



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Milena Ribeiro

**Aplicação da automação na redução de riscos mapeados com a metodologia  
PFMEA em uma empresa de painéis de baixa e média tensão**

Blumenau

2023

Milena Ribeiro

**Aplicação da automação na redução de riscos mapeados com a metodologia  
PFMEA em uma empresa de painéis de baixa e média tensão**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Julia Dal Forno

Blumenau

2023

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

Ribeiro, Milena

Aplicação da automação na redução de riscos mapeados com a metodologia PFMEA em uma empresa de painéis de baixa e média tensão / Milena Ribeiro ; orientadora, Ana Julia Dal Forno, 2023.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,  
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,  
2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Automação;  
PFMEA; Qualidade; . I. Dal Forno, Ana Julia. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Milena Ribeiro

**Aplicação da automação na redução de riscos mapeados com a metodologia  
PFMEA em uma empresa de painéis de baixa e média tensão**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de  
“Bacharela em Engenharia de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo  
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Blumenau, 12 de dezembro de 2023.

**Banca examinadora**



Profa. Dra. Ana Julia Dal Forno  
Orientadora



Profa. Marilise Luiza Martins dos Reis Sayão, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Daniel Alejandro Ponce Saldías, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2023.

Este trabalho é dedicado aos meus irmãos,  
que me inspiram a buscar o meu melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais, que garantiram que eu pudesse chegar até aqui e a minha avó, que sempre tentou me incentivar a continuar. Obrigada por sempre acreditarem em mim. Mãe, obrigada por tanta paciência!

Obrigada a todos os meus amigos que estiveram comigo ao longo dos anos e das dificuldades da faculdade, vocês sempre foram motivo de força, especialmente quando na forma de risos e brincadeiras.

Obrigada Pedro, por me fazer insistir no TCC quando eu achei que não daria mais tempo e por garantir que eu sempre tivesse o melhor ambiente para focar e me dedicar.

Agradeço ao Vinício, por todo o incentivo, cobrança e por me ajudar a lidar com a situação.

Um agradecimento imenso a Ana, minha orientadora, uma mulher inspiradora e que realmente acreditou no meu potencial.

Agradeço a todo o time que esteve junto no desenvolvimento do projeto mencionado, foi gratificante trabalhar com todos vocês.

Agradeço a UFSC por me acolher e me proporcionar oportunidades maravilhosas ao longo desses anos, tenho muito orgulho dessa universidade, do corpo docente e do apoio que sempre recebi.

*"We are the music makers,  
And we are the dreamers of dreams"*  
Arthur O'Shaughnessy, 1873

## RESUMO

A garantia de qualidade dos processos é indispensável para o resultado satisfatório dos produtos acabados em uma linha de produção manufaturada. O PFMEA é uma ferramenta proativa e preventiva que pode auxiliar na melhoria dos processos. O trabalho em questão apresenta a aplicação da metodologia numa linha de produção de painéis de média tensão e propõe soluções para redução dos riscos de não qualidade, utilizando recursos de automação integrados ao processo produtivo para tal. É realizado uma revisão bibliográfica para entender o cenário de outras empresas e depois uma pesquisa-ação para aplicar alterações no processo estudado. A solução desenvolvida é apresentada e os resultados de redução de risco são discutidos. Dos 89 riscos identificados, 64 são reduzidos (71%) aplicando a solução com automação integrada na estação de trabalho que apresentou o maior número de riscos (79%).

**Palavras-chave:** Automação; PFMEA; riscos.

## ABSTRACT

Process quality assurance is essential for satisfactory results on the finished products in a manufacturing assembly line. PFMEA is a proactive and preventive tool that can help improve processes. The work in question presents the application of the methodology in a medium voltage switchgear production line. A literature review is carried out to understand the scenario of other companies and then action research is conducted to apply changes to the process studied. The developed solution is presented, and the risk reduction results are discussed. From the 89 risks identified, 64 are reduced (71%) by applying by applying the solution with integrated automation on the workstation that presented the highest number of risks (79%).

**Keywords:** Automation; PFMEA; risk.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia de pesquisa .....	18
Figura 2 – Etapas da pesquisa-ação .....	22
Figura 3 – Características principais de ETO .....	26
Figura 4 – Painel de Média Tensão.....	30
Figura 5 – Mapa de Fluxo de Processo.....	31
Figura 9 – Severidades identificadas nos RPNs $\geq 144$ .....	37
Figura 10 – Categorias de Modos de falha identificados.....	39
Figura 11 – Ilustração da solução proposta .....	40
Figura 12 – Exemplo de HMI.....	41
Figura 13 – Conexão entre controlador, ferramentas e HMI .....	42
Figura 14 – <i>Kanban</i> com indicação luminosa.....	43
Figura 15 – Solução desenvolvida .....	44
Figura 16 – HMI.....	44
Figura 17 – Torquímetros disponíveis .....	45
Figura 18 – Controlador do sistema .....	45
Figura 19 – Bancada com adaptadores .....	46
Figura 20 – <i>Kanban</i> com indicador luminoso .....	47
Figura 21 – Ar-condicionado instalado na máquina .....	48
Figura 22 – Jiga de montagem adaptada na bancada .....	48
Figura 23 – Máquina em operação.....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Artigos analisados .....	19
Quadro 2 – Relação entre perguntas e artigos revisados .....	21
Quadro 3 – Resultados de diferentes aplicações de FMEA .....	25
Quadro 4 – Critérios utilizados para severidade.....	33
Quadro 5 – Critérios utilizados para ocorrência .....	35
Quadro 6 – Critérios utilizados para a detecção.....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de estações pelo RPN identificado .....	38
Tabela 2 – Redução de riscos na Estação de Trabalho 01 .....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTO	Configured-to-order
ETO	Engineering to Order
FAT	Factory Acceptance Test
FMEA	Failure Mode Effect and Analysis
HMI	Interface Homem-Máquina
IoT	Internet of Things
JIT	Just-in-time
PFD	Process Flow Diagram
PFMEA	Process Failure Mode Effect and Analysis
PY	Poka-Yoke
RPN	Risk Priority Number

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS TEÓRICOS</b> .....	<b>23</b>
3.1	PFMEA.....	23
3.2	PRODUÇÃO ETO.....	25
3.3	INDÚSTRIA 4.0 E LEAN MANUFACTURING.....	27
<b>4</b>	<b>PESQUISA-AÇÃO NA EMPRESA DE PAINÉIS DE BAIXA E MÉDIA TENSÃO</b> .....	<b>29</b>
4.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA EM ESTUDO.....	29
<b>4.1.1</b>	<b>O produto e a linha de produção</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Aplicação do PFMEA</b> .....	<b>32</b>
4.1.2.1	<i>Critérios utilizados</i> .....	33
4.1.2.2	<i>Análise de modos de falhas</i> .....	37
4.1.2.3	<i>Principais riscos identificados</i> .....	39
<b>4.1.3</b>	<b>Solução proposta</b> .....	<b>40</b>
4.1.3.1	<i>Operações de trabalho sincronizadas</i> .....	41
4.1.3.2	<i>Controle de torques integrado</i> .....	41
4.1.3.3	<i>Kanban com sinalização luminosa – “Poka-pick”</i> .....	42
<b>4.1.4</b>	<b>Solução desenvolvida</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Cenário pós implementação</b> .....	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A satisfação dos clientes é um dos principais pilares na garantia de mercado de uma marca, seja qual for o segmento em questão (Azamfirei, *et al*, 2023). Para o setor de energia elétrica, a qualidade do produto é fundamental, como também significa a segurança dos clientes e de sua propriedade; especialmente quando se trata do ramo de painéis de média e baixa tensão. Assim, quando aplicados na distribuição e gerenciamento de energia, os equipamentos precisam ser projetados e produzidos com os critérios de qualidade e sem desperdícios.

A empresa na qual o estudo será conduzido é uma fabricante de equipamentos de baixa e média tensão, com unidade em Santa Catarina há mais de 15 anos, os painéis nela produzidos são produtos conhecidos como ETO (*Engineering to Order*), ou seja, dentro de uma classe de especificações técnicas, os painéis são projetados de acordo com a necessidade do cliente, sendo customizados de acordo com demandas e aplicações específicas. São produtos "engenheirados", como comumente chamados na indústria. Devido sua alta complexidade e variabilidade, estes produtos são altamente manufaturados, variando de acordo com cada projeto.

Nesse contexto, os processos devem ser cuidadosamente planejados e controlados para atingir a qualidade do produto acabado, desde o entendimento da necessidade do cliente, passando por todas as etapas internas, pela produção do equipamento até o momento em que o este esteja embalado aguardando a coleta do cliente. **Como então, garantir a integridade do produto de forma proativa, evitando falhas, reclamações e insatisfação do cliente?**

A evolução dos conceitos de qualidade e o desenvolvimento de ferramentas aplicáveis na indústria tem tornado primordial o investimento na prevenção de problemas ao invés de sua correção. A metodologia de FMEA (*Failure Mode Effect and Analysis*) ou Análise de Modo e Efeito de Falha, foco de estudo do presente trabalho, é utilizada para analisar potenciais falhas/riscos de processo ou produto com o objetivo de atuar de forma preventiva. Aplicando essa metodologia aos processos de manufatura (PFMEA), é possível identificar os pontos críticos do processo, avaliar o quão seguro e controlado está o processo e determinar os pontos de melhoria necessários, assim, garantindo a entrega do produto de acordo com as especificações (Ionescu *et al*, 2022).

Uma vez identificados os riscos de forma adequada, a automação de processos pode ser uma ótima ferramenta para reduzi-los, como no caso de processos manufaturados e com alta variabilidade, onde a produção não é em massa, a automação deve ser aplicada de forma estratégica agindo em pontos que possam ser padronizados, trabalhando lado a lado com a manufatura. Em um segmento crítico como este, não se pode esperar a falha acontecer, e os riscos mapeados como críticos no FMEA devem ser reduzidos e controlados de forma confiável, o que pode ser atingido através da automação.

Além disso, o *Lean Manufacturing*, que foi desenvolvido no Japão como uma técnica para maximizar o valor do produto através da redução de desperdícios, define que tudo que não adiciona valor visível para o cliente ou consumidor deve ser considerado desperdício e mapeia defeitos como um dos oito principais desperdícios (Paranhos Filhos, 2007). Mesmo que testes e inspeções possam impedir que o cliente enfrente problemas em campo, são métodos corretivos que permitem que o defeito aconteça. Gerar defeitos gera custo de não qualidade, retrabalho e tempo adicional ao processo, o que pode ser evitado ao se trabalhar de forma preventiva e proativa.

Assim, unir a automação às metodologias de qualidade, aplicando-a de forma estratégica a complementar os processos manufaturados, reduzindo os riscos de não qualidade é uma das abordagens que pode ser tomada.

O problema de pesquisa que motivou este trabalho foi a transferência de um novo produto para a unidade de Blumenau. A transferência requer a adaptação de uma das linhas de produção existentes para contemplar as etapas de montagens do novo produto. O objetivo da empresa é garantir que a transferência será bem-sucedida e que os produtos fabricados serão confiáveis, eliminando 100% dos riscos altos mapeados com a metodologia PFMEA que impactem a segurança e a propriedade do cliente (severidade 9 e 10).

Diante desse contexto, o objetivo desse trabalho é reduzir os riscos da não qualidade e insatisfação do cliente com a aplicação da metodologia PFMEA no setor de automação de processos para linhas de produção de equipamentos de média e baixa tensão que possuem processos manufaturados.

