fabricação da Caixa de Passagem resultaram de uma combinação de inadequações na programação CNC, seleção incorreta de ferramentas, deficiências na fixação e estabilidade da peça, além de problemas organizacionais e de

comunicação. A análise dessas falhas evidencia a necessidade de melhorias significativas nos processos de planejamento, programação, treinamento e coordenação da equipe, visando otimizar a produção e assegurar a qualidade do componente final.

5.1.1 Caixa de Passagem: Plano de Ação

Com base nos dados da manufatura da Caixa de Passagem, este tópico aborda as principais falhas identificadas ao longo do processo de produção, com foco nos modos de falha críticos destacados no relatório anterior. Na Tabela 8, são detalhados os quatro processos críticos e seus respectivos modos de falha, efeitos da falha e suas causas, de acordo com a planilha FMEA da Caixa de Passagem, anexada no Apêndice 1.

Tabela 8 - Seção I do FMEA da Caixa de Passagem

Processo/Operação	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Fixação da Peça para Usinagem	Desprendimento da peça durante a usinagem	Quebra da peça, resultando em perda total Atraso significativo na produção Necessidade de retrabalho completo	Fixação inadequada com seis parafusos Vibração excessiva durante a usinagem Chapa de suporte insuficiente para estabilizar a peça
Manutenção e Verificação do Centro de Usinagem	Falha eletrônica no Centro de Usinagem	Parada abrupta do processo Atraso na entrega do componente Potencial dano ao CNC ou à peça	Falhas no sistema eletrônico de alarme do D600 Sobrecarga ou falha elétrica Manutenção preventiva inadequada do D600
Planejamento e Preparação do Corte	Geometria inadequada e corte do tarugo	Corte impreciso, resultando em tarugo fora das especificações Dificuldade em alcançar as dimensões requisitadas Necessidades de retrabalhos	Geometria complexa da peça Limitações das serras disponíveis Falta de planejamento detalhado do corte inicial
Programação CNC	Programação CNC inadequada	Necessidade de reajustes constantes Impossibilidade de alcançar as tolerâncias necessárias Atraso na produção e entrega da peça final	Código CNC com operações desnecessárias ou incorretas Referências incorretas no software CAM

Fonte: Elaboração própria (2024).

De acordo com os processos e seus respectivos detalhamento de falhas evidenciados na seção I, na seção II, é explicitado a pontuação definida, de acordo com os integrantes do trabalho, para o grau de severidade, probabilidade de detecção, ocorrência, NPR e as ações sugeridas para cada processo, respectivamente, da seção I.

Tabela 9 - Seção II do FMEA da Caixa de Passagem

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Sugeridas
10	7	8	560	Reforçar a fixação com parafusos adicionais ou pontos de ancoragem Desenvolver uma chapa de suporte mais robusta
8	6	5	200	Implementar um programa de manutenção preventiva Monitorar regularmente o sistema eletrônico do CNC para detectar problemas antes que causem falhas Estabelecer um plano de contingência para falhas no CNC
8	7	4	224	Realizar um planejamento das etapas antes de iniciar a usinagem Considerar a aquisição de serras mais adequadas para a geometria da peça Ajustar o design da peça para facilitar o corte inicial
9	8	5	360	Revisar e otimizar o código CNC para eliminar operações desnecessárias e corrigir erros Verificar e ajustar as referências no CAM antes de iniciar a usinagem

Fonte: Elaboração própria (2024).

Na seção seguinte, é assentado os processos críticos restantes e seus respectivos modos de falha, efeitos da falha e suas causas, de acordo com a planilha FMEA da Caixa de Passagem.

Tabela 10 - Seção III do FMEA da Caixa de Passagem

Processo/Operação	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Calibração do Relógio Comparador	Erro de medição com relógio comparador	Dificuldade em zerar a peça, levando a imprecisões Dificuldade de alcançar as tolerâncias exigidas Necessidade de retrabalho, atrasando a produção.	Incompatibilidade da geometria da peça com o maquinário Fixação inadequada durante a medição Falta de experiência ou treinamento dos operadores.
Verificação da Integridade da Peça	Quebra da peça durante a usinagem	Perda total do componente Necessidade de refazer a peça, aumentando custos e tempo de produção Atraso significativo no cronograma de produção	Folga nos parafusos de fixação Vibração excessiva durante a usinagem Posicionamento inadequado da peça no centro de usinagem

Fonte: Elaboração própria (2024).

De acordo com os processos e seus respectivos detalhamento de falhas evidenciados na seção III, na seção IV, é explicitado a pontuação definida, de acordo com os integrantes do trabalho, para o grau de severidade, probabilidade de detecção, ocorrência, NPR e as ações sugeridas para cada processo, respectivamente, da seção III.

Tabela 11 - Seção IV do FMEA da Caixa de Passagem

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Sugeridas
8	8	6	384	Utilizar um relógio comparador compatível geometria da peça Revisar da fixação antes de iniciar para garantir a estabilidade Treinar os operadores para melhorar a precisão das medições
10	6	4	240	Garantir que todos os parafusos estejam devidamente apertados antes de iniciar a usinagem Reduzir a vibração ajustando a programação CNC Melhorar o posicionamento inicial da peça no centro de usinagem para evitar colisões

Fonte: Elaboração própria (2024).

Com base nos dados determinados do FMEA elaborada, que apresentou as falhas e as correspondentes ações recomendadas para cada etapa, o ciclo PDCA pode ser programado para a implementação apropriada das ações sugeridas alinhadas de melhoria contínua. A primeira etapa do ciclo PDCA é o Planejamento (Plan), que determina qual o plano de garantia de qualidade para a correção dos modos de falha identificados e aprimoramento da confiabilidade dos processos da Caixa de Passagem. Todos estes detalhes são descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Etapa de Planejamento do PDCA para a Caixa de Passagem

Plan (Planejamento)		
Análise Técnica e Requisitos do Componente	Identificação e Mitigação de Riscos	Treinamento e Capacitação da Equipe
Especificações Técnicas: - Revisar detalhadamente as especificações da Caixa de Passagem, garantindo que todas as dimensões críticas, tolerâncias e materiais estejam de acordo com o requisitado. - Identificar os principais pontos críticos do componente, como áreas de conexão elétrica e regiões que exigem proteção contra umidade e poeira, priorizando a qualidade da sua funcionalidade.	Problemas de Fixação: Analisar as posições de fixação da Caixa de Passagem e avaliar uma mudança de fixação que reduza as vibrações e proporciona estabilidade à peça, por meio do uso de uma chapa de suporte mais espessa.	Treinamento em Fixação e Usinagem: - Ofertar treinamento para os integrantes da equipe para aprimoramento de técnicas de fixação e usinagem. - Ofertar treinamento a equipe para revisão e aprimoramento de habilidades com relógio comparador, técnicas de centralização, para aprimorar com as necessidades da peça.
Ferramentas e Equipamentos: - Verificar a adequação das ferramentas, equipamentos existentes e o ferramentário do D600, para atender adequadamente à usinagem da Caixa de Engrenagens. Verifique a possibilidade de obter ou modificar outras ferramentas e máquinas que possam ajudar a melhorar a precisão e estabilidade. - Verificar a condição, calibração e adequação das ferramentas de corte e medição existentes.	Falhas Eletrônicas no CNC: Realizar um regime de manutenção preventiva no CNC D600 para garantir a operação eficiente do sistema eletrônico, a fim de reduzir os riscos de uma potencial falha que poderia parar o fluxo de produção.	Treinamento em Programação CNC: Fornecer treinamento aos técnicos e bolsistas de utilização de softwares CAM, para compreensão das alterações necessárias em relação a processos e referenciamento.
Programação CNC: - Revisão e otimização do código de usinagem na CAM, livrando-se de operações redundantes e reajustes de referenciamento G55, para que o lado oposto da peça possa ser fabricado com eficiência. - Mapear em detalhes o uso da ferramenta na manufatura, incluindo a seleção de ferramentas cuja geometria e material sejam compatíveis com a peça	Geometria Complexa e Corte do Tarugo: - Projetar a estratégia do primeiro corte do tarugo considerando a geometria complexa do componente, selecionando as máquinas corretas e os melhores parâmetros de corte para evitar quaisquer problemas relativos à precisão	

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a etapa de planejamento, é determinada a tabela de Execução (Do), onde é executado as ações esperadas de acordo com o plano de garantia determinado na etapa de planejamento, onde são detalhadas as operações de usinagens do componente e a implementação de monitoramento contínuo para verificação da estabilidade da peça durante estes processos e, caso necessário, realizar ajustes dos parâmetros de corte conforme o necessário, para desta forma, desempenhar melhoria contínua nos procedimentos, em conjunto com o cumprimento de padrões que preservem a qualidade dos processos. Estes detalhamentos desta etapa são descritos nos dados da tabela seguinte.

Tabela 14 - Etapa de Execução do PDCA para a Caixa de Passagem

Do (Execução)	
Início da Usinagem	Manejo de Problemas em Tempo Real
Primeiro Lado da Peça: - Monitorar o processo de usinagem em tempo real, verificando a estabilidade da peça e ajustando os parâmetros de corte conforme necessário para minimizar vibrações.	Quebra da Peça: - Em caso de quebra da peça durante a usinagem, a operação deve ser interrompida imediatamente e a origem da quebra, como fixação, programação CNC e operação da máquina, deve ser investigada. - Responder com ação corretiva imediata, como reforço na fixação ou ajustes no código CNC, caso necessário, e somente então retomar a usinagem.
Revisão do Código CNC: Antes de começar o lado oposto, deve-se revisar o código CNC atualizado no CAM. Certificar-se de que todas as operações estejam devidamente otimizadas e o referenciamento G55 esteja devidamente corrigido.	Falhas no CNC: No caso de falhas durante os processos, seguir o plano de contingência determinado, caso necessário, realize as operações de forma manuais convencionais ou, se possível, transfira a operação para um centro de usinagem alternativo.
Controle de Qualidade em Tempo Real: - Realizar verificações em tempos estabelecidos com o relógio comparador, para garantir a precisão das dimensões. - Anotar todas as medições e ajustes efetuados para assegurar que peças futuras atinjam os requisitos técnicos de acordo com o necessário.	

Fonte: Elaboração própria (2024).

