

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E  
SISTEMAS - NÍVEL MESTRADO**

**GIOVANE ANDRÉ CHIES**

**INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO NA CAPACIDADE PRODUTIVA DE UMA  
EMPRESA QUE OPERA COM SIMBIOSE INDUSTRIAL:  
estudo de caso**

**São Leopoldo**

**2023**

**GIOVANE ANDRÉ CHIES**

**INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO NA CAPACIDADE PRODUTIVA DE UMA  
EMPRESA QUE OPERA COM SIMBIOSE INDUSTRIAL:  
estudo de caso**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em 2023 da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto

São Leopoldo  
2023

C533i Chies, Giovane André  
Influência da manutenção na capacidade produtiva de  
uma empresa que opera com simbiose industrial : estudo  
de caso / por Giovane André Chies. – 2023.  
103 f. : il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do  
Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção e Sistemas, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto.

1. Simbiose industrial. 2. Manutenção enxuta.  
3. Manutenção sustentável. I. Título.

CDU 658.5

Catálogo na Fonte:  
Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

GIOVANE ANDRÉ CHIES

**INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO NA CAPACIDADE PRODUTIVA DE UMA  
EMPRESA QUE OPERA COM SIMBIOSE INDUSTRIAL: estudo de caso**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em 2023 da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

**BANCA EXAMINADORA**

---

Débora Oliveira da Silva – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

---

Gabriel Sperandio Milan – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

---

Rafael Mozart da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Dr. Miguel Affonso Sellitto

Visto e permitida a impressão

São Leopoldo, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Prof. Dr. Daniel Pacheco Lacerda  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Produção e Sistemas

Com muito carinho dedico este trabalho:

Aos meus pais Luiza (*in memoriam*) e Arlindo, pela educação e amor a mim dedicado.

À Marta, minha esposa, pela compreensão nas horas mais difíceis.

Aos meus filhos, Gabriel, Thiago e Giovanna pelos vários momentos felizes.

À Eva (*in memoriam*), minha sogra, pelo exemplo de garra e vida que nos contagiou em vários momentos que convivemos.

Ao Prof. Sellitto, pela sua capacidade de orientar e fortalecer o conhecimento de seus orientandos.

## AGRADECIMENTOS

Chegando a este momento tão esperado, após noites insones, como não dizer que tenho que agradecer a muitas pessoas, mesmo que direta ou indiretamente me apoiaram para conseguir finalizar esta etapa de minha vida.

Grato a Deus por me colocar pessoas especiais em meu caminho, a ele minha eterna gratidão.

Desde o início do Mestrado de Engenharia da Produção e Sistemas, tenho ao meu lado a minha esposa Marta Chies, pelo amor incondicional demonstrado neste período de entrega para a finalização desta formação, base do meu sucesso e a quem tenho um profundo amor e gratidão, pela parceria e compreensão nestes mais de dois anos. Muitas vezes tivemos que nos ausentarmos de vários momentos, passeios e viagens para que eu conseguisse finalizar esta tão sonhada etapa em minha jornada acadêmica.

São muitos os agradecimentos pela realização deste trabalho:

À Dona Luiza (*in memoriam*) e ao Sr. Arlindo, pelo papel importante que representam a minha família e pelos exemplos éticos e de dignidade que a mim passaram;

À Marta, minha esposa, pela sua compreensão, tolerância e ajuda constante, pelas diversas vezes que deixei de lado os familiares, para ir atrás de um sonho, o qual não seria realidade, sem o seu carinho. Só foi possível chegar ao término desta jornada devido a você, que em todos os momentos esteve a meu lado, através de seu olhar de apoio ou de uma palavra de incentivo. Obrigado, Marta!

Aos meus filhos Gabriel, Thiago e Giovanna, pela compreensão e seus valiosos estímulos, pensando sempre em me agradar, desejando uma boa aula todas as vezes que me ausentava para mais um dia de aprendizagem;

Agradecer aos professores da PPGEPS – Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção e Sistemas da Unisinos – pelo excelente nível de transmissão de conhecimento e transformação.

Agradeço ao meu Orientador Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto, meu grande amigo nesta evolução acadêmica sempre disposto a ajudar, obrigado pela confiança creditada neste trabalho.

Agradecer ao Felipe Voltz pelas constantes ajudas na coleta de dados das métricas de qualidade e produtividade na empresa em estudo.

Agradecer ao excelente trabalho realizado pelo time da manutenção da Empresa em estudo, principalmente do apoio do Coordenador de manutenção, Patrick Dapper por aceitar o desafio em transformar nosso parque fabril em ativos de excelência.