Para isso, os objetivos específicos desdobram-se em:

- Identificar como a metodologia de PFMEA é aplicada na indústria;
- Abordar o conceito de RPN (*Risk Priority Number*) e sua importância;
- Detalhar o funcionamento da linha de produção em questão;

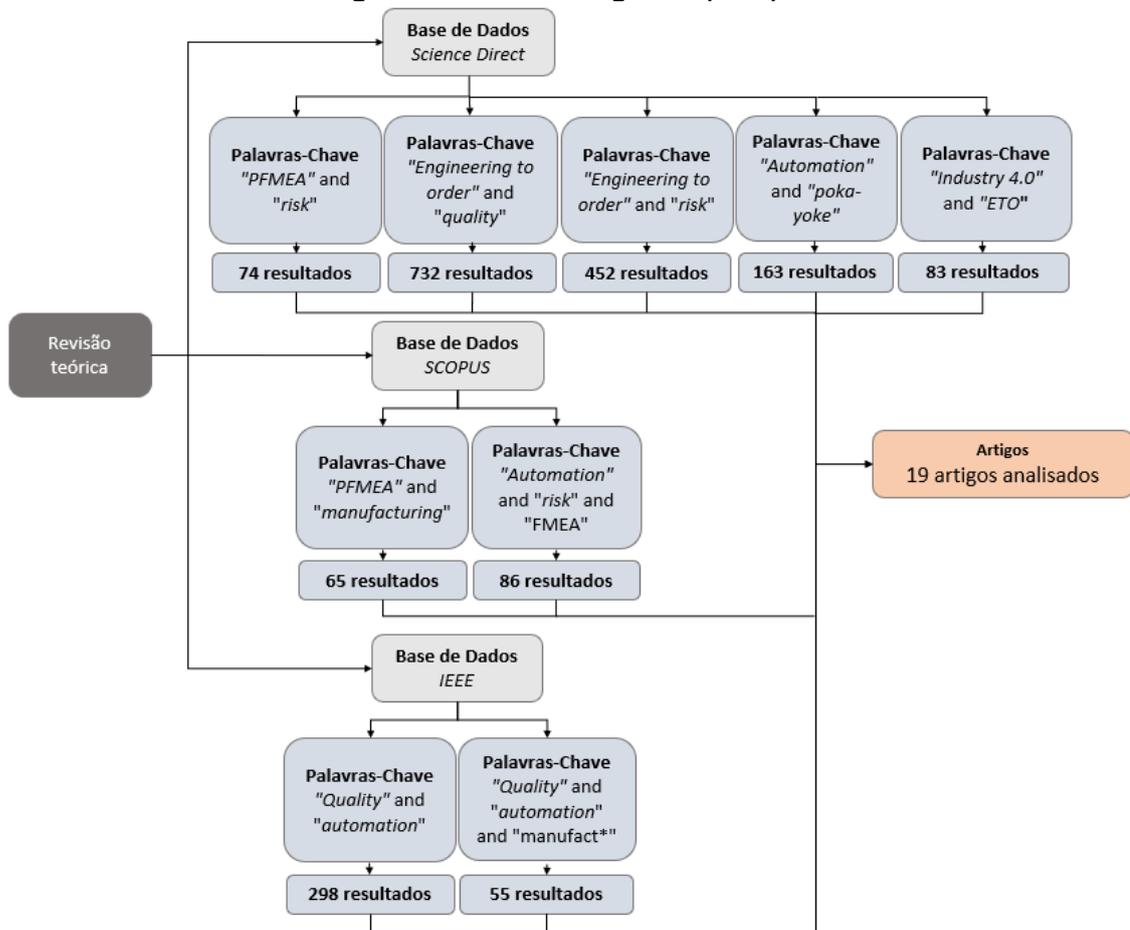
- Avaliar o processo utilizando PFMEA;
- Identificar RPN altos e propor soluções utilizando automação;
- Descrever as soluções propostas;
- Verificar se as soluções foram capazes de reduzir os riscos mapeados.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada pode ser dividida em duas partes: etapa teórica e etapa prática. A etapa teórica consistiu em uma revisão sistemática da literatura, utilizando três bases de dados para a pesquisa - Science Direct, Scopus e IEEE) buscando palavras que remetesse ao objetivo do trabalho de relacionar a metodologia PFMEA com a aplicação da automação em linhas de produção ETO manufaturadas. Para a etapa prática, foi realizado uma pesquisa-ação na qual houve participação da autora no desenvolvimento do projeto estudado, tanto nas revisões de PFMEA, quanto na validação das soluções propostas.

Foram realizadas nove combinações diferentes de termos para abranger diferentes artigos, o fluxograma representando etapa teórica onde pode-se observar as buscas realizadas é exibido na Figura 1.

Figura 1 – Metodologia de pesquisa



Fonte: elaborado pela autora

Os filtros usados foram para obter apenas artigos de revisão e de pesquisa, sendo que para as buscas de maiores resultados (“Engineering to Order” e “Quality” e “Engineering to Order” e “risk”) aplicou-se filtros para a publicação a partir de 2015, para as outras pesquisas o filtro por datas foi desconsiderado.

Assim, as perguntas de pesquisa foram:

- a) O que é PFMEA e como ele é aplicado?
- b) O que é RPN e como reduzir os defeitos a partir da sua utilização?
- c) Qual o diferencial de uma linha ETO?
- d) Como a automação pode auxiliar nos processos/PFMEA?
- e) Qual a relação entre Indústria 4.0 e automação?
- f) Qual a relação entre Lean Manufacturing e automação?

Os títulos e resumos foram analisados buscando artigos capazes de responder as perguntas citadas anteriormente. No Quadro 1 são exibidos os dados dos 19 artigos selecionados para análise detalhada.

Quadro 1 – Artigos analisados

Nº	Autor	Ano	Título	Periódico
1	Panyukova, <i>et al.</i>	2023	<i>Creating a Team for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)</i>	Russian Engineering Research
2	Azamfirei, Psarommatis e Lagrosen	2023	<i>Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach</i>	Journal of Manufacturing Systems
3	Fortes, Tenera e Cunha	2022	<i>Engineer-to-Order Challenges and Issues: A Systematic Literature Review of the manufacturing industry</i>	Procedia Computer Science
4	Ionescu, <i>et al.</i>	2022	<i>A model for Monitoring of the 8d And FMEA Tools Interdependence in the Era of Industry 4.0</i>	International Journal of Modern Manufacturing Technologies
5	Amrutha, Ajinkya e Surabhi	2021	<i>Application of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) in Automated Spot Welding Process of an Automobile Industry: A Case Study</i>	Journal of Engineering Education Transformations
6	Panagiotopoulos, Karathanasopoulou e Dimitrakopoulos	2021	<i>Risk Assessment in the Context of Dynamic Reconfiguration of Level of Driving Automation in Highly Automated Vehicles</i>	2021 International Conference on Computational

				Science and Computational Intelligence (CSCI). IEEE
7	Cannas e Gosling	2021	<i>A decade of engineering-to-order (2010–2020) Progress and</i>	International Journal of Production Economics
8	Haughey e Train	2020	<i>The Impact of Manufacturing Errors on Product Defects</i>	2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE.
9	Schulzea e Dallasegaa	2020	<i>Industry 4.0 Concepts and Lean Methods Mitigating Traditional Losses in Engineer-to-Order Manufacturing with Subsequent Assembly On-Site: A Framework</i>	Procedia Manufacturing
10	Antonelli e Stadnicka	2019	<i>Predicting and preventing mistakes in human-robot collaborative assembly</i>	IFAC-PapersOnLine
11	Hofig, <i>et al</i>	2019	<i>A Meta-model for Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA)</i>	IEEE Int. Conf. on Emerging Tech. and Factory Automation (ETFa)
12	Baghbania, Iranzadeha e khajeh	2019	<i>Investigating the relationship between RPN parameters in fuzzy PFMEA and OEE in a sugar factory</i>	Journal of Loss Prevention in the Process Industries
13	Sharma e Srivastava	2018	<i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation: A Literature Review</i>	Adv Res Aeronaut Space Sci
14	Vollmar, Gepp & Schertl	2017	<i>The future of Engineering – Scenarios of the future way of working in the engineer-to-order business</i>	Annual IEEE International Systems Conference (SysCon).
15	Lundgrena, Hedlindb e Kjellberga	2015	<i>Model-driven Process Planning and Quality Assurance</i>	Procedia Cirp
16	Gepp, Gölzer e Grobholz	2015	<i>Engineer-to-Order Companies are Reserved on Adoption of Current Engineering Trends – An Empirical Study</i>	IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering

				Management (IEEM)
17	Kolberg e Zühlke	2015	<i>Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies</i>	IFAC-PapersOnLine
18	Shah, <i>et al.</i>	2013	<i>A Process-Oriented Risk Assessment Methodology for Manufacturing Processes</i>	IFAC Proceedings Volumes
19	Saurin, Ribeiro e Vidor	2012	<i>A framework for assessing poka-yoke devices</i>	Journal of Manufacturing Systems

Fonte: elaborada pela autora

O

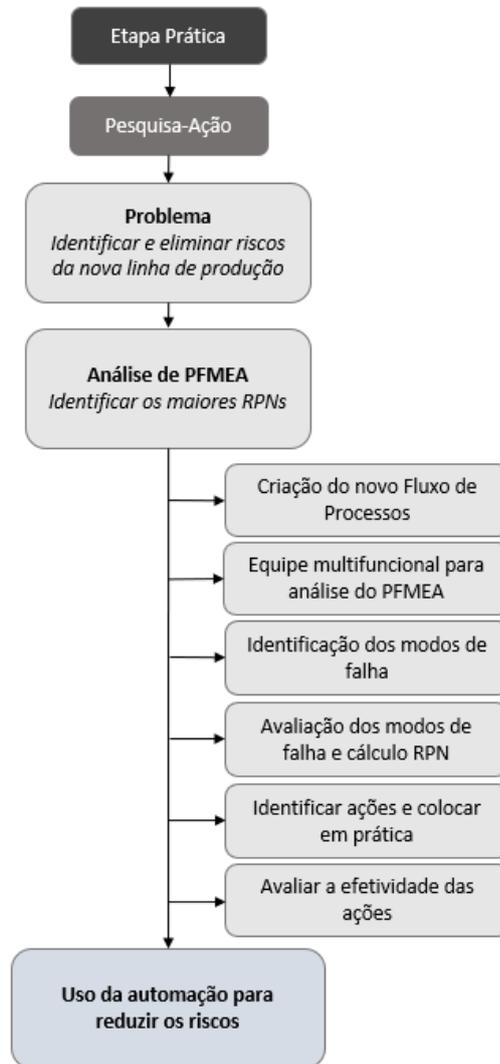
Quadro 2 relaciona as perguntas de pesquisa com os artigos utilizados para respondê-las ao longo dos resultados, que são apresentados na Seção 3.