Para garantir que os trabalhos estão sendo efetuados nos devidos padrões do planejamento inicial, é determinada a etapa de Verificação (Check), evidenciado na tabela a seguir, tem como foco o monitoramento e avaliação da eficiência dos serviços realizados na etapa de execução, supervisionando os resultados das usinagens para sustentar que todos os parâmetros e especificações propostas foram atendidas, verificando se os resultados de dimensionamento se enquadram nas tolerâncias estabelecidas e, caso qualquer desvio do padrão for detectado, como quebras, vibrações anormais durante operações ou dimensionamento impreciso nos resultados, deve ser realizado registros para, posteriormente, ser realizado análises críticas para reavaliar as soluções propostas na etapa de Planejamento,

sendo uma etapa essencial para planejamento de ações corretivas e preventivas e propor possíveis otimizações adicionais na etapa posterior.

Tabela 15 - Etapa de Verificação do PDCA para a Caixa de Passagem

Check (Verificação)	
Avaliação Pós-Usinagem	Documentação e Relatório de Falhas
Revisão de Dimensões e Tolerâncias: - Após a conclusão das usinagens Caixa de Passagem, realizar medição de todas as dimensões de acordo com as tolerâncias. - Avaliar se as medições estão de acordo com as especificações técnicas para garantir que a peça esteja dentro dos padrões estabelecidos.	Registro de Desvios: - Registrar quaisquer desvios do padrão encontrado durante o processo de usinagem, como quebras, vibrações anormais e dimensões imprecisas. - Estruturar um relatório em detalhes descrevendo as razões para as falhas identificadas e, caso necessário, implementar um FMEA com propostas de ações corretivas.
Análise da Estabilidade e Integridade da Peça: - Inspecionar se a peça sofreu qualquer tipo de deformação, rachaduras ou foi danificada de outra forma durante o processo de usinagem. Se a peça foi danificada, deve-se realizar os devidos retrabalhos.	Feedback e Revisão do Processo: - Realize uma reunião de revisão com a equipe para comentar os resultados da usinagem e lições aprendidas, bem como os pontos melhorias a serem implementadas em trabalhos futuros.
Avaliação da Fixação e do Suporte: - Verificar a eficácia da chapa de suporte para, caso utilizar, deve-se analisar quais pontos de fixação podem ter sido insuficientes para atuar em suas melhorias.	

Fonte: Elaboração própria (2024).

No tópico a seguir, abordaremos a etapa final do ciclo PDCA, a etapa de Ação (Act), onde são utilizadas todas as avaliações e análises registradas na etapa de Verificação, para reestruturar os processos em prol da melhoria contínua. Nesta parte do ciclo, a equipe deve realizar os ajustes e otimizações de acordo com os *feedbacks* e dados coletados, como efetuar a revisão do código CNC para verificar se possui usinagens desnecessárias ou se certo parâmetro não está de acordo, deve-se executar os devidos ajustes na fixação caso tenha sido verificado instabilidade na realização da manufatura, e por fim, avaliar e, caso necessário, concretizar treinamentos técnicos adicionais para desenvolvimento de habilidades práticas dos participantes, caso os erros persistam com frequência conforme o desenvolvimento das produções. Após a implementação de todas estas otimizações, deve ser monitorado sua evolução, para assim, fechar o ciclo PDCA, estabelecendo sustentação para futuras iterações do ciclo.

Tabela 16 - Etapa de Ação do PDCA para a Caixa de Passagem

Act (Ação)	
Implementação de Melhorias	Treinamento Contínuo
Correções Imediatas: - Se ocorrerem falhas na etapa de verificação, faça correções imediatas no processo, como ajustes na fixação, otimização/revisão do código CNC ou troca de ferramentas. - As correções devem ser documentadas e compartilhadas com a equipe para que os erros não ocorram novamente.	Treinamento Adicional: - Treinar continuamente os funcionários sobre as mais recentes técnicas de usinagem e programação CNC de nível avançado. Mostrar a importância da precisão e da estabilidade no processo de manufatura.
Melhorias a longo prazo: - As melhores práticas implementadas durante o ciclo de PDCA são padronizadas no manual de produção, padronizando o processo de tal forma que ele seja eficiente e garanta qualidade em futuras produções. - Estabelecer um plano de manutenção preventiva para a máquina CNC e suas ferramentas, para que estejam sempre em suas melhores condições para a usinagem.	Melhorias de Ferramentas e Software: - Atualizar, conforme necessário, o software CAM utilizado e as ferramentas em uso, implementando atualizações ou adquirindo novos equipamentos conforme necessário para manter a competitividade e a qualidade do processo de usinagem.

Fonte: Elaboração própria (2024).

5.2 Análise sobre: Eixo do Motor

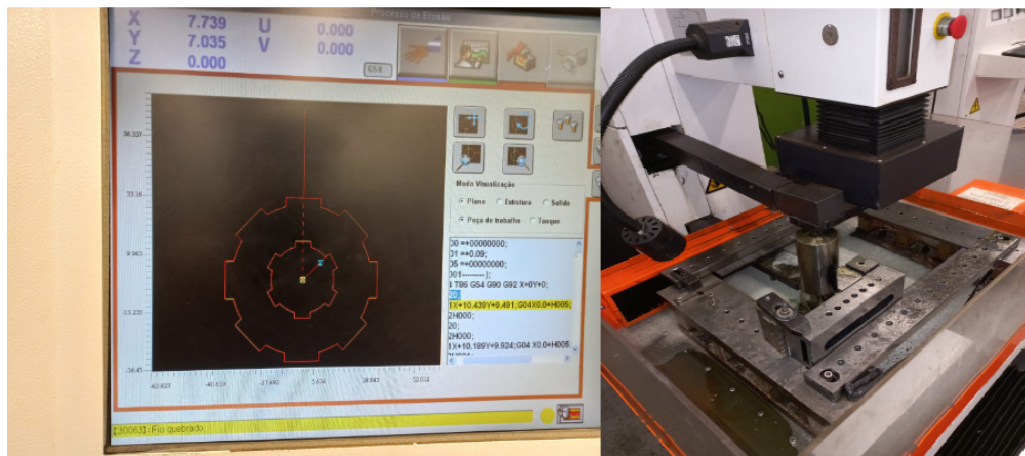
5.2.1 Eixo do Motor: Funcionalidade

O Eixo do Motor é o componente central que transmite a potência mecânica gerada pelo motor elétrico para outros elementos do sistema, como o rotor ou a carga final. Sua função principal é converter a energia elétrica em movimento rotacional, garantindo que a força seja transferida de maneira eficiente e precisa. A integridade do eixo é fundamental, pois qualquer deformação, desalinhamento ou falha pode resultar em vibrações, perda de eficiência, ou até falha completa do sistema. Portanto, a precisão na fabricação e a robustez do eixo são essenciais para a confiabilidade e o desempenho geral do motor elétrico.

5.2.2 Eixo do Motor: Mapeamento de falhas

A produção do Eixo do Motor enfrentou dificuldades técnicas que comprometeram a precisão de dimensionamento e a funcionalidade do componente. Inicialmente, a usinagem por eletroerosão executou primeiramente seu canelado externo e interno, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Programação da Eletroerosão e o maquinário usinando



Fonte: Elaboração própria (2024).

Durante o segundo corte por eletroerosão, ocorreu o rompimento do fio, impactando negativamente a operação. Além disso, a liberação de tensões internas na peça durante o corte provocou deformações na geometria, especialmente no lado fixo ao suporte, oposto ao corte. Essa deformação exigiu o uso de um sargento para minimizar os efeitos adversos. Mesmo com verificações para assegurar que as dimensões permaneciam dentro das tolerâncias requeridas, o canelado interno e externo do eixo foi finalizado, conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Primeira etapa do Eixo do Motor



Fonte: Elaboração própria (2024).

Entretanto, persistiram problemas significativos. O diâmetro do canelado interno foi medido como excessivamente grande, impossibilitando o uso das contrapontas padrão do torno. Foi necessário utilizar contrapontas de tubos, que, apesar de funcionarem, introduziram leves erros de precisão devido à sua mobilidade em comparação com contrapontas fixas. Além disso, a repetição do corte por eletroerosão, causada pelo rompimento anterior do fio, gerou um desvio de concentricidade no eixo. Esse desvio, resultante de um batimento na peça onde o corte usinou mais de um lado que do outro, comprometeu totalmente a precisão e as especificações exigidas para o componente.

Durante os ajustes posteriores no torno convencional, ocorreu uma danificação no canelado externo devido a uma medição incorreta com o paquímetro digital. Esse erro levou à conclusão de que aquela tentativa de produção do eixo seria adequada apenas para testes futuros, não atendendo aos padrões necessários para a aplicação final.

Em uma nova tentativa de usinagem por eletroerosão, um problema adicional foi observado: uma possível folga no fuso da máquina resultou em danos ao canelado externo, prejudicando tanto a estética quanto a funcionalidade da peça, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Segunda tentativa com falha do Eixo do Motor



Fonte: Elaboração própria (2024).

Diante desses desafios, considerou-se a produção de um novo eixo e a possibilidade de alterar a sequência de usinagem para minimizar erros. A investigação de diferentes métodos de centragem e a modificação do diâmetro do canelado interno também foram propostas, desde que não comprometessem o torque do motor. Essa alteração facilitaria o uso das contrapontas padrão do torno, evitando o desbalanceamento e melhorando a precisão.

A equipe de usinagem identificou ainda inconsistências nos desenhos técnicos fornecidos pela empresa parceira. As medidas do eixo eram referenciadas a partir do centro, complicando o processo e exigindo cálculos adicionais. Recomendaram-se pontos de referência alternativos, incluindo o tamanho total da peça e distâncias entre as faces, bem como a inclusão das tolerâncias dos rolamentos do maquinário (classe 6H). Essas mudanças visavam evitar interrupções desnecessárias para cálculos de dimensionamento e tornar a produção mais eficiente e menos propensa a erros.

Apesar das sugestões e esforços para solucionar os problemas, a complexidade técnica e a falta de equipamentos adequados levaram à decisão de terceirizar a produção do eixo e de outros componentes. Essa medida visou garantir que as tolerâncias e especificações exigidas fossem atendidas, assegurando a qualidade necessária para o funcionamento adequado do motor.