## RESUMO

Atualmente, os assuntos relacionados ao meio ambiente estão em destaque, devido à imposição das necessidades de uso das fontes naturais que estão inseridas nos processos produtivos. Surge, assim, a Ecologia Industrial (EI), onde está inserida a Simbiose Industrial (SI) e a Economia Circular (EC), com o objetivo de integrar e reforçar potenciais entre as empresas, por meio do uso de recursos com o propósito de integrar os sistemas industriais, reprocessando o rejeito e reintroduzindo-o novamente ao fluxo produtivo. As empresas envolvidas na EI ainda apresentam diversas dificuldades em atender às demandas crescentes, especialmente devido às limitações produtivas. O presente trabalho decorre de um Estudo de Caso, em uma empresa simbiótica, que visa avaliar a influência da manutenção na capacidade produtiva dos ativos, resultando, assim, no aumento do consumo de resíduos classe II e reduzindo os impactos ao Meio Ambiente, proveniente do segmento calçadista e coleta seletiva do originada pela Vale do Paranhana – RS. Com a implantação do processo da *Reliability Centered Maintenance* (RCM), e com a finalidade de eliminar a indisponibilidade dos ativos, por meio da definição de criticidade dos ativos, esclarecendo as prioridades do setor de manutenção. Neste contexto, foi aprofundada e aplicada a metodologia de *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis* (FMECA), que além de elucidar os modos e efeitos das falhas, analisa a criticidade, a probabilidade e a gravidade das possíveis falhas. Na sequência, direcionou-se a pesquisa para a manutenção de forma estratégica. Os resultados foram mensurados por intermédio da disponibilidade dos ativos, bem como do aumento da capacidade produtiva (produção kg/dia e produção m<sup>2</sup>/dia), por meio das análises quantitativas e qualitativas, comparando o impacto, seja positivo ou negativo. Com a implantação do projeto, tornou-se possível aumentar a capacidade produtiva em 17,01%, através do aumento da disponibilidade dos ativos de 82% para 92,8%, o que representa um aumento de 10,8 pontos percentuais bem como, melhorar o atendimento dos prazos produtivos de 81% para 93%, o que representa um aumento de 12 pontos percentuais atendendo às expectativas dos clientes. Já a redução no impacto ambiental Gás Efeito Estufa (GEE) em 59,2 tons, consumo de água em 2942,7 m<sup>3</sup> e consumo petróleo 392,9 m<sup>3</sup>, assim alavancando cada vez mais as necessidades dos elos das empresas simbióticas da região.

**Palavras-chave:** simbiose industrial; manutenção enxuta; manutenção sustentável.

## ABSTRACT

Currently, the issues related to the environment are in focus due to the imposition of the need to use natural sources that are inserted into production processes. Thus, Industrial Ecology (EI) arises, where the Industrial Symbiosis (IS) and the Circular Economy (CE) are inserted to integrate and strengthen potential among companies through the use of resources to integrate the industrial systems, reprocess the waste and reintroduce it again to the production flow. The companies involved in the EI still need help meeting the growing demands, primarily due to production limitations. The present work derives from a case study in a symbiotic company, which aims to evaluate the influence of maintenance on the productive capacity of assets, thus resulting in an increase in the consumption of class II waste and reducing the impacts on the Environment, coming from the footwear segment and selective collection of the originated from Vale do Paranhana - RS with the implementation of the Reliability Centered Maintenance (RCM) process, and to eliminate the unavailability of the assets, through the definition of the criticality of the assets, clarifying the priorities of the maintenance sector. In this context, the Failure Mode, Effect, and Criticality Analysis (FMECA) methodology was deepened and applied, which, besides elucidating the failure modes and effects, analyzes the criticality, probability, and severity of possible failures. In the sequence, the research was directed towards maintenance in a strategic way. With the implementation of the project, it became possible to increase the production capacity by 17.01%, by increasing the availability of assets from 82% to 92.8%, which represents an increase of 10.8 percentage points as well as, improve compliance with production deadlines from 81% to 93%, which represents an increase of 12 percentage points in meeting customer expectations. The reduction in the environmental impact of Greenhouse Gas (GHG) by 59,2 tons water consumption by 2.947 m<sup>3</sup> and oil consumption 392,9 m<sup>3</sup> thus leveraging more and more the needs of the links of symbiotic companies in the region.