Quadro 2 – Relação entre perguntas e artigos revisados

<b>Pergunta</b>	<b>Artigos utilizados (nº)</b>
O que é PFMEA e como ele é aplicado?	1, 4, 6, 8, 10, 13, 15 e 18
O que é RPN e como reduzir os defeitos a partir da sua utilização?	4, 5, 6, 8, 12, 13 e 18
Qual o diferencial de uma linha ETO?	3, 9, 14 e 16
Como é o cenário de uma fábrica manufaturada?	3, 7, 9, 14, 15 e 16
Como a automação pode auxiliar nos processos/ PFMEA?	2, 5, 6, 9, 10 e 11
Qual a relação entre Indústria 4.0 e automação?	4, 5, 9 e 17
Qual a relação entre Lean Manufacturing e automação?	9 e 17

Fonte: elaborada pela autora

Figura 2 – Etapas da pesquisa-ação



Fonte: elaborada pela autora

Para a pesquisa-ação, a partir do problema identificado foram definidas as próximas etapas considerando o necessário para realizar a análise do PFMEA de forma adequada. A Figura 2 ilustra as etapas seguidas na pesquisa-ação. Na Seção 3 são apresentados os resultados teóricos, explicando conceitos de FMEA, RPN, Produção ETO, Indústria 4.0 e *Lean Manufacturing* e na Seção 4 são apresentados os resultados da pesquisa-ação realizada, mostrando como a análise do PFMEA foi realizada, quais os altos RPN identificados, as soluções propostas para redução dos riscos e os resultados da implementação de ações. Por fim, as referências são listadas.

### 3 RESULTADOS TEÓRICOS

Esta seção descreve os conceitos teóricos de PFMEA que são importantes para auxiliar na identificação dos modos de falha da linha de produção estudada na pesquisa-ação. Também são abordados os conceitos de *Engineering to Order*, manufatura enxuta e *poka-yoke*, conceitos base para entender o contexto da empresa e objetivos do trabalho.

#### 3.1 PFMEA

Nas últimas duas décadas e cada vez mais, a qualidade têm mudado de uma abordagem corretiva para uma abordagem holística que foca na prevenção de defeitos e a importância dos métodos e ferramentas utilizados na indústria automotiva para gestão de qualidade é indiscutível (Lundgren, *et al*, 2014). Pode-se entender a eliminação de defeitos como base da estratégia de produção da metodologia *Lean* (Antonelli e Stadnicka, 2019) e a clássica abordagem de FMEA é utilizada para entregar produtos de alta qualidade e otimizar sistemas de produção (Hofig, *et al*, 2019). Dentre os benefícios da ferramenta, é possível citar a prevenção de falhas, identificação de aspectos críticos do processo, design e áreas de controle, melhoria contínua e otimização de custos (Amrutha, *et al*, 2021).

Conforme descrito por Sharma, 2018, o FMEA é uma metodologia sistemática para identificar e prever problemas antes que aconteçam. Surgiu na área militar nos estados unidos, no fim da década de 40, foi aplicado à indústria aeroespacial nos anos 60 e chegou à indústria através de Ford, no final dos anos 70, sendo uma ferramenta para medir a confiabilidade dos produtos e processos.

A metodologia FMEA pode ser aplicada a um processo (*Process FMEA*) ou ao projeto do produto (*Design FMEA*), contemplando as partes técnicas funcionais do produto em análise), com o objetivo de identificar possíveis modos de falhas (riscos associados) e realizar uma análise qualitativa para determinar a confiabilidade do produto/processo analisado (Panagiotopoulos, *et al*, 2021).

A análise de PFMEA consiste de três fatores: Severidade, Ocorrência e Detecção. A severidade é um número associado ao impacto e criticidade do modo de falha avaliado, considerando o ponto de vista do cliente em relação ao seu produto. A ocorrência é associada a causa do modo de falha, sendo a forma de controle dessa

causa, resultando na probabilidade de ocorrência da falha. A detecção, por sua vez, é dada de acordo com a chance de não-detecção da falha ao longo do processo produtivo (Haughey e Train, 2020). Os três elementos são avaliados e atribuídos valores de forma independente, ou seja, o valor de severidade independe dos valores de detecção e ocorrência, o inverso também é verdadeiro para ambos os fatores.

A partir da avaliação dos três fatores, é possível calcular o número de prioridade de risco, ou RPN, *risk priority number* (Ionescu, *et al*, 2022). O RPN fornece uma avaliação de criticidade dos modos de falha avaliados, e é calculado a partir da multiplicação dos três fatores, como demonstrado em (1).

$$RPN = S * O * D \tag{1}$$

O RPN permite classificar os modos de falha por sua criticidade, indicando quais as etapas do processo têm mais chances de falhar e afetarem o cliente. A partir da avaliação do RPN, devem-se definir ações para robustecer o processo, seja melhorando os controles das causas da falha, diminuindo assim a ocorrência, ou melhorando a forma de detecção das falhas, diminuindo a chance de não-detecção (Haughey e Train, 2020). O principal objetivo de utilizar o PFMEA é reduzir as falhas baseado em sua prioridade (Amrutha, *et al*, 2021).

No artigo publicado por Soleyman Iranzadeh, *et al*, 2019, demonstra-se como o uso do PFMEA aplicado à análise de falhas que influenciam no OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) de uma máquina do processo de produção de açúcar, em conjunto com a metodologia *Fuzzy* para de priorização riscos, atingiu o aumento em 6.05% do OEE. Demonstrando efetividade em avaliar riscos e aplicar ações preventivas a fim de diminuir as falhas.

Outros exemplos de aplicação da metodologia de PFMEA são comuns fora da indústria automobilística e aeroespacial, como o caso apresentado por Amrutha *et al* (2021), que aplica a ferramenta a fim de diminuir a incidência de falhas devido a comunicação entre homem e máquina em uma célula de soldagem a ponto de trabalho colaborativa.

As buscas possibilitaram o entendimento da metodologia e a preparação do leitor para a etapa de pesquisa-ação que é descrita na seção 4. Os resultados encontrados nos principais trabalhos analisados são exibidos no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados de diferentes aplicações de FMEA

<b>Autor</b>	<b>Local</b>	<b>Resultados apresentados</b>
Haughey e Train, 2020	Aplicação de FMEA de modo geral	Aborda a relevância da redução dos erros de manufatura nas indústrias e aborda a metodologia detalhada em 6 passos de como realizar um FMEA.
Antonelli e Stadnicka, 2019	Célula de montagem colaborativa entre humano e robô	Propostas de PY para reduzir a incidência de falhas em uma célula de montagem colaborativa entre humano e robô.
Ionescu, <i>et al.</i> , 2022	Automação de metodologia de FMEA e 8D	Explicação relacionada ao uso do PFMEA e propõe um sistema automatizado para integrar ferramentas da qualidade e acelerar a resposta ao cliente.
Amrutha, Ajinkya e Surabhi, 2021	Processo de solda automatizado	Aplicação de PFMEA em um cenário de automação. Identificaram dez falhas no processo automatizado e três no processo manual, com base nos riscos, propuseram ações para reduzir as falhas.
Panagiotopoulos, Karathanasopoulos e Dimitrakopoulos, 2021	Avaliação de risco no contexto de veículos altamente automatizados	Aplicação de FMEA para o cenário de veículos altamente automatizados. Concluíram que a metodologia FMEA é um método válido para identificar e avaliar a segurança e confiabilidade no nível de automação da direção.
Baghbania, Iranzadeh e khajeh, 2019	Aplicação de PFMEA para aumentar a eficiência de máquina	Aplicação de PFMEA em junção com a metodologia <i>Fuzzy</i> resultaram em aumento de 6.05% do OEE com as ações sendo tomadas.
Azamfirei, Psarommatis e Lagrosen, 2023	Aplicação de automação para redução de defeitos	Revisão bibliográfica do uso de automação para zero defeitos. Foram apresentados resultados referentes a 145 artigos, relacionando diferentes segmentos e metodologias aplicadas em busca de zero defeitos de manufatura.

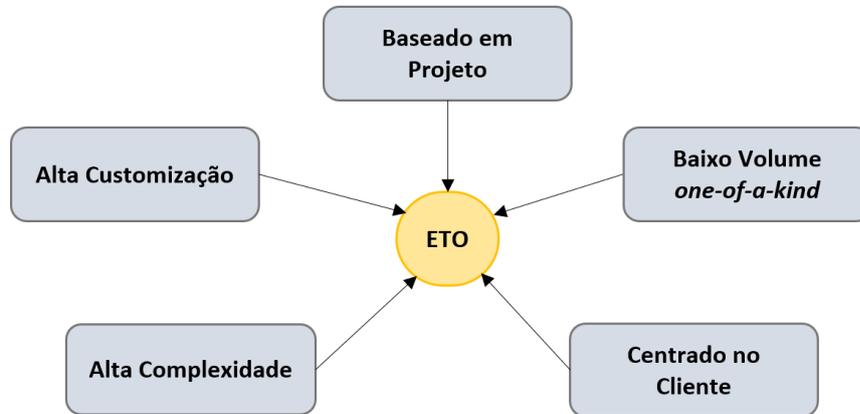
Fonte: elaborada pela autora

### 3.2 PRODUÇÃO ETO

Para o cenário estudado é importante destacar o conceito de uma produção “*Engineering to order*” (ETO). De acordo com Fortes, Tenera e Cunha (2022), companhias ETO são comumente dedicadas a manufaturar produtos complexos com componentes de engenharia relevantes e alto valor agregado, e suas principais características são alta customização, alta complexidade (alto valor agregados aos

produtos), baseado em projeto, centrado em cliente, baixo volume ou “*one-of-a-kind*” (um de cada tipo). Essa estrutura é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Características principais de ETO



Fonte: Adaptada de Fortes, *et al*, 2022

Segundo Vollmar *et al* (2017), diferentemente de uma produção seriada, onde o volume produzido pode chegar a centenas ou milhares de máquinas ou carros, empresas ETO são responsáveis pelo projeto, fabricação e construção de soluções industriais, como usinas de energia ou plataformas de petróleo. Assim, os autores também destacam que a engenharia possui função central nas atividades de fábricas ETO, adaptando os componentes e sistemas necessários para atender às especificações do cliente.

Um ponto relevante citado por Vollmar *et al* (2017), no contexto de tendências de empresas ETO, é que apesar de as tecnologias digitais e sistemas de automação serem parte essencial da produção industrial, em comparação a indústrias automotivas, as companhias ETO ainda estão iniciando o caminho da digitalização. Durante a pesquisa realizada com 30 especialistas da indústria ETO alemã apresentada em Gepp, Gölzer e Grobholz (2015) os requisitos que nasciam com a indústria 4.0 ainda não eram entendidos pelas empresas entrevistadas. O artigo cita também que os poucos requisitos da Indústria 4.0 que era atendidos, vinham de requisições de cliente, o que reforça a tendência de mercado nesta direção. Uma revisão de progresso e assuntos emergentes da última década (2010-2020), focado na cadeia de suprimentos para empresas ETO, realizada por Cannas e Gosling (2021), apontou a indústria 4.0 e outros temas impulsionados pelos desenvolvimentos

tecnológicos como emergentes nesse período e como desafios a serem estudados para a próxima década.

Durante as discussões do cenário apresentado, serão abordados vantagens e desafios identificados na empresa ETO em relação a indústria 4.0, em um cenário dedicado à produção de painéis de média tensão.

### 3.3 INDÚSTRIA 4.0 E LEAN MANUFACTURING

A indústria 4.0 pode ser definida como junção entre conceitos e tecnologias que combinam fatores físicos, digitais e humanos de forma a transformar produção industrial, permitindo processos novos e mais eficientes (Schulzea e Dallasegaa, 2020).

No cenário atual onde a garantia da qualidade de manufatura é um fator crítico para as indústrias, a automação, as rápidas transformações tecnológicas e a indústria 4.0 são capazes de aproximar as empresas de cenários de zero defeitos de manufatura (Azamfirei, *et al*, 2023).