Este caso evidenciou a necessidade de ferramentas e máquinas de maior precisão, bem como técnicas avançadas de usinagem para a fabricação do Eixo do Motor. Além disso, ressaltou a importância de um controle de qualidade mais eficaz em todas as etapas do processo de manufatura e da comunicação eficiente entre a equipe de produção e o projeto. A harmonização das informações técnicas e a resolução de inconsistências nos desenhos são essenciais para evitar retrabalhos e garantir a conformidade dos componentes críticos com os padrões exigidos.

5.2.3 Eixo do Motor: Plano de Ação

Com base nos dados da manufatura do Eixo do Motor, este tópico aborda as principais falhas identificadas ao longo do processo de produção, com foco nos modos de falha críticos destacados no relatório anterior. Na Tabela 17, são detalhadas as quatro primeiras operações críticas e seus respectivos modos de falha, efeitos da falha e suas causas, de acordo com a planilha FMEA do Eixo do Motor, anexada no Apêndice 2.

Tabela 17 - Seção I do FMEA do Eixo do Motor

Operações	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Eletroerosão	Rompimento do fio durante a eletroerosão	Interrupção do processo e deformação da peça devido à liberação de tensões internas.	Tensões internas na peça, sobrecarga do fio de eletroerosão.
Usinagem	Desalinhamento do eixo	Batimento e falta de concentricidade, comprometendo a funcionalidade e precisão do eixo.	Deformação durante a usinagem, uso de contra ponto inadequado
Medição	Danos no canelado externo	Comprometimento da funcionalidade do eixo, inviabilizando seu uso em aplicações finais.	Erro de medição com paquímetro, folga na máquina durante a eletroerosão.
Eletroerosão	Desgaste prematuro do canelado interno	Redução da vida útil do eixo, comprometendo o desempenho do motor.	Desgaste irregular causado por usinagem incorreta, erro na programação.

Fonte: Elaboração própria (2024).

De acordo com os processos e seus respectivos detalhamento de falhas evidenciados na seção I, na seção II, é explicitado a pontuação definida, de acordo com os integrantes do trabalho, para o grau de severidade, a probabilidade de detecção, o índice de ocorrências, o devido cálculo do NPR (Número de Prioridade de Risco) e as ações sugeridas para cada processo analisado, respectivamente, da seção I.

Tabela 18 - Seção II do FMEA do Eixo do Motor

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Sugeridas
8	3	7	336	Reprogramar o código para reduzir a carga no fio, realizar cortes menores inicialmente, revisar o processo de fixação.
8	7	6	270	Usar contrapontas adequado para grandes diâmetros, realizar medições frequentes de concentricidade
7	5	5	200	Calibrar e verificar instrumentos de medição antes do uso, inspecionar a máquina de eletroerosão para eliminar folgas.
7	3	5	252	Revisar a programação CNC, garantir que o processo de usinagem siga as especificações corretas.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Na seção seguinte, é assentado os processos críticos restantes e seus respectivos modos, efeitos e causas de falha, conforme os dados da planilha FMEA da Caixa de Passagem.

Tabela 19 - Seção III do FMEA do Eixo do Motor

Operações	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Usinagem	Deformação	A peça perde sua forma original, afetando a funcionalidade e precisão final.	Fixação inadequada que não absorve as tensões internas durante o corte.
Programação CNC	Erro na programação CNC	Resulta em usinagem imprecisa, necessidade de retrabalho, e comprometimento das especificações da peça.	Código de programação incorreto ou não compatível com as ferramentas disponíveis.
Monitoramento	Falha na detecção de erro de usinagem	Produção de peças defeituosas que não atendem às especificações, resultando em desperdício de material.	Falta de monitoramento contínuo durante a usinagem, ausência de inspeções intermediárias.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Segundo os processos e seus respectivos detalhamento de falhas evidenciados na seção III, na seção IV, é explicitado a pontuação definida, baseado no consenso com os integrantes

do trabalho de usinagem, para o grau de severidade, probabilidade de detecção, ocorrência, NPR (Número de Prioridade de Risco) e as ações sugeridas para cada processo, respectivamente, da seção III.

Tabela 20 - Seção IV do FMEA do Eixo do Motor

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR (S x O x D)	Ações Sugeridas
9	7	5	224	Desenvolver e testar novos métodos de fixação, como o uso de suportes adicionais ou fixações mais robustas.
9	6	7	280	- Verificar a compatibilidade do código com as ferramentas disponíveis -Realizar simulações prévias para validar o programa.
6	7	6	224	Implementar um sistema de controle de qualidade com inspeções regulares durante a usinagem.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Com base nos dados determinados do FMEA do Eixo do Motor, que apresentou as falhas e as correspondentes ações recomendadas para cada etapa, o ciclo PDCA pode ser programado para a implementação apropriada das ações sugeridas alinhadas de melhoria contínua. A primeira etapa do ciclo PDCA é o Planejamento (Plan), que determina qual o trabalho de qualidade a ser realizado através de um plano de garantia de qualidade para a correção dos modos de falha identificados e aprimoramento da confiabilidade dos processos do Eixo do Motor. No caso deste componente, a primeira etapa propõe a revisão de todas as especificações técnicas minuciosas da peça, incluindo quais as dimensões críticas, suas tolerâncias e quais os materiais adequados para que atendam a tais requisitos. Além destes objetivos, ainda estabelece uma rotina de inspeção da máquina de eletroerosão, para identificar possíveis falhas como folgas no fuso ou sobrecarga dos fios e a revisão dos código inserido no maquinário para otimizar os processos e evitar operações desnecessárias. Este planejamento, ainda, estabelece um fluxo de medições durante a usinagem, com equipamentos devidamente calibrados para garantia de precisão de cortes e conformidade da peça. Juntamente com estes planejamentos de estruturação das operações, são propostos a realização de treinamentos com foco em programação CNC e aprimoramento das habilidades de usinagem e fixação de peças, como pode ser visto na tabela a seguir.

Tabela 21 - Apresentação da etapa de Planejamento do PDCA para o Eixo do Motor

Plan (Planejamento)			
Revisão e Planejamento do Processo de Usinagem	Melhoria no Processo de Eletroerosão	Controle de Qualidade	Treinamento e Capacitação
Revisar os desenhos técnicos para garantir clareza nas dimensões e tolerâncias.	Inspecionar a máquina de eletroerosão e corrigir possíveis folgas no fuso.	Implementar medições precisas durante a usinagem, utilizando instrumentos devidamente calibrados.	Oferecer treinamento adicional à equipe sobre o uso correto dos equipamentos e técnicas de usinagem.
Desenvolver um plano detalhado de usinagem que considere todas as etapas, desde o corte inicial até a finalização do eixo.	Revisar e ajustar o código de programação para evitar os erros anteriores, incluindo a realização de cortes iniciais menores.	Realizar testes de concentricidade após a usinagem para garantir que o eixo esteja dentro das especificações.	Realizar simulações prévias de usinagem para identificar possíveis problemas e ajustes necessários.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a etapa de planejamento, é determinada a tabela de Execução (Do), onde é executado as ações esperadas de acordo com o plano de garantia estabelecido na etapa de planejamento, onde são detalhados que a equipe deve realizar as revisões e correções dos desenhos técnicos, verificando as medidas e tolerâncias. Em relação ao maquinário, deve-se realizar as inspeções e ajustes da máquina de eletroerosão, e a revisão dos códigos CNC contidos no mesmo. Além disso, é proposto que os operadores executem um controle de qualidade de medições e verificações nas operações, com cumprimento de padrões que preservem a qualidade dos processos, como é detalhado na tabela a seguir.

Tabela 22 - Apresentação da etapa de Execução do PDCA para o Eixo do Motor

Do (Execução)			
Revisão dos Desenhos e Planejamento	Verificação e Ajustes na Máquina de Eletroerosão	Implementação do Controle de Qualidade	Capacitação da Equipe
A equipe de engenharia revisa os desenhos técnicos, corrigindo inconsistências e garantindo que todas as medidas e tolerâncias sejam claras e precisas.	Realização de uma inspeção completa da máquina de eletroerosão, com foco na correção de folgas e no ajuste do código de programação.	Introdução de um sistema de medições regulares durante a usinagem, com verificações de concentricidade realizadas ao longo do process	Condução de sessões de treinamento específicas para a equipe de usinagem, com ênfase em técnicas avançadas de fixação e usinagem.
Criação de um plano de usinagem detalhado, incluindo a sequência de operações e as ferramentas necessárias.	Testes iniciais para validar o código de programação revisado.	Documentação de todos os dados de medição e ajustes realizados.	Execução de simulações usando software de manufatura assistida, com ajustes no código baseados nos resultados das simulações.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Para garantir que os trabalhos estão sendo efetuados nos devidos padrões do planejamento inicial, é determinada a etapa de Verificação (Check), onde a equipe realiza a verificação se sobre os resultados da usinagem, avaliando se as peças produzidas estão de acordo com o planejado conforme as medições e documentações realizadas. Ademais, é efetuada a avaliação da eficiência das parametrizações do maquinário e seu código. Caso a equipe tenha realizado treinamento conforme o planejamento, é coletado o *feedback* destas capacitações e é implementada uma análise da *performance* da equipe. Por fim, é estabelecido um controle de qualidade para verificar se os operadores estão realmente desempenhando o fluxo de operações de medições planejados, como pode ser visto na tabela a seguir.

Tabela 23 - Apresentação da etapa de Verificação do PDCA para o Eixo do Motor

Check (Verificação)		
Revisão do Processo de Usinagem	Análise das Melhorias Implementadas	Controle de Qualidade
Verificação se as peças produzidas estão dentro das especificações técnicas, conforme documentado nas medições realizadas.	Avaliação da eficácia dos ajustes feitos na máquina de eletroerosão e no código de programação.	Verificação da frequência e precisão das medições realizadas.
Comparação entre os resultados obtidos e os objetivos estabelecidos no plano.	Feedback da equipe sobre o treinamento recebido e a aplicabilidade das técnicas aprendidas.	Avaliação dos testes de concentricidade para determinar a necessidade de ajustes adicionais.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Na tabela seguinte, é abordado a fase de Ação (Act) do ciclo PDCA, que é a execução de ações corretivas ou preventivas para garantir que as soluções apropriadas sejam estabilizadas. O plano Act é definido na tabela seguinte, que resume o que é necessário para garantir que as melhorias realizadas no processo sejam estabilizadas.