**Keywords:** industrial symbiosis; lean maintenance; sustainable maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da Ecologia Industrial.....	24
Figura 2 - Exemplo simbiótico industrial.....	26
Figura 3 - Componentes para a excelência em manutenção .....	33
Figura 4 - Diagrama explicativo.....	37
Figura 5 - Curva da taxa de falha.....	38
Figura 6- Estratégias de manutenção.....	39
Figura 7- Fluxograma do processo de avaliação de falhas.....	41
Figura 8- Etapas da manutenção centrada na confiabilidade.....	43
Figura 9- Fórmula de cálculo de criticidade.....	46
Figura 10 - Fluxo da aplicabilidade do FMEA.....	48
Figura 11- Etapas do método de trabalho .....	56
Figura 12- Ciclo produtivo do termoplástico .....	57
Figura 13- Operacionalização da pesquisa .....	60
Figura 14 - Quadro de acompanhamento de produção.....	63
Figura 15 – Treinamento in loco.....	64
Figura 16 - Classificação dos equipamentos críticos .....	68
Figura 17- Exemplo de sistema redundante.....	69
Figura 18 - Mapeamento do equipamento piloto.....	70
Figura 19 - Classificação dos componentes.....	71
Figura 20 - Histórico do preditivo do equipamento piloto .....	77

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Definição da criticidade .....	47
Quadro 2 – Variáveis e suas ferramentas estatísticas .....	65
Quadro 3- Exemplo decisório de criticidade .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de redução do impacto ambiental possível .....	16
Tabela 2 - Consumo para produção de 100 pares de sapatos feminino em couro. ...	19
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos tipos de manutenção .....	34
Tabela 4 - Indicadores de manutenção .....	37
Tabela 5- Categorização, prejuízos e danos das falhas.....	40
Tabela 6- Criticidades e seus impactos.....	45
Tabela 7- Níveis de Severidade .....	49
Tabela 8 - Classificação das Ocorrências .....	51
Tabela 9 - Classificação da detecção.....	51
Tabela 10 - Resultados de pesquisas nas bases .....	59
Tabela 11- Protocolo da pesquisa.....	60
Tabela 12 – Influenciadores da criticidade .....	67
Tabela 13 - Tabela de valores .....	69
Tabela 14 - Estratégias de manutenção.....	72
Tabela 15 - Comparativos da aplicabilidade do FMECA .....	73
Tabela 16 - Estratégia de manutenção .....	73
Tabela 17 - Análises Preditivas .....	74
Tabela 18 - Nomenclaturas de estado .....	75
Tabela 19 – Comparação de médias diárias por fase .....	80
Tabela 20 - Comparação de média entre fases – Mensal.....	83
Tabela 21 - Comparação de medianas entre fases – Semanal.....	85
Tabela 22 - Redução do impacto ambiental possível.....	86
Tabela 23 – Resultados ambientais .....	86
Tabela 24 - Análise do Questionário com Especialistas através do Teste t de Student .....	87

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Classificação dos equipamentos .....	76
Gráfico 2– Resultados equipamento piloto – disponibilidade (%) e produção (kg)...	82
Gráfico 3 – Regressão linear – produtividade (kg/h) e Disponibilidade (%) .....	82
Gráfico 4– Regressão linear - produção (kg) e disponibilidade (%) .....	83
Gráfico 5 – Comparação dos resultados .....	84
Gráfico 6 – Visão dos especialistas (médias).....	89
Gráfico 7 – Desvio padrão das respostas dos especialistas (desvio padrão) .....	89
Gráfico 8– Percepção dos especialistas sobre a manutenção.....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANOVA	Análise de Variância
CEP	Controle Estatístico de Processo
DIN	Instituto Alemão para Normatização
EC	Economia Circular
EI	Ecologia Industrial
FMEA	Failure Mode Effects Analysis (Análise de Modo e Efeito de Falha)
FMECA	Failure Mode Effects and Criticality Analysis (Efeitos do Modo de Falha e Análise de Criticidade)
GEE	Gases Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
ISO	Organização Internacional para Padronização no Brasil
MO	Mão de obra
MTBF	tempo médio entre falhas
MTBR	Mean Time Between to Repair
MTTR	Mean Time to Repair
NASA	Agência Nacional de Aeronáutica
NBR	Norma Brasileira
RCM	Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada na Confiabilidade)
RPN	Risk Priority Number
RS	Rio Grande do Sul
SI	Simbiose Industrial
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Definição do problema e objeto de estudo	14
1.2	Objetivos do trabalho	17
1.3	Justificativas	17
1.3.1	Quadro geral	17
1.3.2	Quadro regional	18
1.3.3	Academia	20
1.4	Delimitação da pesquisa	20
1.5	Estrutura do trabalho	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>23</b>
2.1	Ecologia Industrial – EI	23
2.1.1	Simbiose industrial - SI	25
2.2	Economia Circular	27
2.3	Manutenção	28
2.3.1	Manutenção corretiva	29
2.3.2	Manutenção preventiva	29
2.3.3	Manutenção preditiva	30
2.3.4	Manutenção estratégica	31
2.3.5	Indicadores de manutenção	35
2.3.6	Falha dos ativos	37
2.4	Manutenção centrada na confiabilidade – RCM	42
2.4.1	Introdução ao RCM	42
2.4.2	Implantação do RCM	42
2.4.3	Crítérios de criticidade dos ativos	44
2.4.4	Análise dos modos, efeitos de falha e criticidade - FMECA	47
2.5	Comentários finais do capítulo	53
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>54</b>
3.1	Método de pesquisa	54
3.2	Método de trabalho	56
3.2.1	Unidade de estudo	56
3.2.2	Desenvolvimento Teórico	57
3.2.3	Protocolo do estudo de caso	60