O conceito de *Lean Manufacturing* ou Manufatura Enxuta também pode ser destacado neste contexto. Com origem nos anos 50 na Toyota, pode ser descrito como uma integração de métodos e princípios para organizar a produção de forma a reduzir o tempo de processo, reduzir desperdícios e aumentar a qualidade (Kolberg e Zühlke, 2015).

Os autores Schulzea e Dallasega (2020) relacionaram as perdas tradicionais de um cenário ETO com conceitos de *Lean Manufacturing* e da Indústria 4.0, apontando ferramentas capazes de mitigar estas perdas. No artigo, foram apontados trabalho padronizado, *Just-in-Time* e *Poka-Yoke* como práticas do Lean para reduzir perdas causadas no processo de fabricação. Em relação a Indústria 4.0 foram citados robôs, RFID, Sistema de Gerenciamento de Informação, Realidade Aumentada/Realidade Virtual. Os conceitos mencionados que são mais relevantes para o trabalho em questão serão descritos na sequência.

Uma das ferramentas relacionadas à melhoria da qualidade, o *poka-yoke* (PY), ou “a prova de erros”, possui várias definições, como abordado por Saurin *et al.* (2012) e pode ser definido como um dispositivo que previne a ocorrência de defeitos, de forma a garantir que a operação/montagem será realizada de forma correta. É

utilizado para checar em avanço erros no processo de produção ou montagem (Schulzea e Dallasega, 2020).

O *just-in-time* (JIT) garante que os materiais corretos serão entregues no local adequado e na quantidade necessária para a produção (Schulzea e Dallasega, 2020). Sem gerar superprodução (um dos principais desperdícios mapeados pelo *Lean*) e sem falta de material.

A empresa estudada tem com parte de sua cultura a aplicação de conceitos do *Lean Manufacturing*, a redução dos desperdícios, com destaque para a redução de defeitos.

## 4 PESQUISA-AÇÃO NA EMPRESA DE PAINÉIS DE BAIXA E MÉDIA TENSÃO

Esta seção descreve o contexto da empresa estudada, da linha de produção utilizada como objeto de estudo, as análises realizadas utilizando a metodologia PFMEA, os principais riscos identificados e por fim, a solução proposta para reduzi-los. Por questões de confidencialidade, algumas informações foram adaptadas, visando preservar a identidade da empresa. Os materiais que foram coletados da empresa serão divulgados sem o nome da mesma.

### 4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA EM ESTUDO

A pesquisa-ação foi realizada em uma empresa fabricante de equipamentos de baixa e média tensão na unidade de Santa Catarina, sendo uma empresa ETO, que assim como mencionado na seção 3.1.2, trabalha com projetos customizados de acordo com a necessidade do cliente.

Dentre os seis principais produtos ofertados pela empresa, cinco se encaixam na categoria de ETO e um na categoria CTO (*Configured-to-order*), que pode ser entendido como uma oferta com aproximadamente 20% de liberdade de customização a pedido do cliente. Destes produtos, um consiste em um painel de baixa tensão, quatro produtos são painéis de média tensão, sendo dois destinados para redes de distribuição primária e dois para redes de distribuição secundária e uma linha de produtos. O produto foco de estudo será descrito na seção 4.1.1.

A empresa está em operação desde 1976, tendo sido adquirida pelo grupo ao qual pertence em 2010. A unidade pertence a uma multinacional especialista em gestão de energia com sede em mais de 100 países e em Blumenau, conta com aproximadamente 230 funcionários e 120 terceiros.

O *Lean Manufacturing* faz parte da realidade da empresa em todos os aspectos produtivos, desde o *layout* da instalação, até a organização de gestão de equipes e aplicação de metodologias do *Lean* como o *Value Stream Mapping*, por exemplo. Em 2022, a unidade produtiva obteve o título de *Smart Factory*, sendo a primeira da América Latina a atingir o feito, devido a quantia do uso de ferramentas digitais em suas linhas de produção, a melhoria contínua ligada a conectividade e

tecnologias e à quantidade de informações monitoradas em relação aos indicadores de consumo de energia, gás e água.

Além disso, a empresa tem comprometimento com sustentabilidade, com objetivo de zerar a emissão de carbono até 2030, se tornar cada vez mais atrativa para exportações e servir de exemplo para outras unidades da companhia, para fornecedores e clientes.

#### 4.1.1 O produto e a linha de produção

O estudo foi realizado sobre um dos principais produtos, um painel de média tensão isolado a ar que atende até 24kV, destinado às redes de distribuição secundária e instalações de redes comerciais e industriais, em conformidade com ABNT IEC 62271-200. Na Figura 4 é ilustrado um painel para representar o produto em questão.

Figura 4 – Painel de Média Tensão



Fonte: Manual técnico do produto

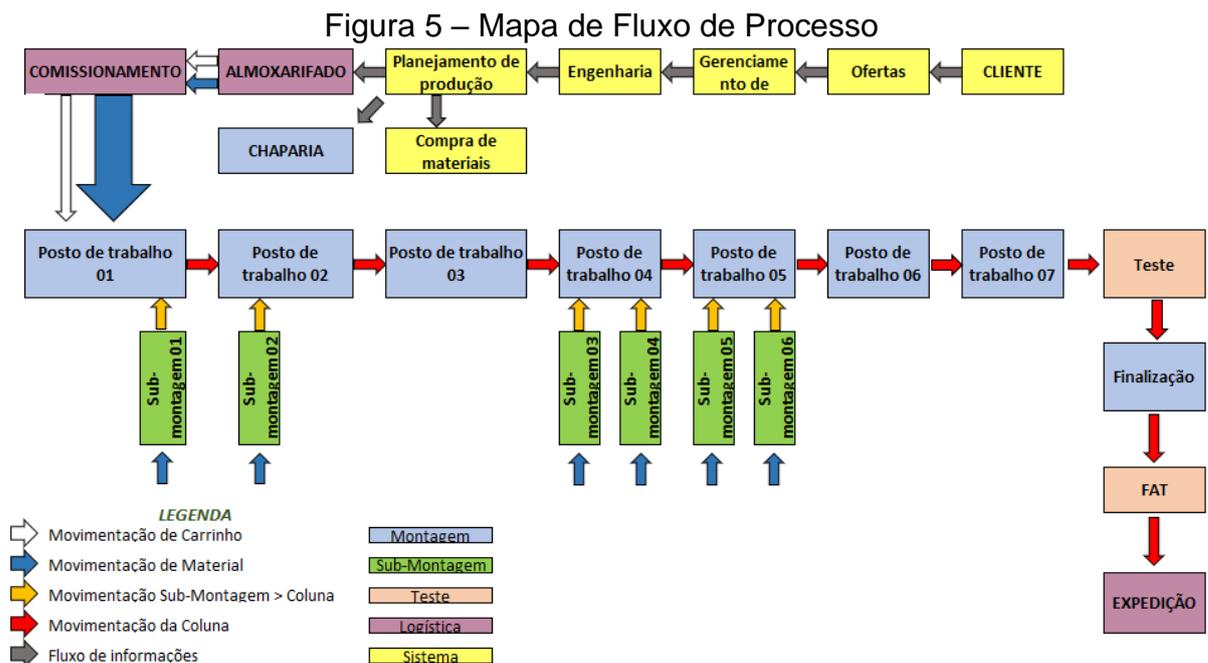
A Figura 4 exibe alguns modelos de painéis de média tensão. Estes painéis são utilizados para fazer a comunicação entre a linha de distribuição e a instalação do cliente, os painéis são modulares e adaptáveis a necessidade do cliente. Existem cubículos destinados à comutação (*switching*), transição e medição. Os cubículos de comutação, ou unidades seccionadoras, funcionam como entrada da distribuição

principal (cubículos de entrada) e são conectados a cubículos de transição e medição. Os cubículos de transição são utilizados para interligar painéis com diferentes saídas e os cubículos de medição realizam o monitoramento da rede, fornecendo informações necessárias para manter o sistema elétrico funcionando adequadamente.

A parte superior do painel é o compartimento de barramentos, que conectam a seccionadora, localizada na caixa “central”. Nesta área podem ser utilizadas manoplas para acionamento manual da seccionadora, por isso os encaixes (áreas circulares). A parte inferior do painel é o compartimento de conexão, a conexão da seccionadora, com porta-fusíveis ou conexões para disjuntores, entre outros componentes elétricos.

Este produto já é comercializado na empresa, mas não na unidade estudada, e o estudo foi conduzido na etapa de industrialização deste equipamento, o que exigiu uma adaptação da linha de produção existente para contemplar a nova oferta. Os processos descritos aqui fazem parte da adequação da empresa para estar apta a produzir e vender esse modelo de painel.

O primeiro passo realizado no caso foi a confecção do Mapa de Fluxo de Processo, ou *Process Flow Diagram* (PFD), considerando o fluxo de produção desta nova oferta. O PFD servirá também como base para a construção da análise do PFMEA. A Figura 5 ilustra o fluxograma desenvolvido.



Fonte: Autora e colaboradores da empresa

A construção do PFD é realizada a partir do fluxo de processos do produto, desde o momento em que o cliente realiza o pedido (fluxo de informação e etapas realizadas no sistema, ilustrado por retângulos amarelos e flechas cinzas, no topo do fluxograma), contemplando o fluxo de materiais (compra e movimentação física pelas áreas de logística, ilustrado nos retângulos roxos), as montagens e realizadas nas estações e subestações de trabalho (ilustradas em azul e verde, respectivamente), passando pelas etapas de testes (em cor bege) e finalizando com o produto “pronto” para a entrega ou retirada do cliente, novamente uma etapa logística.

Durante o PFD identificou-se que a montagem completa seria realizada ao longo de oito estações de montagem e seis subestações, uma etapa de teste padrão e uma etapa de *Factory Acceptance Test* (FAT ou Teste de Aceitação de Fábrica), que são os testes realizados com o equipamento finalizado e podem ser acompanhados pelo cliente.

A principal diferença entre o produto em questão dos produtos já fabricados na unidade de Blumenau é a tecnologia utilizada, visto que o equipamento conta com um interruptor de média tensão isolado a ar, diferentemente dos outros interruptores utilizados em outras linhas.

#### **4.1.2 Aplicação do PFMEA**

O PFD é a base para o PFMEA, a partir da identificação das etapas de processo é possível reunir a equipe para levantar os modos de falha relacionados a cada etapa.

Para a avaliação dos modos de falhas, construiu-se um time diverso de profissionais, contemplando especialmente a área produtiva, um responsável técnico do produto, um responsável de testes, um responsável de métodos e processos, um responsável do setor de qualidade, um responsável pela manutenção e um responsável pelo gerenciamento do projeto. É necessária uma equipe capaz de entender e discutir sobre as diversas etapas, que tenham conhecimento prévio em relação a dados históricos e que estejam preocupados com a qualidade das entregas.

Na empresa em questão, o Engenheiro de Qualidade é responsável por conduzir as seções de PFMEA em conjunto com a equipe, que deve ser composta de um Engenheiro de Suporte Técnico, responsável pelo conhecimento técnico sobre o produto, um Engenheiro Industrial, especialista em métodos e processos da linha de

produção, o Líder de Produção e/ou montadores experientes, que conhecem a realidade da fábrica e um Inspetor de Testes, experiente nos procedimentos de teste e também em partes técnicas do produto, esses são os personagens chave para a aplicação da metodologia. A depender dos modos de falha identificados e do escopo de algumas operações, pode ser necessário contatar responsáveis de Logística, Engenharia Mecânica ou Elétrica, Manutenção, Segurança ou demais áreas envolvidas no processo, o que é realizado quando surge a necessidade.