Tabela 24 - Apresentação da etapa de de Ação do PDCA para o Eixo do Motor

Act (Ação)		
Correção de Desvios	Documentação e Padronização	Capacitação Contínua
Caso alguma falha ou desvio seja identificado, realizar ajustes imediatos no processo ou nas ferramentas utilizadas.	Documentar todo o processo, incluindo os resultados das medições, ajustes realizados, e as lições aprendidas.	Continuar o desenvolvimento e capacitação da equipe com base nas experiências adquiridas durante a produção do eixo.
Se necessário, revisar novamente os desenhos técnicos ou o código de programação.	Padronizar as melhores práticas identificadas para serem aplicadas em futuros projetos de usinagem.	Agendar treinamentos periódicos para manter a equipe atualizada sobre novas técnicas e tecnologias.

Fonte: Elaboração própria (2024).

5.3 Análise sobre: Flange Hidráulica

5.3.1 Flange Hidráulica: Funcionalidade

É o componente usado na montagem final para de conexão de fluidos, especificamente de fluidos refrigerantes, o qual estes líquidos estão circulando pelo sistema mantendo o motor adequadamente resfriado, evitando qualquer superaquecimento. A flange é projetada de tal maneira que pode tolerar a pressão do líquido e vedar corretamente, de modo que não haja vazamento que possa levar à falha do motor. A flange hidráulica deve ser usinada com a devida precisão para que o sistema de resfriamento seja bem vedado e o fluido refrigerante possa se mover ao longo do caminho sem qualquer obstrução ou bloqueio.

5.3.2 Flange Hidráulica: Mapeamento de falhas

A produção da Flange Hidráulica foi marcada por falhas relacionadas a usinagens incorretas a qual comprometeram o design e funcionalidade requisitada. Inicialmente, a usinagem das flanges foi realizada utilizando tornos convencionais e o centro de torneamento GL250. Até aquele momento, duas flanges foram usinadas manualmente e a terceira foi usinada na GL250, onde as manuais estão ilustradas na Figura 21.

Figura 21 - Flanges Hidráulicas Finalizadas



Fonte: Elaboração própria (2024).

O processo de furação, que deveria ser uma etapa simples e rotineira, tornou-se complexo devido a uma série de erros críticos. Os bolsistas responsáveis tinham como objetivo realizar duas furações de 4,5 mm de diâmetro em cada flange, utilizando uma fresadora universal disponível no laboratório. O primeiro problema surgiu da interpretação incorreta das cotas indicadas no desenho técnico, resultando no posicionamento errado das furações. Além disso, foram utilizadas ferramentas desgastadas, o que comprometeu a precisão das operações.

Durante o processo de centralização e referenciamento das peças, foi identificado um desvio angular no eixo do apalpador, ferramenta utilizada para referenciar as dimensões nas fresadoras. Com o apalpador danificado, os furos resultantes ficaram fora da posição correta e desalinhados na trajetória de furação. Reconhecendo o erro, o bolsista substituiu o apalpador por um em condições adequadas. Com a nova ferramenta, foi possível realizar as furações da última flange com sucesso, referenciando-se pelo centro do ressalto interno de diâmetro

menor. Para as duas flanges iniciais, como solução paliativa, foram adicionados mais dois furos em um plano a 90 graus em relação ao centro da peça, resultando em flanges com quatro furos em vez dos dois especificados.

Figura 22 - Erro de Furação das Flanges Hidráulicas



Fonte: Elaboração própria (2024).

Esses erros técnicos tiveram um impacto significativo na qualidade das peças. As furações incorretas prejudicaram a resistência estrutural, a estética e a funcionalidade das flanges na montagem final. As peças resultantes ficaram fora das tolerâncias técnicas e não atenderam às especificações do projeto, sendo consideradas inaceitáveis pela empresa parceira.

Figura 23 - Flanges Hidráulicas Refeitas



Fonte: Elaboração própria (2024).

Diante dessa situação, a equipe teve que refazer a produção das duas flanges comprometidas, seguindo estritamente as especificações do projeto, ilustradas na Figura 23. O retrabalho não apenas causou atrasos no cronograma, mas também evidenciou falhas nos sistemas de controle de qualidade e na capacitação técnica dos bolsistas. Foram identificados pontos críticos em todo o processo de medição, centralização e furação, indicando a necessidade de revisar e aprimorar o fluxo de produção dessa peça. Para evitar a recorrência desses erros, é essencial implementar medidas como treinamentos adicionais, melhoria na interpretação de desenhos técnicos e verificação das condições das ferramentas utilizadas.

5.3.3 Flange Hidráulica: Plano de Ação

Com base nos dados da manufatura da Flange Hidráulica, este tópico aborda as principais falhas identificadas ao longo do processo de produção, com foco nos modos de falha críticos destacados no relatório anterior. Na tabela a seguir, são detalhados as quatro primeiras operações críticas e seus respectivos modos de falha, efeitos da falha e suas causas, de acordo com a planilha FMEA da Flange Hidráulica, anexada no Apêndice 3.

Tabela 25 - Seção I do FMEA da Flange Hidráulica

Operação/Processo	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Usinagem das Flanges - Manual	Erros de usinagem manual	Desvios dimensionais Comprometimento da funcionalidade Aumento do retrabalho	Habilidade técnica insuficiente Falta de supervisão Configuração inadequada da máquina
Usinagem das Flanges - CNC	Erros de usinagem CNC	Produção de peças fora de especificação Desperdício de material Necessidade de retrabalho	Parâmetros de programação incorretos Falhas na preparação da peça Problemas de calibração
Furação das Flanges - Posição	Furação fora de posição	Furações incorretas Dificuldade de montagem Aumento do retrabalho	Interpretação incorreta das cotas Uso de ferramentas desgastadas Erros na centralização
Furação das Flanges - Diâmetro	Furação com diâmetro incorreto	Problemas de encaixe Dificuldade na montagem Aumento do retrabalho	Seleção incorreta de brocas Desgaste excessivo das brocas Leitura incorreta das cotas Erro de leitura na configuração

Fonte: Elaboração própria (2024).

De acordo com os processos e seus respectivos detalhamento de falhas evidenciados na seção I, na seção II, é explicitado a pontuação definida, de acordo com os integrantes do trabalho, para o grau de severidade, probabilidade de detecção, ocorrência, NPR e as ações sugeridas para cada processo, respectivamente, da seção I.

Tabela 26 - Seção II do FMEA da Flange Hidráulica

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações Sugeridas
8	7	8	448	- Implementar treinamento intensivo - Estabelecer supervisão contínua - Verificar configurações das máquinas
8	6	4	192	- Revisar rotinas de programação - Implementar procedimento de setup - Calibrar regularmente as máquinas
7	7	6	294	- Treinamento em leitura de desenhos técnicos - Substituição preventiva de ferramentas - Uso de sistemas de centralização automática
7	4	5	140	- Implementar checklists de verificação de ferramentas - Manutenção preventiva das brocas - Verificação detalhada das especificações

Fonte: Elaboração própria (2024).

Na seção seguinte, é assentado os processos críticos restantes e seus respectivos modos de falha, efeitos da falha e suas causas, de acordo com a planilha FMEA da Flange Hidráulica. Nesta seção, são abordados as análises de falhas em relação a casos de controle de qualidade das usinagens realizadas, como furações com posicionamentos ou alinhamentos incorretos, que podem levar a resultar em peças rejeitadas, o qual provoca uma ação em cadeia, de necessidade de retrabalhos de peças, ocasionando em atrasos nas entregas das mesmas. Aprofundando no caso dos retrabalhos, são analisados como eles são provocados pelas falhas acumuladas, provocadas por falta de capacitação técnica na realização das medições e do procedimento de usinagens, alinhados com a falta de ferramentas necessárias e a pressão de cumprimento de prazos.

Tabela 27 - Seção III do FMEA da Flange Hidráulica

Operação/Processo	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Controle de Qualidade	Furação incorreta não detectada	Peças rejeitadas Necessidade de retrabalho completo Atraso na entrega	Falha na inspeção intermediária Dependência de habilidades individuais Equipamentos de medição inadequados
	Furação com alinhamento incorreto	Furações desalinhadas Comprometimento estrutural Risco de falha na aplicação final	Desvio angular no eixo do apalpador Configuração inadequada da peça Falta de procedimentos claros de verificação

Fonte: Elaboração própria (2024).

De acordo com os processos e seus respectivos detalhamentos de falhas evidenciados na seção III, a seção IV detalha mais profundamente a pontuação definida pelos integrantes do trabalho. Esta pontuação é atribuída para avaliar o grau de severidade, a probabilidade de detecção, a ocorrência, o Número de Prioridade de Risco (NPR) e as ações sugeridas para cada processo descrito anteriormente na seção III.

Tabela 28 - Seção IV do FMEA da Flange Hidráulica

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	NPR	Ações Sugeridas
9	6	5	270	- Implementação de inspeções nos processos - Uso de equipamentos de medição precisos - Treinamento em técnicas de inspeção
8	4	5	160	- Revisar procedimentos de alinhamento - Substituição de ferramentas danificadas - Implementar sistemas automatizados de verificação

Fonte: Elaboração própria (2024).

Com base nos dados determinados do FMEA da Flange Hidráulica, o ciclo PDCA pode ser programado para a implementação apropriada das ações sugeridas alinhadas de melhoria contínua. A primeira etapa do ciclo PDCA é o Planejamento (Plan), que determina qual o trabalho a ser realizado através de um plano de garantia de qualidade para a correção dos modos de falha identificados e aprimoramento da confiabilidade dos processos da Flange Hidráulica.