3.2.4	Análise de especialistas .....	61
3.2.5	Seleção do ativo prioritário .....	62
3.2.6	Coleta de dados e melhorias.....	62
3.2.7	Análise de dados.....	64
<b>4</b>	<b>A PESQUISA .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Definição dos equipamentos críticos .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Direcionamentos da matriz de priorização.....</b>	<b>70</b>
4.2.1	Aplicação da ferramenta - FMECA.....	72
4.2.2	Análises preditivas .....	74
4.2.3	Equipamentos implantados .....	76
<b>4.3</b>	<b>Comentários finais do capítulo .....</b>	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
<b>5.1</b>	<b>Desenvolvimento.....</b>	<b>79</b>
5.1.1	Produção ativo piloto.....	80
5.1.2	Produção diária geral .....	83
5.1.3	Redução do impacto ambiental.....	85
<b>5.2</b>	<b>Pesquisa com especialistas .....</b>	<b>86</b>
5.2.1	Resultados da pesquisa com os especialistas .....	89
<b>5.3</b>	<b>Comentários finais do capítulo .....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXO A - APLICAÇÃO PRÁTICA DA FERRAMENTA FMECA.....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO B – PESQUISA APLICADA (FEEDBACK).....</b>	<b>103</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, vivem-se transformações, adaptações e modificações estratégicas nas empresas, que visam a redução dos desperdícios nos fluxos produtivos (HAAS *et al.*, 2015). As rápidas mudanças nas exigências do mundo estimularam a reavaliação de melhores estratégias de manutenção e gestão para melhorar a competitividade das organizações, através da maior disponibilidade dos ativos, resultando no aumento da capacidade fabril. (SINGH; KHAMBA; SINGH, 2020).

Amui *et al.* (2017) destacam a necessidade de desenhar novas configurações produtivas, com a finalidade de estabelecer ambientes estáveis, sustentáveis e com a formatação relacionada aos cuidados com as fontes renováveis. Corroborando com estas visões, Jabbour *et al.* (2012) observam que existem desequilíbrios gerados pelas indústrias na biodiversidade devido à degradação ambiental, por conta da necessidade de gerar lucro. Em contrapartida, vislumbram-se algumas empresas que já se conscientizaram estrategicamente, reduzindo seus gastos via compra de matérias primas reprocessadas e utilizando seus produtos de forma sustentável e gerando vantagens competitivas com esta preservação da biodiversidade (GONÇALVES; BARROSO, 2013).

Franciosi *et al.* (2018) corroboram sua visão estratégica, quando destacam a influência que a manutenção dos ativos pode gerar, por meio da redução dos impactos ambientais, resultado da troca dos componentes antes do fim da vida útil. Neste caso, gera-se maior quantidade de manufaturados, com geração de impacto ambiental significativa, convergindo assim em uma problemática ambiental para a sociedade. (COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020)

Cosenza, Andrade e Assunção (2020) discorrem sobre o uso de recursos naturais por meio da economia linear (extrai, produz, consome e descarta), ou seja, uma economia que explora a transformação deste processo, sem reprocessá-los. Da mesma forma, Veiga (2014) destaca a exploração de bens de consumo duráveis e não duráveis, que acarreta a possibilidade de escassez de alguns recursos naturais não-renováveis.

Nosratabadi *et al.* (2019) também discorrem sobre a indiferença com a priorização da sustentabilidade pelo modelo de negócios, que muitas vezes não integram a sustentabilidade como uma proposta de valor. O alinhamento entre a gestão ambiental e o plano estratégico corporativo é pertinente, pois empresas que

utilizam essa formatação reduzem os impactos ao meio ambiente, transformando muitas vezes seus resíduos em novos produtos e novas oportunidades de negócio (MARTINS; ESCRIVÃO FILHO; NAGANO, 2015).