Junto com a equipe, foram levantados 318 modos de falhas para serem analisados, sendo apenas 8 deles relacionados a parte de fluxo de informações, 310 relacionados a linha de produção ou a movimentações logísticas. Os riscos identificados em relação a fluxo de informações e logística são em geral outros aplicáveis a outras ofertas da unidade, portanto, já existem modos de controle e medidas preventivas instaladas que são aplicáveis ao produto sendo analisado. O estudo em questão tem foco nos modos de falha e análises realizadas em relação a linha de produção.

#### 4.1.2.1 Critérios utilizados

A metodologia de PFMEA é realizada na empresa de acordo como descrito na Seção 3.1, mas a empresa determina algumas particularidades quanto à avaliação dos fatores de Severidade, Ocorrência e Detecção.

Enquanto na metodologia padrão os valores podem variar de 1 a 10, na companhia são determinados 5 níveis para ranquear a Severidade e apenas 4 níveis para ranquear Ocorrência e Detecção. No Quadro 4 são exibidos os critérios considerados para severidade.

Quadro 4 – Critérios utilizados para severidade

Severidade	Nível	Efeito da falha no cliente usuário final (ou interno)	Características afetadas
1	Imperceptível	<b>Indetectável pelo cliente.</b> Potencial Efeito de Falha: Nenhum efeito perceptível na funcionalidade do produto. <i>É improvável que o cliente esteja ciente disso</i>	Estética de conveniência (exceto quando necessário em produto específico)

4	Desempenho	<p><b>Continua funcionando.</b> Potencial Efeito de Falha: Alguma degradação do produto no nível do subsistema, mas o desempenho dos sistemas principais não é afetado. <i>O cliente está desconfortável ou irritado.</i></p>	Degradação da função secundária e/ou subsistema
7	Funcionamento	<p><b>Suporte no local é necessário.</b> Potencial Efeito de Falha: subsistemas inoperáveis ou degradação dos sistemas principais, e a funcionalidade principal do produto é menor do que as expectativas do Cliente. <i>A insatisfação do cliente é experimentada.</i></p>	Degradação da função principal (DPMi & ou MDR-MQD altamente impactado) ou persona CTQ
9	Danos materiais	<p><b>Grande impacto nos negócios do cliente, destruição de parte da instalação de inicialização impossível.</b> Potencial efeito de falha: Não conformidade com a regulamentação (risco de processo ou custo enorme) ou produto inoperável nos mais altos níveis do sistema, mas não está relacionado à segurança. <i>O cliente está altamente insatisfeito</i></p>	Integridade da propriedade e/ou parada de entregas
10	Segurança - Risco humano	<p><b>Apenas potencial problema de segurança.</b> Potencial Efeito de Falha: risco inaceitável de lesão ou dano à saúde humana. Isso inclui itens de não conformidade com a regulamentação que representam um potencial problema de segurança direto. <i>O cliente está em perigo.</i></p>	Integridade humana

Fonte: Material da empresa

Como demonstrado no Quadro 4, com estes cinco níveis é possível categorizar todos os efeitos de falha, que podem ser de severidade 1, indetectáveis pelo cliente, normalmente se tratando de um problema estético, severidade 4 onde o equipamento continua funcionando mas pode ter seus subsistemas ou funções secundárias degradadas, severidade 7 onde é necessário suporte em campo, tendo suas funções principais degradadas, ou então casos mais críticos, como severidade 9, onde a propriedade do cliente pode sofrer danos, ou severidade 10, que coloca a vida de pessoas em risco. Vale destacar que a empresa coloca em primeiro lugar a

segurança de seus colaboradores e seus clientes, portanto todas as severidades classificadas como 10 são motivo de alerta. No Quadro 5 são exibidos os níveis possíveis para ocorrência.

Quadro 5 – Critérios utilizados para ocorrência

Ocorrência	Nível	Efeito da falha no cliente usuário final (ou interno)
1	Quase incerta	<b>Ocorrência quase incerta.</b> Presença de um POKA-YOKE(Projeto ou Processo) OU Processo controlado com $Cpk > 1,66$ (capacidade de curto prazo) e depois com $Ppk > 1,66$ (capacidade de longo prazo). <i>Evento raramente acontece.</i>
4	Baixa	<b>Baixa ocorrência.</b> Montagem manual com JIG ou com assistência ao operador OU Montagem automática ou semiautomática controlada com $1,33 < Cpk \leq 1,66$ (capacidade de curto prazo) então com $1,33 < Ppk \leq 1,66$ (capacidade de longo prazo). <i>Evento às vezes acontece.</i>
7	Média	<b>Média ocorrência.</b> Montagem manual sem JIG ou montagem manual sem assistência do operador OU Montagem automática ou semiautomática, não capaz com $1 < Cpk \leq 1,33$ (capacidade de curto prazo) ou $1 < Ppk \leq 1,33$ (capacidade de longo prazo). <i>Evento muitas vezes acontece.</i>
10	Quase certa	<b>Ocorrência quase certa.</b> Processo não controlado e instável OU a capacidade não é conhecida OU $\leq 1$ . <i>O evento quase sempre acontece.</i>

Fonte: Material da empresa

Como ilustrado no Quadro 5, os critérios para ocorrência são bem delimitados e orientados ao processo, a ocorrência só poderá ser colocada para 1 na presença de PY ou capacidade controlada, a ocorrência deve ser ranqueada como 4 em casos de montagem manual com assistência de jiga, ou novamente capacidade controlada, a ocorrência média igual a 7 deve ser considerada para não se tem jiga para auxílio da montagem, ou ocorrência alta igual a 10 em casos de processo não controlado.

No Quadro 6 são exibidos os níveis possíveis para ocorrência.

Quadro 6 – Critérios utilizados para a detecção

Detecção	Nível	Efeito da falha no cliente usuário final (ou interno)
1	Quase certa	<p><b>Detecção quase certa.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 100% automático, semi-automático com CamC <math>\geq 4</math> e gage R&amp;R <math>\geq 90\%</math> OU</li> <li>- Jidoka.</li> </ul> <p><i>O cliente dificilmente vai enfrentá-lo.</i></p>
4	Média	<p><b>Média chance de detecção.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 100% automático ou semiautomático com <math>4 &gt; \text{Camc} \geq 3</math> e gage <math>90\% &gt; \text{R\&amp;R} \geq 80\%</math> OU</li> <li>- Verificação 100% manual com medida, gabarito ou medidor OU,</li> <li>- Inspeção visual 100% humana, somente se baixa quantidade (<math>&lt;100/\text{turno}</math>) com: <ul style="list-style-type: none"> <li>1- Especificação de controle não ambígua, gage R&amp;R <math>\geq 80\%</math>.</li> <li>2- O inspetor se dedica ao controle (sem auto controle).</li> <li>3- Validação formal do treinamento do inspetor treinado com gravação.</li> <li>4- A capacidade do inspetor é verificada em uma base regular com gravação.</li> <li>5- Resultado do controle é registrado: check-list com validação, sentinela, touchscreen, MES (Sistema de Execução de Manufatura) OU</li> </ul> </li> <li>- Inspeção por amostragem com estes dois pontos: <ul style="list-style-type: none"> <li>1- com medida, gabarito ou bitola.</li> <li>2- Controle Estatístico do Processo no parâmetro produto/peça.</li> </ul> </li> </ul> <p><i>O cliente às vezes vai enfrentá-lo.</i></p>
7	Baixa	<p><b>Baixa chance de detecção.</b></p> <p>Inspeção visual humana com 80 medidores <math>&gt;</math> atributos R&amp;R <math>\geq 70\%</math> OR, Auto-inspeção OU, 100% Auto ou semi auto com Camc <math>&lt; 3</math></p> <p><i>O cliente muitas vezes vai enfrentá-lo.</i></p>
10	Quase incerta	<p><b>Detecção quase incerta.</b></p> <p>Inspeção visual humana sem medição de gage R&amp;R <math>&lt; 70\%</math> OR,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Controle ineficaz OU,</li> <li>- Sem controle OU,</li> <li>- O defeito não é controlável ou não é aparente.</li> </ul> <p><i>O cliente certamente vai enfrentá-lo.</i></p>

Fonte: Material da empresa

Como representado no Quadro 6, os critérios para detecção também são orientados a processo e bem definidos para serem atendidos, para que a detecção seja 1 é necessário ser automático ou semiautomático com gage R&R ou *jidoka*

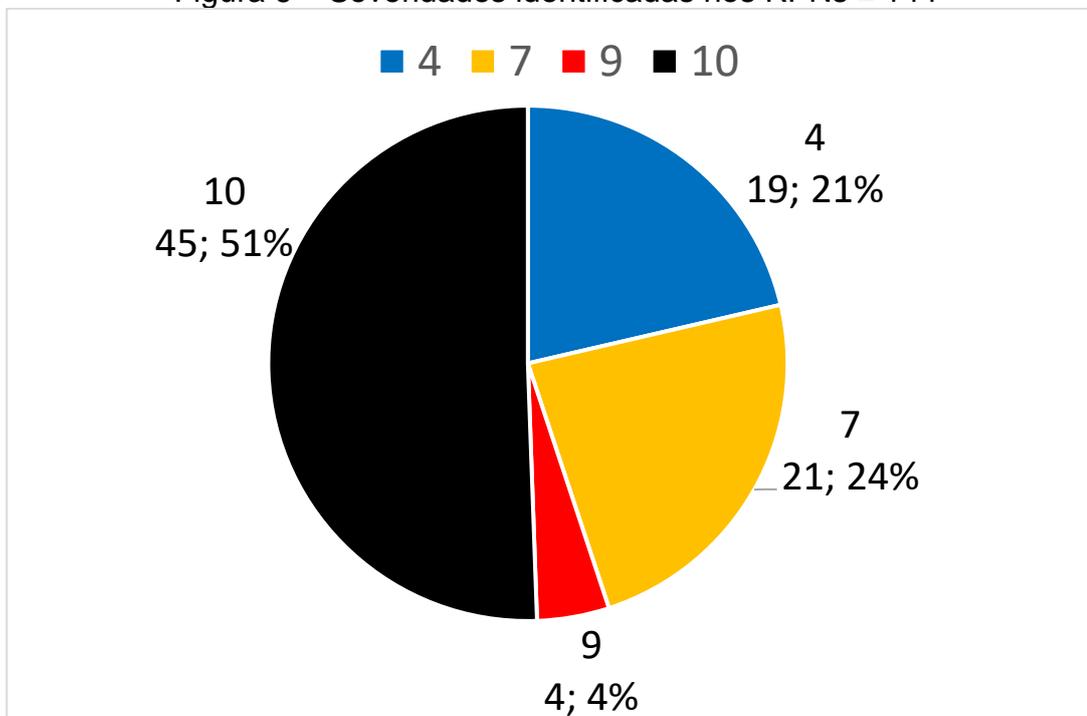
(detecção garantida com parada na identificação do erro), detecção média com valor de 4 deve ser inspeção manual com medição ou jiga, e caso seja inspeção visual precisa atender aos seguintes critérios: 1) sem ambiguidade, controlado por *gage* R&R (método de análise de repetibilidade e reprodutibilidade que avalia a confiabilidade das inspeções); 2) Inspeção dedicada; 3) Treinamento dedicado e validação formal; 4) habilidades de inspeção verificadas periodicamente; 5) Resultados registrados. Para chances baixas de detecção encaixam-se autoinspeção humana como detecção 7) e sem controle como detecção 10.