Tabela 29 - Etapa de Planejamento do PDCA para a Flange Hidráulica

Plan (Planejamento)			
Análise Técnica e Planejamento Inicial	Planejamento do Processo de Usinagem	Controle de Qualidade Pré-Operacional	Capacitação da Equipe
Revisão dos Desenhos Técnicos Realizar uma revisão detalhada dos desenhos técnicos da Flange Hidráulica, assegurando que todas as cotas e especificações estejam claras e compreendidas por todos os envolvidos. Conferir as cotas críticas e as posições de furação para evitar interpretações erradas que possam comprometer o produto final.	Definição do Sequenciamento de Operações Estabelecer uma sequência de operações de usinagem que minimize os riscos de erros, iniciando com operações de fixação e centralização e terminando com as operações de furação. Desenvolver uma checklist para cada etapa do processo, garantindo que todas as condições estão adequadas antes de iniciar a operação subsequente.	Verificação de Ferramentas e Equipamentos Antes de iniciar qualquer operação, realizar uma inspeção final de todas as ferramentas e equipamentos, garantindo que estejam em condições ideais de uso. Implementar um sistema de dupla checagem para a leitura das cotas no desenho técnico e a configuração das máquinas, envolvendo mais de um membro da equipe para validação.	Implementar um programa de treinamento específico para os bolsistas, focando na leitura correta de desenhos técnicos, interpretação de cotas e manuseio de ferramentas de medição e usinagem. Realizar workshops práticos sobre o uso de fresadoras e a importância da centralização correta das peças durante a operação de furação."
Seleção e Inspeção de Ferramentas Realizar uma inspeção completa de todas as ferramentas a serem utilizadas, especialmente aquelas críticas para a operação, como fresadoras e apalpadores de arestas e substituir qualquer ferramenta que apresente desgaste ou desalinhamento. Verificar a condição do apalpador e garantir que seu eixo esteja em perfeitas condições, evitando desvios angulares que possam resultar em furações desalinhadas.	Programação CNC e Manual Revisar e otimizar a programação das máquinas CNC, garantindo que os parâmetros de corte, como velocidade e avanço, sejam adequados ao material e à operação específica. Garantir que as operações manuais, como a usinagem em torno convencional ou fresadoras, sejam realizadas de acordo com os padrões estabelecidos, evitando improvisações que possam comprometer a qualidade das peças.		

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a etapa de planejamento, é determinada a tabela de Execução (Do), onde é executado as ações esperadas de acordo com o plano de garantia determinado no planejamento de melhoria contínua, em conjunto com cumprimento de padrões que preservem a qualidade dos processos, que é evidenciado na tabela seguinte.

Tabela 30 - Etapa de Execução do PDCA para a Flange Hidráulica

Do (Execução)	
Usinagem Inicial	Furação das Flanges
Operação de Faceamento e Desbaste - Realizar as operações iniciais de faceamento e desbaste no torno convencional, garantindo que as superfícies das flanges estejam niveladas e dentro das especificações. - Monitorar continuamente a operação para detectar qualquer sinal de vibração ou desalinhamento que possa comprometer a qualidade da peça.	Configuração da Fresadora - Configurar a fresadora de acordo com as especificações do projeto, garantindo que a ferramenta de furação esteja calibrada e alinhada corretamente. - Realizar uma furação de teste em uma peça de sucata para validar a configuração antes de iniciar a furação das flanges.
Centralização e Fixação - Utilizar o apalpador para realizar a centralização precisa da peça, garantindo que a furação seja realizada nas posições corretas. A centralização deve ser verificada com o uso de um relógio comparador para assegurar a precisão.	Furação e Verificação Imediata - Realizar a furação das flanges com atenção total ao alinhamento e às cotas especificadas. Após cada furo, realizar uma verificação imediata com o relógio comparador para confirmar a precisão. - Documentar cada etapa do processo para referência futura, registrando qualquer desvio ou ajuste realizado.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Para garantir que os trabalhos estão sendo efetuados nos devidos padrões do planejamento inicial, é determinada a etapa de Verificação (Check) do ciclo PDCA da Flange Hidráulica, evidenciado na tabela a seguir, que estabelece um monitoramento sobre os serviços realizados, e verificados se estão de acordo com as metas estabelecidas para garantia da qualidade contínua.

Tabela 31 - Etapa de Verificação do PDCA para a Flange Hidráulica

(continua)

Check (Verificação)	
Revisão Pós-Operacional	Análise de Falhas e Documentação:
Verificação Dimensional - Após a conclusão da usinagem e furação, realizar uma verificação dimensional completa das flanges, utilizando instrumentos de medição de alta precisão para garantir que todas as cotas e tolerâncias foram mantidas. - Comparar as medidas com as especificações originais do desenho técnico, registrando quaisquer desvios e avaliando se estão dentro dos limites aceitáveis.	Identificação de Causas de Falhas - Se houverem desvios ou falhas, conduzir uma análise detalhada para identificar suas causas. Esta análise deve envolver toda a equipe para garantir uma compreensão completa dos problemas e suas origens. - Documentar todas as falhas encontradas, juntamente com as ações corretivas implementadas, para referência em futuros processos de produção.

(conclusão)

Inspeção Visual e Funcional - Realizar uma inspeção visual detalhada das flanges, avaliando a qualidade dos furos, a simetria e a estética das peças. - Testar a funcionalidade das flanges, assegurando que estejam aptas para montagem e uso conforme os requisitos do projeto.	Revisão de Processos e Feedback - Realizar uma reunião de revisão com a equipe para discutir os resultados da produção das flanges, compartilhando lições aprendidas e identificando oportunidades de melhoria. - Atualizar os procedimentos operacionais e de controle de qualidade com base no feedback recebido e nas falhas identificadas.
---	--

Fonte: Elaboração própria (2024).

No tópico a seguir, abordaremos a fase de Ação (Act) do ciclo PDCA, que é a execução de ações corretivas ou preventivas para garantir que as soluções apropriadas sejam estabilizadas. O plano Act é definido na tabela seguinte, que resume o que é necessário para garantir que as melhorias realizadas no processo sejam estabilizadas.

Tabela 32 - Etapa de Ação do PDCA para a Flange Hidráulica

(continua)

Act (Ação)		
Documentação e Relatório de Falhas	Implementação de Melhorias	Treinamento Contínuo e Atualizações
Registro de Desvios e Ações Corretivas - Documentar todos os desvios detectados durante a usinagem, incluindo problemas de vibração, deformações e dificuldades com o material. - Preparar um relatório detalhado que inclua as causas das falhas e as ações corretivas implementadas durante o processo.	Correções Imediatas - Implementar imediatamente as correções necessárias para as falhas identificadas, como ajustes nas ferramentas, calibração de máquinas, ou melhorias nos procedimentos de furação e centralização. - Garantir que todas as ações corretivas sejam claramente comunicadas e compreendidas por toda a equipe, para que sejam aplicadas consistentemente em futuros projetos.	Treinamento Adicional - Oferecer treinamentos adicionais e específicos para os bolsistas, focando em áreas identificadas como críticas durante o ciclo PDCA, como leitura de desenhos técnicos, uso de fresadoras, e técnicas de medição de alta precisão. - Implementar um programa de reciclagem periódica para garantir que todos os membros da equipe mantenham suas habilidades atualizadas e estejam cientes das últimas práticas de usinagem e controle de qualidade.

(conclusão)

Feedback e Revisão dos Processos:	Melhorias a Longo Prazo	Monitoramento Contínuo e Revisão Periódica
- Realizar uma reunião com a equipe para discutir os resultados, identificar lições aprendidas e planejar melhorias para futuros processos de usinagem da flange.	- Incorporar as lições aprendidas no manual de procedimentos operacionais, padronizando as melhores práticas e garantindo que sejam seguidas rigorosamente em todas as futuras produções de flanges. - Considerar a possibilidade de atualização ou substituição de equipamentos, ferramentas, ou mesmo do material utilizado (se aplicável), para melhorar a eficiência e a qualidade do processo.	Estabelecer um sistema de monitoramento contínuo para avaliar a eficácia das ações corretivas e das melhorias implementadas, realizando revisões periódicas para ajustar e refinar os processos conforme necessário. - Compilar relatórios regulares sobre o desempenho do processo de produção das flanges, utilizando os dados para conduzir melhorias contínuas e assegurar a entrega de produtos de alta qualidade.

Fonte: Elaboração própria (2024).

5.4 Análise sobre: Flange de Fixação do Encoder

5.4.1 Flange de Fixação do Encoder: Funcionalidade

A flange de fixação do encoder é um componente a ser montado na região final do eixo do motor, onde se prende a carcaça. O objetivo principal do flange é garantir que o encoder, um dispositivo que determina as rotações e posições do eixo, esteja devidamente fixado. Esta precisão é muito crítica, uma vez que mesmo a menor interferência da flange no movimento do eixo pode distorcer a leitura das rotações e posições de forma que o sistema falhe e se torne instável. Portanto, é importante que a flange de fixação do encoder seja fabricada com tolerâncias rígidas para que o eixo do motor possa girar sem nenhum impedimento adverso, e isso em si mesmo ajuda a julgar a validade e a precisão do controle de posição do motor.

5.4.2 Flange de Fixação do Encoder: Mapeamento de Falhas

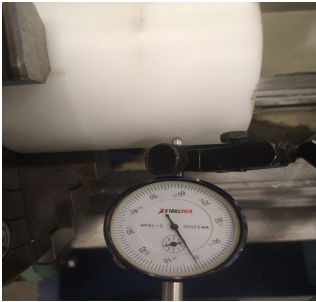
A produção deste componente enfrentou diversos problemas técnicos significativos, principalmente relacionados ao material escolhido e às tolerâncias dimensionais. A peça foi fabricada com material de poliacetal, um polímero que, embora possua propriedades adequadas para determinadas aplicações, revelou-se um desafio durante a usinagem devido à sua alta sensibilidade à deformação.

A usinagem inicial foi realizada no torno convencional, onde a equipe já antecipava possíveis complicações em relação à concentricidade e ao paralelismo das faces da peça. Devido às características do poliacetal, tornou-se indispensável o uso de um relógio comparador para centralizar precisamente a peça e garantir a precisão necessária.

Durante o processo de usinagem, foram observadas intensas vibrações durante os cortes, o que dificultou a obtenção de medições confiáveis e comprometeu a precisão dimensional desejada. Essas vibrações estavam associadas à reatividade do material e à falta de resistência à compressão, resultando em deformações na peça pela falta de estabilidade.

Em uma nova tentativa, esforços adicionais foram dedicados à redução do balanço e ao aprimoramento da fixação da peça para alcançar a concentricidade adequada. Os operadores monitoraram intensivamente o relógio comparador, conforme evidenciado na Figura 24, e ajustaram a placa de quatro castanhas até minimizarem o movimento indesejado durante a usinagem. Isso permitiu a progressão para as etapas de faceamento, desbaste axial e aproximação dos diâmetros internos da peça e finalização da peça, apesar de uma usinagem demorada e delicada.