Santiago e Dias (2012) destacam também que uma importante ação para a sustentabilidade seria a integração de modelos, desde a reciclagem até o reuso. Com esta junção estratégica, é possível ter uma visão sistêmica e de integração no planejamento estratégico sustentável.

Bimbati e Rutkowski (2017) distinguem a importância ocorrida após os anos de 1990 com a perspectiva empresarial de juntar a visão produtiva e as estratégias de redução de custo, por intermédio da eliminação das perdas, melhorando a qualidade dos produtos e diminuindo os impactos ambientais dos processos.

Neste contexto, enquadra-se um novo formato empresarial de trabalho, o da Economia Circular (EC), cuja principal aplicação é dar novo uso a tudo e a todo objeto já utilizado, englobando desde o projeto, produção e comercialização, garantindo a recuperação dos recursos naturais de forma inteligente (MARINELLI *et al.*, 2021). Cosenza, Andrade e Assunção (2020) destacam a importância da consciência das empresas com o cuidado com o meio ambiente, transformando este cuidado em novas estratégia de economia, onde a Economia Circular está inserida de forma positiva no ciclo de vida de um produto até sua reutilização, assim quebrando paradigma que somente o consumo linear pode ser lucrativo.

Para manter a produtividade desse sistema multiempresarial, é necessário considerar as condições de capacidade produtiva de cada uma das empresas deste fluxo simbiótico (YU; HAN; CUI, 2015). Nesse ínterim, as empresas de reprocessamento/reciclagem tornam-se fatores restritivos da cadeia produtiva, devido ao abastecimento de matéria prima, sendo que, o resíduo da empresa “A” é o insumo da empresa “B”, bem como, pelas restrições de capacidade internas no atendimento da demanda ou pela logística envolvida (YU; HAN; CUI, 2015).

Singh, Khamba e Singh (2020) destacam como restrições fabris as complexidades de manter todas as atividades, operações e os ativos em sincronismo com a redução das perdas e defeitos possíveis. Essas perdas tornam-se um direcionador de ações para a área de manutenção das unidades industriais. Zonta *et al.* (2020) especificam que existe a possibilidade que a manutenção pode representar 60% dos custos de uma empresa, devido as muitas variáveis de custos mensuráveis,

como produtos defeituosos no processo, queda da velocidade dos ativos e até mesmo os não mensuráveis, como a desmotivação e a queda de rendimento operacional.

Na busca de transformações estratégicas, as corporações têm utilizado técnicas enxutas convergindo para a criação de ações orientadas a minimizar as perdas financeiras, bem como os impactos ambientais (KARAULOVA; BASHKITE, 2016). Neste cenário, tem-se a implantação de metodologias relacionadas à filosofia Lean na área de manutenção, neste caso, a implantação da Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e da sua Criticidade (FMECA), faz sentido, pois é uma ferramenta preventiva com direcionamentos para a eliminação das paradas dos ativos. Esta mudança transforma o setor de manutenção como em um gerador de produtividade e oportunidades, por meio da estabilidade nos processos fabris (MELO; LOOS, 2018). Takahashi e Osada (2015) enfatizam que a meta de toda a empresa é elevar o valor do índice de utilização dos ativos ao máximo possível, fortalecendo, assim, a resiliência do negócio. Campbell e Jardine (2001) ressaltam a relevância que a confiabilidade dos ativos exerce para suportar e ou incrementar a capacidade produtiva de maneira eficaz e sustentável.

### **1.1 Definição do problema e objeto de estudo**

Conforme Machado, Morandi e Sellitto (2019), as empresas do segmento calçadista necessitam de uma visão sistêmica, voltada para a resolução dos problemas por uma lógica resiliente, sobrepondo os riscos relacionados ao mercado, exemplo deste fato está o reaproveitamento dos resíduos, como agregação de valor e diferenciação estratégica. Dentro deste contexto, as empresas calçadistas da região do Vale do Paranhana (RS) têm se movimentado em direção à adoção da Simbiose Industrial - SI como estratégia de operação de médio e longo prazo (MACHADO; MORANDI; SELLITTO, 2019)

Ingemarsdotter, Jamsin e Balkenende (2020) julgam importante que o início de todo o trabalho tenha foco nas estratégias da Economia Circular, iniciando os processos a partir do design do produto inovador, ou seja, produto com valor agregado, com ciclo de vida alto e com preocupação ambiental.

Diante da necessidade de redução do impacto ambiental nas empresas calçadistas, surgiu um universo orientado para o reaproveitamento dos resíduos de forma sustentável, direcionado à Economia Circular. Um tipo de empresa tem surgido,

que se aproveita de oportunidades oferecidas pela economia circular, e cuja atuação propicia a realocação para o mercado de materiais com propriedades semelhantes aos originais das matérias-primas extraídas de fontes naturais (KIRCHHERR *et al.*, 2017). Uma destas empresa é o objeto de estudo desta dissertação de Mestrado.