Todas as análises realizadas foram feitas com base nos critérios descritos acima.

#### 4.1.2.2 *Análise de modos de falhas*

Durante a análise dos modos de falhas, dos 310 relacionados a linha de produção ou logística, foram identificados 89 modos de falha que resultaram em RPN maior ou igual a 144, considerado crítico. Na Figura 6 é possível visualizar a distribuição das linhas alto risco identificadas agrupadas pela Severidade.

Figura 6 – Severidades identificadas nos RPNs  $\geq 144$



Fonte: Elaborado pela autora

Das 89 linhas de alto RPN, 70 são relacionadas a mesma estação de trabalho (78,6%), que é a estação responsável pela preparação e montagem do interruptor isolado a ar, tecnologia que é o diferencial do produto. Considerando apenas as linhas de severidade 10, das 45 mapeadas, 41 são referentes a esta mesma estação (91%). Estes dados são compilados na Tabela 1, exibindo a quantidade de riscos altos por estação de trabalho, dentre as estações em que foram identificados.

Tabela 1 – Análise de estações pelo RPN identificado

<i>Estação de trabalho</i>	RPNs ≥ 144		RPNs ≥ 144 & sev 10		RPNs ≥ 144 & sev 9	
<i>Estação de trabalho 01</i>	70	79%	41	91%	3	75%
<i>Estação de trabalho 02</i>	1	1%	0	0%	0	0%
<i>Estação de trabalho 03</i>	1	1%	1	2%	0	0%
<i>Estação de trabalho 05</i>	4	4%	0	0%	0	0%
<i>Estação de trabalho 06</i>	5	6%	2	4%	1	25%
<i>Sub-montagem 06</i>	4	4%	0	0%	0	0%
<i>Finalização</i>	4	4%	1	2%	0	0%
<i>Total</i>	89	100%	45	100%	4	100%

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 1 exibe que a segunda estação com maior número de RPNs altos identificados corresponde a apenas 6% do total, valor pouco significativo em comparação aos quase 80% da Estação de Trabalho 1. Isso pode ser explicado por dois fatores, sendo que o primeiro diz respeito à tecnologia diferenciada dos outros tipos de produto, enquanto alguns modos de falhas já são tratados em outras linhas de produção e os controles são aplicáveis também a nova linha, o novo isolador utilizado é um componente novo, não há ainda dispositivos adaptados para controlar as montagens relacionadas a ele. O segundo fator é em relação a criticidade do interruptor para o funcionamento do produto, sendo uma parte primordial para que o equipamento opere. Qualquer falha referente ao isolamento pode comprometer o funcionamento do equipamento todo, colocando em risco a propriedade e até a vida do cliente.

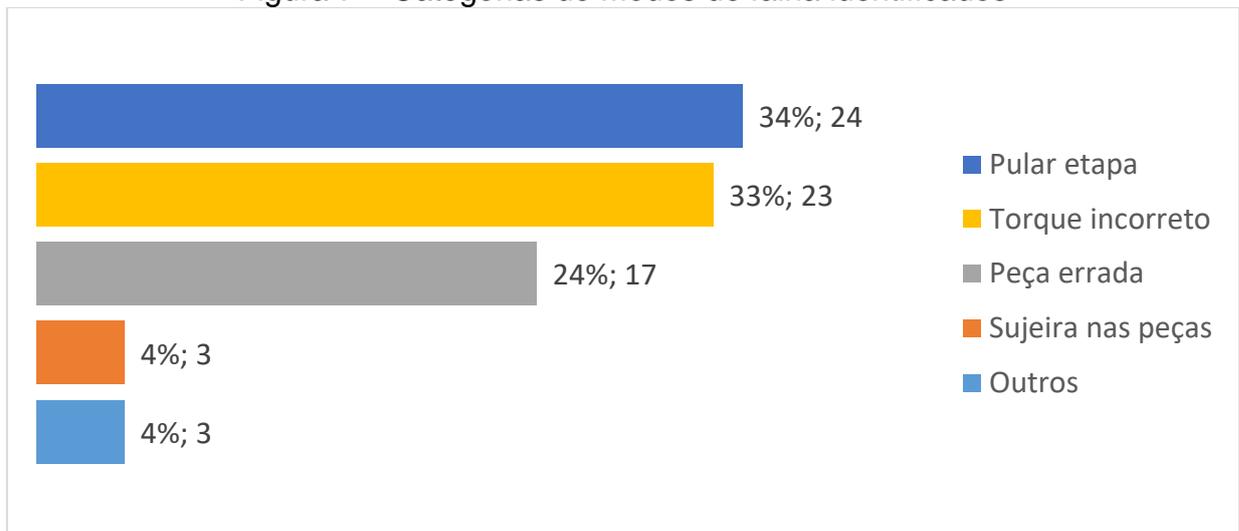
Devido à criticidade da estação e ao mapeamento corresponder a quase 80% dos altos RPN identificados, esta estação será o ponto principal de trabalho para a redução dos riscos. Além disso, dentre tantas funções realizadas nos produtos ETO, o interruptor a ar funciona como “core” do produto, e é padronizado na maioria dos

modelos, tendo algumas variações de posicionamento e dimensão, mas em geral, respeitando os mesmos procedimentos e passos.

#### 4.1.2.3 Principais riscos identificados

Diversos modos de falhas foram identificados ao longo da preparação do interruptor e da montagem do interruptor na estrutura do painel, apesar de serem identificadas em diferentes etapas do processo, os modos de falha apresentavam semelhança entre si mesmo se tratando de diferentes etapas ou estando relacionados com diferentes componentes, portanto, com o objetivo de verificar a repetibilidade dos possíveis problemas, os modos de falha foram agrupados em categorias genéricas que especificam o tipo de modo de falha. O resultado da categorização é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Categorias de Modos de falha identificados



Fonte: Elaborado pela autora

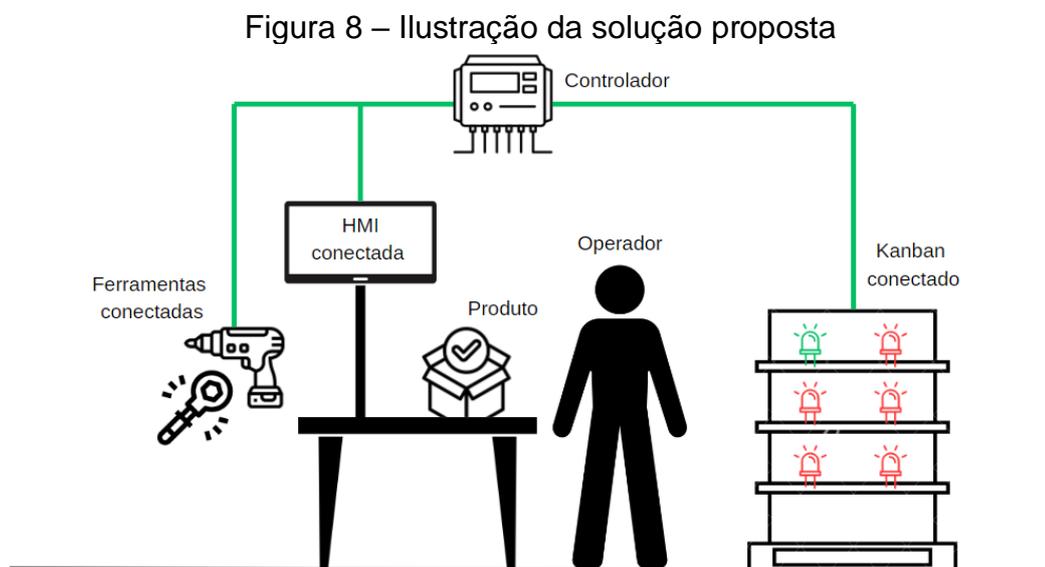
Assim como ilustrado na Figura 7, o principal modo de falha identificado é “Pular etapa”, que se dá pelo “esquecimento” do operador de algum componente específico, visto que o operador é humano. Neste caso, os componentes listados no PFMEA são avaliados como crítico para o funcionamento do produto. O segundo modo de falha mais identificado é “torque incorreto”, ou seja, o aperto das conexões. Como o interruptor é peça principal do funcionamento da coluna, todas as suas conexões precisam ser realizadas de acordo com a especificação, além disso, por seu

exterior ser feito de epóxi, a aplicação de torques acima do indicado pode quebrar ou danificar o equipamento, o que também é crítico para o produto. Escolher a peça errada também pode impactar o produto de forma crítica, por isso aparece como terceira categoria mais encontrada entre as com alto risco. As duas últimas categorias, com o mesmo número de incidência são “Sujeira nas peças”, especificamente para algumas preparações relacionadas a vedação do produto, e “Outros”, falhas específicas analisadas que não puderam ser agrupadas a uma categoria genérica.

#### 4.1.3 Solução proposta

Diante dos modos de falha identificados, considerando a repetibilidade, em especial, das três primeiras categorias levantadas, propôs-se uma solução de uma máquina com interface homem-máquina (HMI) integrada, responsável por seguir os passos de montagem necessários na estação em sincronia com o operador para resolver o problema de pular etapas. Nesta máquina, integraram-se ferramentas de controle automático de torque adaptáveis que se ajustam ao torque necessário ao longo da montagem para resolver o problema de torques incorretos, e por fim, um sistema de *kanban* com identificações luminosas que indicam ao operador os materiais que devem ser utilizados.

A Figura 8 exibe uma ilustração contendo todos os elementos propostos na solução, estes elementos serão descritos em detalhe nas subseções seguintes.



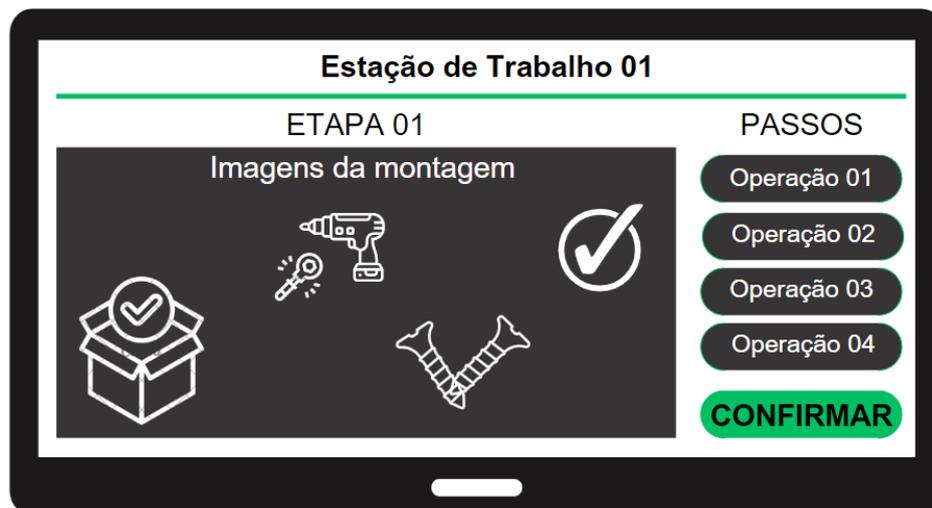
Fonte: Elaborado pela autora (Canva)

#### 4.1.3.1 Operações de trabalho sincronizadas

Para o modo de falha levantado em relação a esquecer componentes, a solução proposta foi integrar as operações realizadas pelo operador com um sistema digital que contém o roteiro de montagens que devem ser realizadas.