Figura 24 - Tentativa de fixação da Flange de Fixação do Encoder



Fonte: Elaboração própria (2024).

Essas falhas evidenciaram a inadequação do material escolhido para a aplicação específica, dado o equipamento e as ferramentas disponíveis e por ser pelo fato de ser altamente suscetível a deformações. Além disso, destacaram a necessidade de uma revisão nos métodos de fixação e na seleção de ferramentas apropriadas para materiais sensíveis. A equipe concluiu que, para atender às especificações da Flange de Fixação do Encoder, seriam necessárias máquinas e equipamentos com maior precisão, bem como técnicas avançadas de usinagem adaptadas às características do poliacetal.

5.4.3 Flange de Fixação do Encoder: Plano de Ação

Com base nos dados da manufatura da flange de fixação do encoder, este tópico aborda as principais falhas identificadas ao longo do processo de produção, com foco nos modos de falha críticos destacados no relatório anterior. Na tabela a seguir, são detalhados as três primeiras operações críticas e seus respectivos modos, efeitos e suas causas de falhas, de acordo com a planilha FMEA da Flange de Fixação do Encoder, anexada no Apêndice 5.

Tabela 33 - Seção I da FMEA da Flange de Fixação do Encoder

(continua)

Processo/Operação	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Usinagem	Deformação durante a usinagem	- Perda de precisão dimensional, impossibilidade de atingir as tolerâncias necessárias.	- Sensibilidade do poliacetal à compressão - Excesso de material removido em uma única passada - Fixação inadequada na placa de quatro castanhas

(conclusão)

Preparação de Materiais	Oscilação e vibração durante a usinagem	- Falha na obtenção de medições precisas - Comprometimento da concentricidade e paralelismo das faces - Desgaste irregular das ferramentas	- Falta de resistência do material - Fixação inadequada na placa de quatro castanhas - Frequência de usinagem não ajustada adequadamente
Medição	Imprecisão nas medições com relógio comparador	- Inconsistência nas leituras, resultando em falta de precisão nas dimensões e alinhamento - Falta de precisão no alinhamento da ferramenta e peça	- Erros de calibração do relógio comparador - Fixação inadequada da peça - Peça deformada durante medição

Fonte: Elaboração própria (2024).

Conforme os processos descritos e o detalhamento das falhas apresentados na seção I, na seção II são claramente indicadas as pontuações estabelecidas pelos membros da equipe de usinagem, levando em consideração o grau de severidade, a probabilidade de detecção, a ocorrência, a determinação do NPR (Número de Prioridade de Risco), bem como as ações recomendadas para cada processo mencionado anteriormente na seção I.

Tabela 34 - Seção II da FMEA da Flange de Fixação do Encoder

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações Sugeridas
9	8	5	360	- Selecionar um material alternativo com maior resistência à compressão - Modificar o design para aumentar a robustez - Ajustar a sequência de usinagem para remover menos material por passada
8	7	6	336	- Melhorar os métodos de fixação - Usar suportes adicionais - Ajustar a frequência da usinagem - Revisar a programação CNC para garantir que os parâmetros sejam adequados ao material
8	6	5	240	- Calibrar e ajustar o relógio comparador - Revisar a fixação da peça - Reduzir a vibração durante a medição - Realizar medições extras para validar os resultados

Fonte: Elaboração própria (2024).

Na seção seguinte, é assentado os processos críticos restantes e seus correspondentes Formas de falha, consequências da falha e suas origens, de acordo com a planilha FMEA da Flange de Fixação do Encoder. Dentre as operações analisadas, temos casos de falhas na conquista de atingir as tolerâncias exigidas, e as falhas provocadas pela ausência de controle de qualidade dentro das operações de usinagem, tanto em casos de falhas por desgaste das ferramentas de corte, quanto para tempos de usinagens prolongados devidos a reajustes constantes, o qual foram casos marcantes na produção deste componente.

Tabela 35 - Seção III da FMEA da Flange de Fixação do Encoder

Processo/Operação	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha
Usinagem	Falha em alcançar as tolerâncias h7 exigidas	- Peça fora das especificações - Comprometimento do encaixe e funcionamento no e-PTO - Provocar desgaste de outros componentes	- Vibração excessiva na usinagem - Deformação devido a sensibilidade do poliacetal - Falta de controle de qualidade
Controle de Qualidade durante a Usinagem	Desgaste frequente das ferramentas de usinagem	- Cortes imprecisos - Aumento no custo de operação - Necessidade de substituições frequentes	- Material do poliacetal provoca desgaste acelerado (não desgasta, pois é macio) - Uso inadequado de ferramentas para o material - Falta de revestimento protetor nas ferramentas - Velocidade de corte inadequada
Controle de Qualidade durante a Usinagem	Tempo de usinagem prolongado devido a ajustes constantes	- Aumento dos custos de produção - Atraso na entrega do componente final - Retrabalho constante	- Necessidade de reajustes frequentes devido à deformação do material - Problemas de fixação - Falta de ferramentas específicas - Processos de usinagens inadequados

Fonte: Elaboração própria (2024).

Conforme os processos descritos e o detalhamento das falhas apresentados na seção III, na seção IV são claramente apresentadas as pontuações estabelecidas pelos membros do grupo, considerando o grau de severidade, a probabilidade de detecção, a ocorrência, o NPR, assim como as ações recomendadas para cada processo mencionado na seção anterior. Dentre as ações recomendadas para casos de maior severidade, ou seja, a falha em atingir as tolerâncias exigidas para a Flange de Fixação do Encoder, temos a realização de revisões e avaliação de materiais alternativos a o poliacetal, material altamente sensível e reativo, com facilidade de deformações, dependendo do maquinário utilizado para sua usinagem.

Tabela 36 - Seção IV da FMEA da Flange de Fixação do Encoder

Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações Sugeridas
9	7	5	315	- Considerar o uso de materiais alternativos - Reforçar a peça para aumentar a estabilidade - Revisar e corrigir a programação CNC - Implementar controle de qualidade em etapas críticas
6	6	4	168	- Implementar manutenção preventiva das ferramentas - Ajustar a velocidade de corte para minimizar desgaste - Monitorar o estado das ferramentas regularmente
6	8	5	240	- Reduzir o número de ajustes necessários através da melhoria do design da peça - Melhorar métodos de fixação - Adquirir ferramentas adequadas - Revisar etapas de usinagem de acordo com as necessidades do material

Fonte: Elaboração própria (2024).

Com base nas informações obtidas no FMEA da Flange de Fixação do Encoder, que identificou as falhas e as respectivas ações recomendadas para cada etapa, o ciclo PDCA pode ser planejado para a implementação adequada das melhorias sugeridas, visando o aprimoramento contínuo. A primeira fase do ciclo PDCA é o Planejamento (Plan), que define o trabalho de qualidade a ser realizado por meio de um plano de garantia de qualidade, focado na correção dos modos de falha identificados e no aumento da confiabilidade dos processos relacionados à Flange de Fixação do Encoder.

Tabela 37 - Etapa de Planejamento do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder

Plan (Planejamento)			
Análise Técnica e Requisitos do Componente	Preparação dos Equipamentos e Ferramentas	Desenvolvimento da Programação e Sequenciamento	Capacitação da Equipe
Estudo das Propriedades do Poliacetal Revisar as características técnicas do poliacetal, com foco em sua sensibilidade a deformações durante a usinagem e sua reatividade sob compressão. Avaliar a adequação do material para a produção da flange, considerando possíveis alternativas que possam oferecer maior resistência à compressão e menor tendência à deformação.	Torno Convencional e Ferramentas: Inspecionar o torno convencional e as ferramentas disponíveis, garantindo que estejam adequados para lidar com o poliacetal, minimizando vibrações e assegurando cortes precisos. Selecionar ferramentas específicas que ofereçam melhor controle sobre o processo de corte do poliacetal, e realizar manutenção preventiva para garantir o desempenho ideal.	Programação CNC: Revisar e ajustar o código CNC para garantir que as operações de usinagem minimizem o impacto no material, especialmente na redução das vibrações durante o corte. Programar uma sequência de operações que priorize a estabilidade da peça, iniciando com operações que assegurem uma base sólida antes de proceder com cortes mais críticos.	Treinamento em Usinagem de Materiais Sensíveis: Fornecer treinamento específico para a equipe sobre a usinagem de materiais como o poliacetal, com ênfase em técnicas de fixação, redução de vibrações e uso correto do relógio comparador. Capacitar os operadores para detectar e reagir a sinais de deformação durante a usinagem, ajustando o processo conforme necessário.
Especificações de Tolerância: Reforçar o entendimento sobre a tolerância dimensional h7 necessária, destacando a importância da concentricidade e do paralelismo das faces. Desenvolver critérios de qualidade específicos para monitorar e controlar as tolerâncias durante a usinagem.	Fixação e Centralização: Revisar a configuração da placa de quatro castanhas para assegurar que ela pode manter a peça estável durante a usinagem. Estabelecer métodos adicionais de suporte e fixação, como o uso de dispositivos de balanço, para reduzir as vibrações e garantir a centralização precisa.	Sequenciamento de Operações: Estabelecer uma sequência de usinagem que permita a remoção gradual do material, evitando grandes volumes de corte em uma única passagem para reduzir o risco de deformações.	

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a etapa de planejamento, é determinada a tabela de Execução (Do), onde é executado as ações esperadas de acordo com o plano de garantia determinado na etapa de planejamento, em conjunto com cumprimento de padrões que preservem a qualidade dos processos, que é evidenciado na tabela seguinte.

Tabela 38 - Etapa de Execução do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder

Do (Execução)	
Início da Usinagem	Controle de Qualidade
Primeira Operação: Começar a usinagem com operações de faceamento e desbaste axial, garantindo que a peça permaneça estável e concentricamente alinhada usando o relógio comparador. Realizar cortes iniciais que estabeleçam uma base sólida antes de proceder com operações que exigem maior precisão dimensional.	Verificação de Concentricidade: Utilizar o relógio comparador para monitorar a concentricidade da peça em várias etapas críticas da usinagem, ajustando conforme necessário. Implementar verificações frequentes de paralelismo das faces e outros parâmetros dimensionais críticos.
Monitoramento Contínuo: Monitorar a peça continuamente durante a usinagem, prestando atenção especial às vibrações. Ajustar a velocidade de corte e a fixação conforme necessário para manter a peça dentro das tolerâncias especificadas.	Ajustes em Tempo Real: Se detectadas deformações ou desvios durante a usinagem, interromper o processo para realizar ajustes na fixação ou na programação CNC. Documentar todas as alterações para referência futura.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Para garantir que os trabalhos estão sendo efetuados nos devidos padrões do planejamento inicial, é determinada a etapa de Verificação (Check), evidenciado na tabela a seguir, que estabelece um monitoramento sobre os serviços realizados, e verificados se estão de acordo com as metas estabelecidas para garantia da qualidade contínua.