Como característica principal, a empresa em estudo visa impulsionar a sustentabilidade com o auxílio do alinhamento estratégico e do comprometimento permanente com o Meio Ambiente, por meio da transformação dos resíduos em novos produtos (todo o material tem um começo, mas nunca tem um fim), criando, assim, uma relação direta com a sustentabilidade. A empresa opera dentro do conceito de simbiose industrial, no qual empresas trocam entre si materiais, energia e informação, com ganhos mútuos para todos os envolvidos na troca (KIRCHHERR *et al.*, 2017). Como estratégia competitiva, a empresa utiliza-se a abordagem de dentro para fora, visando entender e atender às necessidades do mercado em relação à utilização dos resíduos, de forma a transformá-los em novos produtos e, com isso, tornar esse processo em uma vantagem competitiva no mercado onde atua.

Assim se apresenta a empresa que é o foco do presente trabalho, por meio do reuso dos materiais inertes das empresas calçadistas e da coleta seletiva, inserindo-se na atividade de reciclagem, desde dezembro de 2011, dada a reutilização de resíduos classe II. A saber, conforme NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), os resíduos perigosos são divididos em inflamáveis, corrosivos, reativos e tóxicos (classe I). Para os resíduos inertes classe II, principal matéria-prima da empresa em estudo, possuem baixa reação, pois não sofrem modificações na sua composição primária.

Sabe-se que um dos desafios para ampliação desse sistema produtivo sustentável é a destinação final dos resíduos, principalmente os resíduos sólidos de classe II gerados pelas empresas (WATANABE *et al.*, 2014). Neste caso, os resíduos são gerados nos processos de produção dos calçados e da coleta seletiva da região e são reprocessados retornando às empresas calçadistas como produto final (palmilhas), reduzindo o impacto ambiental de toda a cadeia produtiva.

Contando com aproximadamente 180 profissionais, a empresa em questão se divide em 2 (duas) unidades de operação, apresenta um processamento dia de mais de 15 (quinze) toneladas de resíduos, totalizando uma produção de 12 Km<sup>2</sup> de termoplásticos ao dia. Apesar do processo ser inovador e lucrativo da empresa, ela tem como maior obstáculo sua capacidade produtiva limitada, devido a problemas operacionais relacionados a manutenção dos ativos em momentos inesperados.

Diante da necessidade de aumentar a capacidade produtiva, este trabalho visa aumentar a disponibilidade dos ativos a partir da manutenção sustentável e também melhorias ambientais, tais como: a redução do Gás Efeito Estufa (GEE), o consumo de água e de petróleo, tudo isso por meio do reuso dos materiais. Para melhor exemplificar o impacto positivo que o aumento da capacidade (maior disponibilidade dos ativos) pode gerar, a Tabela 1 aponta reduções plausíveis que seriam obtidas no parque industrial da empresa em estudo com aumento da disponibilidade geral dos ativos em 10 pontos percentuais.

Tabela 1 - Exemplo de redução do impacto ambiental possível

Impacto Ambiental	Redução/ano
Gás Efeito Estufa (GEE)	34,8 tons
Consumo de água	1730 m <sup>3</sup>
Consumo petróleo	231 m <sup>3</sup>

Fonte: adaptado pelo autor de *The Intergovernmental Panel On Climate Change (2022)*

Singh, Khamba e Singh (2020) comparam que as rápidas mudanças nas exigências do mundo corporativo, em conjunto com as melhores estratégias de manutenção e gestão, resultam na melhoria da competitividade das organizações. Nos processos da unidade em estudo, pode-se destacar a não existência de um sistema de gestão e manutenção estratégica, o que ocasiona diversas paradas inesperadas da produção.

Marinelli *et al.* (2021) distinguem uma preocupação do ciclo produtivo desde a matéria-prima, transformação e a entrega do produto final, com a eliminação dos efeitos negativos gerados pelos processos, especialmente com a eficiência operacional. Fato este que foi um dos pilares deste trabalho, pois existe uma ligação direta com a área de manutenção, devido à estabilidade, à confiabilidade e à qualidade dos produtos processados, gerador de maior produtividade e competitividade da organização (BIMBATI; RUTKOWSKI, 2017).

Nesse contexto, emerge a seguinte questão: Como os avanços baseados na manutenção estratégica dos ativos influenciam na capacidade produtiva de uma empresa que emprega técnicas de simbiose industrial?