As instruções de trabalho são altamente utilizadas na empresa, mas exibindo através de uma HMI, a etapa de montagem que está sendo realizada, de forma específica, o operador pode visualizar melhor todas as etapas de montagem. Além disso, o sistema exige uma “confirmação” antes de passar para a próxima etapa, havendo intertravamento digital caso o operador não confirme que realizou a operação. Na Figura 9 é ilustrado a HMI mencionada.

Figura 9 – Exemplo de HMI



Fonte: Elaborado pela autora (Canva)

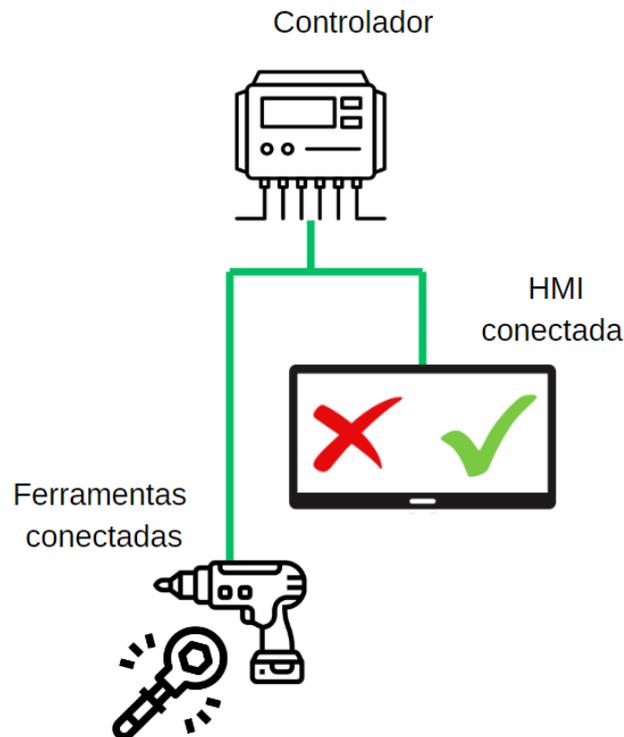
O intertravamento digital funciona como um *jidoka*, visto que caso a operação não seja concluída, o sistema não permite seguir para o próximo passo.

#### 4.1.3.2 Controle de torques integrado

Considerando que os torques são uma operação crítica, é indispensável integrar as operações com as ferramentas utilizadas. Neste caso, através do controlador, as ferramentas utilizam o torque programado de acordo com o roteiro e a própria ferramenta é capaz de detectar se o torque foi aplicado ou não, e a quantidade

de torques que foi aplicada, também comparando com a quantidade prevista no roteiro e travando a operação caso a quantidade ou a aplicação não estejam de acordo. Na Figura 10 são ilustrados os elementos que compõem esse subsistema.

Figura 10 – Conexão entre controlador, ferramentas e HMI



Fonte: Elaborado pela autora (Canva)

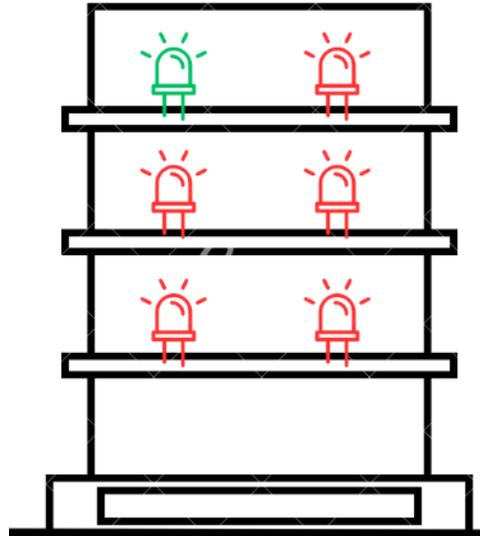
Como o sistema é integrado, o controlador indica ao operador qual a ferramenta e adaptador devem ser utilizados, mais uma vez, diminuindo a chance de erros, visto que caso o parafuso utilizado seja incorreto, não será possível encaixar a ferramenta e realizar a operação, causando bloqueio da máquina. Os bloqueios são liberados apenas com a autorização da equipe de manutenção.

#### 4.1.3.3 Kanban com sinalização luminosa – “Poka-pick”

Por fim, dado à recorrência de materiais críticos que podem ser confundidos, propõe-se um sistema com indicadores luminosos para o sistema de *kanban*. Na empresa, os materiais já são abastecidos em caixas de *kanban*, para otimizar seu fornecimento a linha de operação, a organização e a facilidade no acesso. A integração ao sistema com indicadores luminosos permite que o operador seja

direcionado ao local certo coletar o material adequado para a operação, uma prateleira de *kanbans* com indicadores luminosos é ilustrada na Figura 11.

Figura 11 – *Kanban* com indicação luminosa



Fonte: Elaborado pela autora (Canva)

Na empresa, esta solução foi apelidada de “*poka-pick*”, visto que emprega características de PY no quesito de diminuir os defeitos, mas ainda depende o operador para realizar o *pick*, coletar o material da caixa.

A solução proposta foi enviada a um fornecedor externo, especialista em automação, para desenvolver a solução completa e integrada, atendendo a todos os requisitos esperados para possibilitar a redução dos riscos mapeados. A Figura 12 exibe a foto da solução real desenvolvida pelo fornecedor.

Figura 12 – Solução desenvolvida

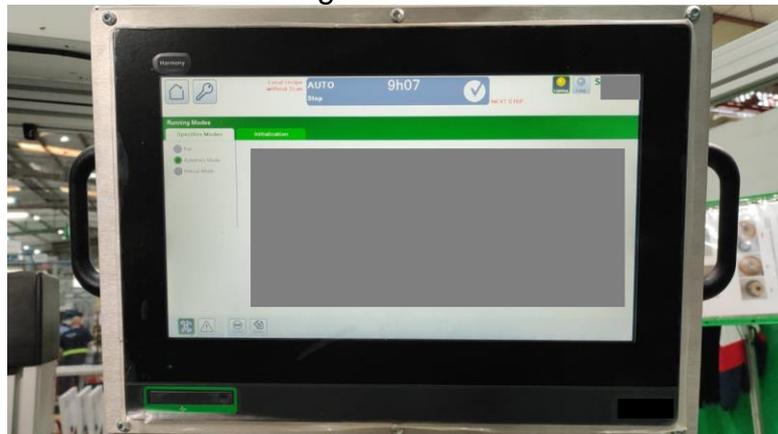


Fonte: Manual da máquina (fornecedor)

#### 4.1.4 Solução desenvolvida

Para o critério de sincronização das operações de trabalho a solução proposta foi uma HMI funcionando como *jidoka* para intertravamento digital. A Figura 13 mostra a HMI real implementada na máquina desenvolvida.

Figura 13 – HMI



Fonte: Autora (máquina da empresa)

A HMI é posicionada estrategicamente sobre o produto sendo montado, para garantir fácil acesso do operador durante a execução do trabalho. As etapas de montagem são exibidas passo a passo e de acordo com os critérios de PFMEA, a aplicação de um *jidoka* reduz o fator Detecção para 1, visto que sem a confirmação do operador de ter completado todos os passos o sistema bloqueia o avanço. Ou seja,

além de exibir a informação necessária de forma sincronizada e induzir o operador a seguir as operações, o sistema bloqueia caso isso não seja respeitado.

O controle de torques também é integrado a solução, na Figura 14 são exibidas as ferramentas conectadas a máquina. Para a aplicação do torque a HMI exibe ao operador qual ferramenta deve ser utilizada, o torque adequado é configurado pelo controlador de acordo com o roteiro das operações, o sistema libera para acionamento apenas a ferramenta correta e apenas permite a liberação da HMI para a próxima operação após detectar que o torque foi aplicado corretamente. Na Figura 15 é exibido o controlador responsável por configurar os valores de torque de acordo com as operações.

Figura 14 – Torquímetros disponíveis



Fonte: Autora (máquina da empresa)

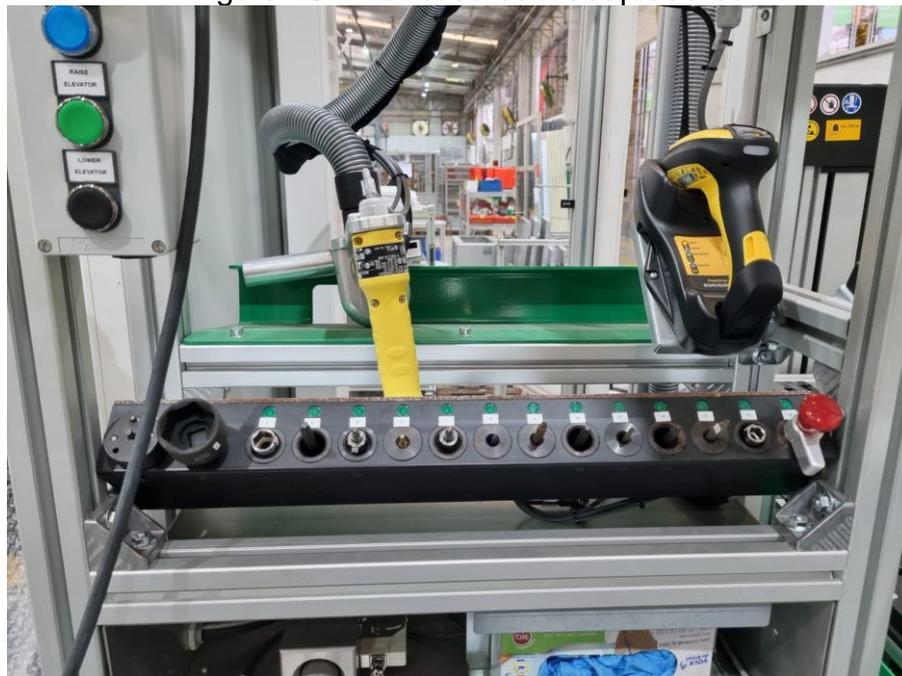
Figura 15 – Controlador do sistema



Fonte: Autora (máquina da empresa)

De acordo da etapa de montagem, o sistema indica também o adaptador (ponteira) a ser utilizado no torquimetro. Na Figura 16 é exibido a bancada com as diferentes opções de adaptador disponíveis, a HMI indica o número que deve ser utilizado e o indicador luminoso da bancada acende também.

Figura 16 – Bancada com adaptadores



Fonte: Autora (máquina da empresa)

Para garantir que as montagens foram realizadas com os parafusos adequados, o produto é projetado com parafusos de diferentes especificações (seja o encaixe da cabeça ou o diâmetro nominal) e o sistema, além de garantir a aplicação correta do torque, garante que o torquimetro será encaixado nos parafusos corretos. Para este caso, considerando os critérios de PFMEA, este sistema funciona como um PY, pois não permite que o operador utilize a ferramenta incorreta, ou seja, evita erros. Além disso, como a máquina confere se o torque foi aplicado com sucesso e bloqueia as operações seguintes caso haja algum problema, há um *jidoka* aplicado também, o que possibilita redução da Ocorrência e da Detecção para 1.

Outra parte da solução implementada é em relação ao uso adequado dos materiais, na Figura 17 é exibido uma imagem da estrutura utilizada para os *kanbans*, onde um identificador luminoso é posicionado em frente a caixa correspondente. Os

indicadores são conectados ao sistema e configurados de acordo com o roteiro da HMI, acendendo quando o operador deve realizar a montagem do material.