Tabela 39 - Etapa de Verificação do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder

Check (Verificação)	
Avaliação Pós-Usinagem	Documentação e Relatório de Falhas
Revisão Completa: - Após a conclusão da usinagem, realizar uma verificação dimensional completa da flange, comparando as medições com as especificações para assegurar que todas as tolerâncias foram mantidas. - Inspecionar a peça em busca de deformações ou irregularidades, documentando quaisquer desvios encontrados.	Registro de Desvios e Ações Corretivas - Documentar todos os desvios detectados durante a usinagem, incluindo problemas de vibração, deformações e dificuldades com o material. - Preparar um relatório detalhado que inclua as causas das falhas e as ações corretivas implementadas durante o processo.
Análise de Estabilidade e Fixação: Revisar a eficácia da fixação e a estabilidade da peça durante a usinagem, identificando áreas onde melhorias podem ser feitas, como o uso de suportes adicionais ou ajustes na fixação.	Feedback e Revisão de Processo: Realizar uma reunião com a equipe para discutir os resultados, identificar lições aprendidas e planejar melhorias para futuros processos de usinagem da flange.

Fonte: Elaboração própria (2024).

No tópico a seguir, abordaremos a fase de Ação (Act) do ciclo PDCA, que é a execução de ações corretivas ou preventivas para garantir que as soluções apropriadas sejam estabilizadas. Na tabela seguinte, é pontuado que deve-se ter prioridade, caso possua, na atuação das correções relacionados a fixação e a substituição de ferramentas inadequadas, o qual foi um problema marcante durante os processos. Dentre as outras atuações desta etapa do ciclo, temos a proposta de realização de treinamentos adicionais com focos em habilidades com materiais sensíveis, como o poliacetal, caso continue sendo utilizado, e técnicas para ajuste fino para alcançar as tolerâncias de dimensão do componente. Para estimular o desenvolvimento da qualidade, são implementadas melhorias a longo prazo, o quais as práticas benéficas para a operação que são identificadas ao longo do ciclo, são incorporadas e padronizadas em procedimentos fundamentais para aumentar a eficiência das produções. Além disto, esta etapa tem como proposta a revisão do material bruto, estudando a substituição do poliacetal por um material mais resistente a compressão, ou ser realizado uma revisão do design da peça, proposto pela equipe da empresa privada, para melhorar a estabilidade da peça e a facilidade das operações de usinagem.

Tabela 40 - Etapa de Ação do PDCA para a Flange de Fixação do Encoder

Act (Ação)	
Implementação de Melhorias	Treinamento Contínuo e Atualizações
Correções Imediatas: - Implementar correções imediatas para quaisquer problemas identificados, como reforço na fixação, ajustes na programação CNC (caso utilizado), ou substituição de ferramentas inadequadas. - Garantir que todas as correções sejam documentadas e comunicadas à equipe para evitar a repetição de erros.	Treinamento Adicional: Fornecer treinamento contínuo para a equipe, com foco em técnicas avançadas de usinagem de materiais sensíveis e no ajuste fino do processo para peças com tolerâncias rigorosas.
Melhorias a Longo Prazo: - Incorporar as melhores práticas identificadas durante o ciclo PDCA no manual de produção, padronizando procedimentos para aumentar a eficiência e a qualidade na produção de futuras flanges. - Considerar a substituição do poliacetal por um material mais resistente à compressão ou revisar o design da peça para melhorar a estabilidade durante a usinagem.	Atualização de Ferramentas e Software: Revisar periodicamente o software CAM e o ferramental disponível, implementando atualizações ou adquirindo novos equipamentos conforme necessário para manter a produtividade e a qualidade do processo de usinagem.

Fonte: Elaboração própria (2024).

6 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia FMEA permitiu avaliar e discutir criticamente as falhas nos componentes-chave do motor: Eixo do Motor, Caixa de Passagem, Flange Hidráulica e Flange de Fixação do Encoder. Essa análise fundamentou a elaboração de planos de ação utilizando o ciclo PDCA, visando propor ações corretivas e melhorias para garantir a contínua otimização dos processos. A escolha dessas ferramentas justifica-se pela necessidade de uma abordagem sistemática e proativa na gestão da qualidade e confiabilidade do projeto, essenciais diante da complexidade geométrica e das exigentes tolerâncias dos componentes.

Na manufatura do Eixo do Motor, apesar de melhorias nas técnicas de fixação e otimização do programa CNC de eletroerosão, a incompatibilidade dos maquinários disponíveis levou à decisão de terceirizar a produção. A Caixa de Passagem enfrentou desafios como incompatibilidade de ferramentas e falhas recorrentes nas fixações durante a usinagem, indicando a necessidade de revisar a seleção de equipamentos e implementar um planejamento de manutenção preventiva para evitar futuros problemas.

Componentes como a Flange Hidráulica e a Flange de Fixação do Encoder exigiram otimização nos processos de medição e fixação, bem como um esforço contínuo para manter alta consistência nos resultados, devido às suas geometrias complexas e tolerâncias rigorosas.

Embora as recomendações dos PDCA's ainda não tenham sido implementadas, elas oferecem um roteiro estratégico para futuras operações, visando melhorias contínuas que aumentarão significativamente a confiabilidade e a qualidade das peças. Essa implementação beneficiará não apenas a empresa parceira, mas também o mercado de veículos eletrificados como um todo.

Em resumo, este projeto identificou as principais deficiências nos processos de fabricação e formulou um plano de ação preciso para resolvê-las, o que será crucial nas etapas finais de implementação. As metodologias propostas destacam a importância de uma abordagem sistemática e proativa na garantia da qualidade e confiabilidade no design, entrega e manufatura, sob a perspectiva da gestão de projetos industriais. A implementação futura das recomendações do PDCA permitirá o avanço em métodos de usinagem mais qualificados, promovendo uma colaboração eficaz entre a empresa parceira e a equipe do projeto para atender plenamente aos requisitos estabelecidos.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Conforme explicitado anteriormente, a implementação do plano de ação oferecido no trabalho não foi implementado em prática para a produção dos outros componentes, visto que foi apenas realizado apenas uma e-PTO para o projeto. Desta forma, é recomendado que caso as produções sejam continuadas, seria valioso a implementação e análise do desempenho das produções seguindo, metodicamente, as ações recomendadas no PDCA elaborado e que seja explorado a aplicação de FMEA para os outros equipamentos do projeto, como a Flange OUT e Flange IN. Conforme já explicitado no PDCA da Flange de Fixação do Encoder, a investigação e a avaliação de outros materiais de matéria-prima os componentes, buscando entender caso possa oferecer um impacto positivo na redução de falhas e aumento da eficiência e confiabilidade da montagem por completo. Por fim, focado na área de projeto, uma reavaliação dos requisitos de dimensionamento e design das peças dos componentes seria de boa realização, assegurando um alinhamento entre as capacidades do que a Instituição Federal pode ofertar, no quesito de equipamentos e maquinários disponíveis, e da capacidade prática dos bolsistas do projeto, em busca de estabelecer o equilíbrio entre as partes em prol da melhoria contínua, com a otimização dos processos por um todo, semeando alta qualidade dos projetos entregue

REFERÊNCIAS

SCHMITT, José C. **Método de análise de falha utilizando a integração das ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA**. 2013. 111p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

TOLEDO, J. C.; AMARAL, D. C. **FMEA – Análise do tipo e efeito de falha**. Grupo de Estudo e Pesquisa em Qualidade, Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: < <http://www.gepeq.dep.ufscar.br/arquivos/FMEA-APOSTILA.pdf> > Acesso em: 06 de junho de 2024.

SAKURADA, E.Y. **As técnicas de Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 2001. Dissertação de Mestrado.

Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation. **Potential Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)**, Reference Manual, 4th Edition. 2008.

LONGO, Rose Mary Juliano. **Gestão da Qualidade: Evolução Histórica, Conceitos Básicos e Aplicação na Educação**. Rio de Janeiro, 1996.

UDOP – União dos Produtores de Bioenergia. **O que é manutenção industrial?** 19 mar. 2007. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2007/03/19/o-que-e-manutencao-industrial.html>. Acesso em: 19 ago. 2024.

RECH, Luciana Amorim. **Implementação da Manutenção Produtiva Total (TPM) na empresa metalúrgica Forjasul S/A**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/115276/000956201.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 ago. 2024.

MANUTENÇÃO EM FOCO. **FMEA: Análise de Modos de Falhas e Efeitos**. 2024. Disponível em: <https://www.manutencaoemfoco.com.br/fmea-analise-modos-de-falhas-e-efeitos/>. Acesso em: 19 ago. 2024.