Após a finalização deste trabalho, a expectativa é constatar que se houve aumento e a respectiva mensuração do aumento ocorrido na capacidade

produtividade da empresa, melhorando a disponibilidade dos ativos (melhoria da vida útil dos componentes), revertendo os dados finais em melhorias ambientais e maior lucratividade originada nos processos da empresa.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

O objetivo geral da pesquisa consiste em analisar como os avanços baseados na manutenção estratégica dos ativos influenciam na capacidade produtiva de uma empresa que emprega técnicas de simbiose industrial.

Os objetivos específicos são:

- a) Propor um sistema de gerenciamento preventivo de falhas dos ativos;
- b) Mensurar a variação em indicadores da capacidade produtiva e o aumento de consumo de resíduos, após a aplicação da nova metodologia;
- c) Analisar os resultados da implementação.

Assume-se a premissa que o uso da metodologia de Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e da sua Criticidade (FMECA) seja uma ferramenta adequada para atingir o primeiro objetivo específico desta dissertação. Também se assume, com base na literatura, que o aumento da disponibilidade de ativos reduz perdas ambientais, pois os equipamentos operarão menos tempo para que se atinja a produção desejada e, ao mesmo tempo, como a empresa opera com simbiose industrial, consumirão mais recursos originados de reciclagem de resíduos.

## **1.3 Justificativas**

A importância do presente trabalho pode ser observada a partir de dois aspectos gerais: i) Quadro Geral, ii) Quadro Regional iii) Academia

### **1.3.1 Quadro geral**

Observando de forma geral, Veiga (2014) destaca a existência de um descompasso generalizado com os cuidados relacionados ao meio ambiente. Esta situação já está enraizada há muitos anos em nossa sociedade, pois ainda hoje existem interpretações errôneas que se sobrepõem à sustentabilidade, direcionando mais esforços a resultados empresariais e menos à proteção ambiental.

Cosenza, Andrade e Assunção (2020) relatam a existência de algumas empresas com visão da preservação dos recursos naturais, orientando diversas ações para reduzir e, se possível, eliminar a economia linear, abrindo um caminho árduo e de muita pesquisa em direção à Simbiose Industrial.

Conforme a Abicalçados (2021), o Brasil está entre os cinco maiores produtores mundiais de calçados, com a produção de 840 milhões de pares, destes, cerca de 150 gramas de resíduos são gerados por um par, ou seja, 126 milhões kg de resíduos. Diante deste cenário, desponta a missão da área de manutenção em ser protagonista em preservar o meio ambiente, a partir da influência que exerce nos impactos ambientais, por meio das reduções dos resíduos e até mesmo com a definição correta da durabilidade dos componentes, ou seja, final da vida útil do mecanismo.

### 1.3.2 Quadro regional

Machado, Morandi e Sellitto (2019) contextualizam de maneira coerente a necessidade de formatos empresariais resilientes e com foco na melhoria dos fluxos produtivos, necessitando agregar valor ao produto, em via de novos mercados.

De acordo com a Abicalçados (2021), o Estado do Rio Grande do Sul é o 2º maior produtor de calçados do Brasil com 21,2% da produção nacional (161,8 milhões de pares), somente atrás do Ceará com 26,7% (203 milhões de pares), ou seja, entende-se que há grande capacidade produtiva e já consolidação a nível nacional de sua capacidade de mercado.

Silva (2016) apresenta resultados da região calçadista do Rio Grande do Sul, no que tange aos percentuais de resíduos sólidos industriais destinados para aterro industrial em torno de (33,33%), logo, temos uma excelente oportunidade estratégica de negócios sustentáveis neste segmento, podendo-se comparar a quantidade de recursos naturais, produtos químicos, emissões de gases, geração de resíduos sólidos e líquidos, conforme se percebe na Tabela 2, a quantidade de resíduos e gastos renováveis e não renováveis, para confecção de 100 pares de sapatos feminino em couro.

Tabela 2 - Consumo para produção de 100 pares de sapatos feminino em couro.

Material	Consumo
Água	11,3 m <sup>3</sup>
Energia Elétrica	40 KWh
Couro	11,07 kg
Sintéticos	2,1 kg
Efluentes	5,7 m <sup>3</sup>
Resíduo de couro	4,37 kg
Resíduo Sintético	0,01 kg

Fonte: elaborado pelo autor, com base em Silva (2016).