Figura 17 – *Kanban* com indicador luminoso



Fonte: Autora (sistema da empresa)

Essa solução faz com que a identificação do material independa do operador, sendo realizada automaticamente pelo sistema. Dentro dos critérios de PFMEA mapeados pela empresa, essa operação pode ser considerada um PY, reduzindo assim a Ocorrência para 1 e diminuindo o risco associado.

Outra ação identificada durante as discussões com o fornecedor é em relação ao modo de falha de “sujeira nos materiais”, ela diz respeito a partes específicas de vedação que são necessária a aplicação de graxa, uma ação tomada para melhorar o processo foi a criação de um espaço dedicado à preparação desses componentes com a adição de um ar-condicionado direcionado para esta área. A Figura 18 exibe o ar-condicionado instalado na estação.

Figura 18 – Ar-condicionado instalado na máquina



Fonte: Autora (máquina da empresa)

O espaço da bancada pode ser considerado como uma jiga, com encaixes específicos da montagem que podem auxiliar o operador a realizar de forma adequada. Essa jiga é exibida na Figura 19. Apesar da melhoria do processo, ficou sob discussão a validade desta ação como um PY.

Figura 19 – Jiga de montagem adaptada na bancada



Fonte: Autora (máquina da empresa)

A Figura 20 exibe a solução finalizada em operação.

Figura 20 – Máquina em operação



Fonte: Autora (máquina da empresa)

Com o uso da automação por meio de dispositivos conectados, HMI e indicações luminosas, a solução permitiu a melhoria dos processos. Desta forma, o operador trabalha em sincronia com o sistema e tem as chances de erro reduzida para as operações que deve realizar. Em cenários onde os processos manufaturados ainda são a maioria e os produtos não são completamente padronizados, uma solução colaborativa entre homem e máquina é capaz de reduzir a chance de erros permitindo a adaptabilidade com as diferentes peças, como o caso em questão, onde o roteiro da máquina pode ser adaptado para as particularidades dos diferentes modelos.

#### **4.1.5 Cenário pós implementação**

Com base nas soluções implementadas, a redução para os modos de falha identificados na Estação de Trabalho 1 é exibida na Tabela 2.

Tabela 2 – Redução de riscos na Estação de Trabalho 01.

<b>Modo de falha</b>	<b>Solução implementada</b>	<b>Quantidade de RPNs altos</b>	<b>Quantidade reduzida</b>	<b>Quantidade reduzida relativa</b>
<b>Pular etapa</b>	HMI sincronizada com as etapas de montagem - <i>Jidoka</i>	24	24	100%
<b>Torque incorreto</b>	Sistema integrado de torques - PY	23	23	100%
<b>Peça errada</b>	Kanban com indicador luminoso - PY	17	17	100%
<b>Sujeira nas peças</b>	Jiga de montagem adaptada com ventilação	3	0	0%
<b>Outros</b>	-	3	0	0%
<b>Total</b>	-	70	64	91%

Fonte: Elaborado pela autora

Considerando os modos de falha, foram reduzidos 91% dos riscos identificados na Estação de Trabalho 01. Dos 89 RPNs altos identificados na avaliação do PFMEA, a redução de 64 corresponde a 71,9% do total de altos riscos.

Considerando que o objetivo de 100% de redução dos RPNs altos com severidade 9 ou 10 (risco a propriedade ou risco humano), das 49 mapeadas, 44 eram em relação a Estação de Trabalho 01, mas apenas 40 foram reduzidas, resultando em 89,8% de redução total para as severidades altas. As quatro ações não puderam ter seu risco reduzido com a solução implementada, dois deles em relação a sujeira nas peças, que a solução proposta não foi considerada um PY, e dois deles relacionados a outros tópicos que não foram cobertos pelo sistema.

## 5 CONCLUSÃO

O principal objetivo do trabalho era relacionar a aplicação do PFMEA a uma linha de produtos manufaturados e reduzir os riscos identificados utilizando automação, o que foi possível ao longo do desenvolvimento. As perguntas de pesquisa que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho são discutidas a seguir.

Iniciando pelo conceito de PFMEA e sua aplicação, através dos artigos analisados, concluiu-se que o PFMEA é uma metodologia para identificação de possíveis modos de falha (erros ou defeitos) que podem resultar na insatisfação dos clientes, a metodologia pode ser aplicada a processos manufaturados e permite avaliar a confiabilidade deles, no trabalho em questão, a metodologia foi aplicada em uma linha de produção de painéis de média tensão, identificando os modos de falha presentes no processo.

Na sequência, para responder o que é RPN e como reduzir seus efeitos, com o trabalho prático, verificou-se que o RPN é resultado da análise do PFMEA, a junção da avaliação de Severidade (quão grave é o impacto da falha para o cliente), Ocorrência (quais os controles existentes que impedem que o modo de falha se concretize) e Detecção (caso o erro aconteça, qual a segurança de que será ser identificado internamente). O RPN indica os pontos de maior risco do processo, indicando onde os controles devem ser melhorados, pode ser utilizado para priorização de ações, se o processo não está controlado maior a chance de incidência de erros e insatisfação do cliente e o RPN direciona as ações para os pontos frágeis.

Quando se trata das características de uma linha de produção ETO, ao longo do trabalho foi possível compreender que são fábricas onde os produtos são customizados de acordo com a necessidade do cliente, o que demanda alto grau de manufatura nos processos e a intervenção do operador humano nas montagens.

Ao se considerar o papel da automação nos processos e no PFMEA, a automação é peça chave na diminuição da incidência de erros, visto que pode eliminar o fator “erro humano”. Especialmente em processos críticos que podem impactar o cliente, a automação é uma forma de conferir confiabilidade aos processos, para o caso em questão, na realidade ETO, a automação deve ser aliada aos processos manufaturados, unindo a flexibilidade do trabalho humano com o “zero-defeitos” garantido pela máquina.

Relacionando a automação com a Indústria 4.0, vale destacar que a base da Indústria 4.0 consiste na união das tecnologias aos fatores humanos e a automação pode ser utilizada como ponte para isso. A solução proposta, sendo uma máquina com IHM acompanhando o processo de montagem com intertravamento, indicando os passos de montagem para o operador humano, interligando ferramentas para controle de torque e indicações luminosas, reduz a chance de erros em operação pois adiciona o fator “máquina/zero-defeitos” a operações que envolvam tomadas de decisão, tornando o processo mais confiável.

Por fim, relacionando a automação com o *Lean Manufacturing*, visto que a *redução* dos desperdícios é um princípio do *Lean Manufacturing*, sua aplicação a uma linha de produção garante que a automação será aplicada de forma eficiente, unindo a redução dos desperdícios à tecnologia. A solução proposta na etapa de pesquisa engloba conceitos de *Lean Manufacturing* (inclusive o conceito de PY, por exemplo) e da Indústria 4.0, aplicando automação de forma estratégica no processo.

Essa pesquisa mostrou a automação de forma sistêmica, integrando projeto, gestão, qualidade e relacionamento com uma equipe multidisciplinar na resolução de um problema. Esses critérios completam o perfil de um engenheiro conectado com as necessidades de mercado por solucionar problemas reais, utilizando o conhecimento técnico como meio de trazer vantagens para a empresa, para o cliente e para o processo.

Entretanto, o problema de pesquisa que motivou o trabalho foi a redução de 100% dos altos RPNs com severidades altas identificados na linha de produção em questão e a solução proposta foi capaz de reduzir apenas 89,9% dos riscos de severidade 9 e 10 mapeados, não atingindo a meta total. Com a identificação adequada dos modos de falha é possível propor soluções que contemplem diferentes etapas do processo, como o caso estudado.

Destaca-se a particularidade do estudo realizado, pois a literatura não tem grande abrangência para cenários como este, onde as metodologias de qualidade são utilizadas para direcionar esforços de automação.

Para trabalhos futuros, podem ser estudadas alternativas de redução para os problemas não solucionados. Para estes casos, podem ser avaliadas outras ferramentas de automação (acoplar uma cabine de limpeza aos passos de montagem, por exemplo), ou até mesmo alterações do design do produto (uma peça que impeça a montagem inadequada, por exemplo).

## REFERÊNCIAS

Amrutha, Hippalgaonkar; Ajinkya, Joshi; Surabhi, M. Application of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) in Automated Spot Welding Process of an Automobile Industry: A Case Study. **Journal of Engineering Education Transformations**, v. 34, p. 281-289, 2021

Antonelli, D.; Stadnicka, D. Predicting and preventing mistakes in human-robot collaborative assembly. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 743-748, 2019.

Azamfirei, Victor; Psarommatis, Foivos; Lagrosen, Yvonne. Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 67, p. 1-22, 2023.

Cannas, Violetta Giada; Gosling, Jonathan. A decade of engineering-to-order (2010–2020): Progress and emerging themes. **International Journal of Production economics**, v. 241, p. 108274, 2021.

Fortes, Carlos S.; Tenera, Alexandra B.; Cunha, Pedro F. Engineer-to-Order Challenges and Issues: A Systematic Literature Review of the manufacturing industry. **Procedia Computer Science**, v. 219, p. 1727-1734, 2023.

Gepp, Michael; Gölzer, P.; Grobholz, Boris. Engineer-to-order companies are reserved on adoption of current engineering trends-an empirical study. In: **2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. IEEE, 2015. p. 1525-1530.

Haughey, Bill; Train, Relia. The Impact of Manufacturing Errors on Product Defects. In: **2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)**. IEEE, 2020. p. 1-4.

Höfig, Kai et al. A meta-model for process failure mode and effects analysis (PFMEA). In: **2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**. IEEE, 2019. p. 1199-1202.

Ionescu, Nadia et al. A model for monitoring of the 8D and FMEA tools interdependence in the era of Industry 4.0. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, [e-journal], v. 14, n. 3, p. 86-91, 2022.

Iranzadeh, Soleyman et al. Investigating the relationship between RPN parameters in fuzzy PFMEA and OEE in a sugar factory. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 60, p. 221-232, 2019.

Kolberg, Dennis; Zühlke, Detlef. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.

Lundgren, Magnus; Hedlind, Mikael; Kjellberg, Torsten. Model-driven process planning and quality assurance. **Procedia Cirp**, v. 33, p. 209-214, 2015.

Panagiotopoulos, Ilias E.; Karathanasopoulou, Konstantina N.; Dimitrakopoulos, George J. Risk Assessment in the Context of Dynamic Reconfiguration of Level of Driving Automation in Highly Automated Vehicles. In: **2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)**. IEEE, 2021. p. 1868-1873.

Panyukov, D. I. et al. Creating a Team for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). **Russian Engineering Research**, v. 43, n. 8, p. 1014-1017, 2023.

Saurin, Tarcisio Abreu; Ribeiro, José Luis Duarte; Vidor, Gabriel. A framework for assessing poka-yoke devices. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 31, n. 3, p. 358-366, 2012.

Schulze, Felix; Dallasega, Patrick. Industry 4.0 concepts and lean methods mitigating traditional losses in engineer-to-order manufacturing with subsequent assembly on-site: a framework. **Procedia Manufacturing**, v. 51, p. 1363-1370, 2020.

Shah, Liaqat-Ali et al. A process-oriented risk assessment methodology for manufacturing processes. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 9, p. 216-221, 2013.

Sharma, Kapil Dev; Srivastava, Shobhit. Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review. **J Adv Res Aeronaut Space Sci**, v. 5, n. 1-2, p. 1-17, 2018.

Vollmar, Jan; Gepp, Michael; Schertl, Andreas. The future of engineering—Scenarios of the future way of working in the engineer-to-order business. In: **2017 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)**. IEEE, 2017. p. 1-5.