FOGLIATTO, Flávio S.; RIBEIRO, José Luiz Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A - FMEA da Caixa de Passagem

Componente: Caixa de Passagem									
Data de início: 09/02/2024 - Data de fim: 01/06/2024									
Processo/Operação	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	RPN (S x O x D)	Ações Sugeridas	
Fixação da Peça para Usinagem	Desprendimento da peça durante a usinagem	Quebra da peça, resultando em perda total Atraso significativo na produção Necessidade de retrabalho completo	Fixação inadequada com seis parafusos Vibração excessiva durante a usinagem Chapa de suporte insuficiente para estabilizar a peça	10	7	8	560	Reforçar a fixação com parafusos adicionais ou pontos de ancoragem Desenvolver uma chapa de suporte mais robusta Implementar técnicas de redução de vibração no CNC	
	Mantenção e Verificação do CNC	Parada abrupta do processo Atraso na entrega do componente Potencial dano ao CNC ou à peça	Falhas no sistema eletrônico de alarme do D800 Sobrecarga ou falha elétrica Manutenção preventiva inadequada do D800	8	6	5	200	Implementar um programa rigoroso de manutenção preventiva Monitorar regularmente o sistema eletrônico do CNC para detectar problemas antes que causem falhas Estabelecer um plano de contingência para falhas no CNC	
Planejamento e Preparação do Corte	Geometria inadequada e corte do tanque	Corte impreciso, resultando em tanque fora das especificações Dificuldade em alcançar as dimensões requisitadas Necessidades de retrabalhos	Geometria complexa da peça Limitações das serras disponíveis Falta de planejamento detalhado do corte inicial	8	7	4	224	Realizar um planejamento detalhado das etapas antes de iniciar a usinagem Considerar a aquisição de serras mais adequadas para a geometria da peça Ajustar o design da peça para facilitar o corte inicial	
	Programação CNC inadequada	Necessidade de reajustes constantes Impossibilidade de alcançar as tolerâncias necessárias Atraso na produção e entrega da peça final	Código CNC com operações desnecessárias ou incorretas Referências incorretas no software CAM	9	8	5	360	Revisar e otimizar o código CNC para eliminar operações desnecessárias e corrigir erros Verificar e ajustar as referências no CAM antes de iniciar a usinagem	
Calibração do Relógio Comparador	Erro de medição com relógio comparador	Dificuldade em zerar a peça, levando a imprecisões Dificuldade de alcançar as tolerâncias exigidas Necessidade de retrabalho, atrasando a produção	Incompatibilidade da geometria da peça com o maquinário Fixação inadequada durante a medição Falta de experiência ou treinamento dos operadores	8	8	6	384	Utilizar um relógio comparador compatível com a geometria da peça Revisar a fixação antes de iniciar para garantir a estabilidade Treinar os operadores para melhorar a precisão das medições	
	Verificação da Integridade da Peça	Perda total do componente Necessidade de refazer a peça, aumentando custos e tempo de produção Atraso significativo no cronograma de produção	Folga nos parafusos de fixação Vibração excessiva durante a usinagem Posicionamento inadequado da peça no centro de usinagem	10	6	4	240	Garantir que todos os parafusos estejam devidamente apertados antes de iniciar a usinagem Reduzir a vibração ajustando a programação CNC Melhorar o posicionamento inicial da peça no centro de usinagem para evitar colisões	

APÊNDICE B - FMEA Completo do Eixo do Motor

Componente: Eixo do Motor									
Data de início: 09/02/2024 - Data de fim: 30/03/2024									
Operações	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	RPN (S x O x D)	Ações Sugeridas	
Eletroerosão - Preparação do maquinário	Rompimento do fio durante a eletroerosão	Interrupção do processo e deformação da peça devido à liberação de tensões internas.	Tensões internas na peça, sobrecarga do fio de eletroerosão.	8	7	6	336	Reprogramar o código para reduzir a carga no fio, realizar cortes menores inicialmente, revisar o processo de fixação.	
Usinagem	Desalinhamento do eixo	Batimento e falta de concentricidade, comprometendo a funcionalidade e precisão do eixo.	Deformação durante a usinagem, uso de contra ponto inadequado	9	6	5	270	Usar contra ponto adequado para grandes diâmetros, realizar medições frequentes de concentricidade	
Medição	Danos no canalado externo	Comprometimento da funcionalidade do eixo, inviabilizando seu uso em aplicações finais.	Erro de medição com paquímetro, folga na máquina durante a eletroerosão.	8	5	5	200	Calibrar e verificar instrumentos de medição antes do uso, inspecionar a máquina de eletroerosão para eliminar folgas.	
Eletroerosão	Desgaste prematuro do canalado interno	Redução da vida útil do eixo, comprometendo o desempenho do motor.	Desgaste irregular causado por usinagem incorreta, erro na programação.	7	6	6	252	Revisar a programação CNC, garantir que o processo de usinagem siga as especificações corretas.	
Usinagem	Deformação devido à fixação inadequada	A peça perde sua forma original, afetando a funcionalidade e precisão final.	Fixação inadequada que não absorve as tensões internas durante o corte.	8	7	4	224	Desenvolver e testar novos métodos de fixação, como o uso de suportes adicionais ou fixações mais robustas.	
Programação CNC	Erro na programação CNC	Resultado em usinagem imprecisa, necessidade de retrabalho, e comprometimento das especificações da peça.	Código de programação incorreto ou não compatível com as ferramentas disponíveis.	7	8	5	280	Verificar a compatibilidade do código com as ferramentas disponíveis e realizar simulações prévias para validar o programa.	
Monitoramento	Falha na detecção de erro de usinagem	Produção de peças defeituosas que não atendem às especificações, resultando em desperdício de material.	Falta de monitoramento contínuo durante a usinagem, ausência de inspeções intermediárias.	8	7	4	224	Implementar um sistema de controle de qualidade com inspeções regulares durante a usinagem.	

APÊNDICE C - FMEA Completo da Flange Hidráulica

Componente: Flange Hidráulica Data de início: 22/05/2024 - Data de fim: 25/06/2024									
Operação/Processo	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR	Ações Sugeridas	
Usinagem das Flanges - Manual	Erros de usinagem manual	Desvios dimensionais Comprometimento da funcionalidade Aumento do retrabalho	Habilidade técnica insuficiente Falta de supervisão Configuração inadequada da máquina	8	7	8	448	Implementar treinamento intensivo Estabelecer supervisão contínua Verificar configurações das máquinas	
		Produção de peças fora de especificação Desperdício de material Necessidade de retrabalho	Parâmetros de programação incorretos Falhas na preparação da peça Problemas de calibração	8	6	4	192	Revisar rotinas de programação Implementar procedimento rigoroso de setup Calibrar regularmente as máquinas	
Furação das Flanges - Posição	Erros de usinagem CNC								
	Furação fora de posição	Furações incorretas Dificuldade de montagem Aumento do retrabalho	Interpretação incorreta das cotas Uso de ferramentas desgastadas Erros na centralização	7	7	6	294	Treinamento em leitura de desenhos técnicos Substituição preventiva de ferramentas Uso de sistemas de centralização automática	
Furação das Flanges - Diâmetro	Furação com diâmetro incorreto	Problemas de encaixe Dificuldade na montagem Aumento do retrabalho	Seleção incorreta de brocas Desgaste excessivo das brocas Leitura incorreta das cotas Erro de leitura na configuração	7	4	5	140	Implementar checklists de verificação de ferramentas Manutenção preventiva das brocas Verificação detalhada das especificações	
		Peças rejeitadas Necessidade de retrabalho completo Atraso na entrega	Falha na inspeção intermediária Dependência de habilidades individuais Equipamentos de medição inadequados	9	6	5	270	Processo de inspeção mais rigoroso Uso de equipamentos de medição precisos Treinamento em técnicas de inspeção	
Controle de Qualidade	Furação incorreta não detectada	Furações desalinhadas Comprometimento estrutural Risco de falha na aplicação final	Desvio angular no eixo do apalpador Configuração inadequada da peça Falta de procedimentos claros de verificação	8	4	5	160	Revisar procedimentos de alinhamento Substituição de ferramentas danificadas Implementar sistemas automatizados de verificação	
	Furação com alinhamento incorreto								

APÊNDICE D - FMEA Completo da Flange de Fixação do Encoder

Componente: Flange de Fixação do Encoder									
Data de início: 22/05/2024 - Data de fim: 06/06/2024									
Processo/Operação	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Deteção (D)	NPR	Ações Sugeridas	
Processo de Usinagem	Deformação durante a usinagem	Perda de precisão dimensional/impossibilidade de atingir as tolerâncias necessárias.	Sensibilidade do poliacetal à compressão Excesso de material removido em uma única passada Fixação inadequada na placa de quatro castanhas	9	8	5	360	Selecionar um material alternativo com maior resistência à compressão Modificar o design para aumentar a robustez Ajustar a sequência de usinagem para remover menos material por passada	
		Falha na obtenção de medições precisas	Falha de resistência do material					Melhorar os métodos de fixação Usar suportes adicionais Ajustar a frequência da usinagem	
Seleção e Preparação de Materiais	Oscilação e vibração durante a usinagem	Comprometimento da concentricidade e paralelismo das faces	Fixação inadequada na placa de quatro castanhas	8	5	7	280	Revisar a programação CNC para garantir que os parâmetros sejam adequados ao material	
		Desgaste irregular das ferramentas	Frequência de usinagem não ajustada adequadamente						
Medição	Imprecisão nas medições com relógio comparador	Inconsistência nas leituras, resultando em falta de precisão nas dimensões e alinhamento	Erros de calibração do relógio comparador					Calibrar e ajustar o relógio comparador	
		Falta de precisão no alinhamento da ferramenta e peça	Fixação inadequada da peça Material deformado durante medição	8	4	4	128	Revisar a fixação da peça Reduzir a vibração durante a medição Realizar medições extras para validar os resultados	
Seleção e Preparação de Materiais	Falha em alcançar as tolerâncias h7 exigidas	Peça fora das especificações	Vibração excessiva na usinagem					Considerar o uso de materiais alternativos	
		Comprometimento do encaixe e funcionamento no e-PTO	Deformação devido a sensibilidade do poliacetal	9	7	5	315	Reforçar a peça para aumentar a estabilidade Revisar e corrigir a programação CNC	
Controle de Qualidade		Provocar desgaste de componentes	Falta de controle de qualidade					Implementar controle de qualidade em etapas críticas	
		Cortes imprecisos	Material do poliacetal provoca desgaste acelerado					Utilizar ferramentas de corte para materiais macios como poliacetal	
Controle de Qualidade	Desgaste frequente das ferramentas de usinagem	Aumento no custo de operação	Uso inadequado de ferramentas para o material	4	4	4	64	Implementar manutenção preventiva das ferramentas	
		Necessidade de substituições frequentes	Falta de revestimento protetor nas ferramentas					Ajustar a velocidade de corte para minimizar desgaste	
Controle de Qualidade		Aumento dos custos de produção	Necessidade de reajustes frequentes devido a deformação do material					Monitorar o estado das ferramentas regularmente	
		Atraso na entrega do componente final	Problemas de fixação	6	8	5	240	Reduzir o número de ajustes necessários através da melhoria do design da peça	
Controle de Qualidade	Tempo de usinagem prolongado devido a ajustes constantes	Retrabalho constante	Falta de ferramentas específicas					Melhorar métodos de fixação	
								Adquirir ferramentas adequadas	
				Revisar etapas de usinagem de acordo com as necessidades do material					