Para Machado, Morandi e Sellitto (2019), a demonstração de resiliência empresarial do setor calçadista está diretamente relacionada à sustentabilidade via ações ambientais estruturadas e estratégicas. Com foco neste cenário, Nosratabadi *et al.* (2019) analisam a importância de estruturar uma cadeia de abastecimento fechada (*closed-loop supply chain*), ou seja, ter os objetivos definidos da cadeia circular visando a redução do impacto ambiental, muitas vezes não atendida pelo excesso de resíduos e a falta de capacidade produtiva sustentável. O maior desafio para a expansão desse tipo de economia é a capacidade produtiva das empresas simbióticas de reprocessamento (SELLITTO *et al.*, 2021).

Conforme os fundadores da empresa em estudo, a maior dificuldade está em atender à demanda dos clientes devido a sua capacidade produtiva. Corroborando Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019), os autores apresentam de maneira clara que a manutenção é uma das áreas chaves para a sustentabilidade, pois está inserida nos pilares social (saúde, segurança e desenvolvimento das pessoas), ambiental (prevenção impactos ambientais), e econômico (produtividade, entrega e qualidade).

Devido a circunstância da necessidade proveniente de aumentar a capacidade produtiva, através da melhoria da disponibilidade dos ativos, os autores Mohanty; Dash; Pradhan (2020) descrevem o FMECA, como uma ferramenta que melhora a eficiência dos ativos e a confiabilidade do sistema, influenciador decisório para a possível implantação.

### 1.3.3 Academia

Através da carência de artigos relacionados com o foco da pesquisa, ou seja, manutenção e a influência desta área perante ao Meio Ambiente, transmite a importância que esta junção pode resultar positivamente para a Academia e as empresas. (KARAULOVA, BASHKITE, 2016).

A utilização eficaz dos conceitos, princípios e técnicas relacionadas a Ecologia Industrial e as ferramentas de manufatura enxuta, principalmente da Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e da sua Criticidade (FMECA), pressupõem-se a existência de um sólido embasamento teórico que permita o desenvolvimento de trabalhos práticos no âmbito das Empresas. Neste sentido, um dos pontos principais à considerar a verificação da aplicabilidade dos conceitos gerais desenvolvidos no âmbito da literatura associada ao FMECA (BARAN; TROJAN, 2015; SILVA, 2019b).

É relevante ainda, o fato de que a metodologia tratada como foco neste trabalho tem vasta possibilidade de ser explorada tanto pela Academia, bem como, pelas empresas sustentáveis.

## 1.4 Delimitação da pesquisa

A seguir serão apresentadas as principais delimitações do trabalho, ou seja, apresenta a cerca imaginária entre o que foi desenvolvido durante o trabalho e o que não foi tratado nele.

A realização do referido trabalho se concentrará em uma Unidade Fabril específica, que reprocessa materiais oriundos do segmento calçadista e coletas seletivas do Brasil, principalmente do Rio Grande do Sul, responsável por reprocessar resíduos classe II, transformando os resíduos em placas laminadas de termoplásticos, que, após processos fabris, retornam em forma de palmilhas, displays de marketing, bolsas e sacolas às empresas do segmento calçadista. O presente trabalho propõe-se a introduzir a manutenção estratégica nessa empresa e avaliar sua influência na capacidade produtiva.

Para tanto, foram avaliados: a disponibilidade dos ativos e o aumento da capacidade fabril, provenientes das melhorias oriundas dos direcionamentos da aplicação das ferramentas enxutas na área de manutenção.

De acordo com maioria das pesquisas, pode ocorrer algumas limitações, sendo assim, destaco os possíveis limitantes que este trabalho também se deparou: pode existir a ineficácia do projeto face às distorções de ideias, definições e valores pela Alta Administração, e não foram utilizadas todas as ferramentas e metodologias relacionadas à aplicação da manutenção Lean na empresa em estudo, devido ao tempo necessário de implantação ser superior ao cronograma que se projeta para a finalização deste projeto; número reduzido de colaboradores com a função de clientes internos da manutenção, que neste caso são cinco, motivo que pode refletir em distorções dos resultados do feedback do antes e depois da implantação do trabalho. Também é importante ressaltar que foi enfatizado nesta pesquisa os resíduos de classe II, pela relação direta com a industrial em estudo e as transformações dos elos da cadeia simbiótica que ela objetiva.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho é composto de seis capítulos. O primeiro capítulo finalizado anteriormente foi composto da apresentação da introdução do trabalho com os seguintes tópicos: definição do problema de pesquisa com o propósito de situar o leitor no cenário da pesquisa, em seguida, são explicitados o objetivo geral e os específicos, justificativas inseridas no quadro geral e regional, as delimitações e limitações, e finalizando este capítulo, a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo apresenta os conceitos teóricos relevantes – como Ecologia Industrial –, neste item está inserida a Simbiose Industrial, seguindo com uma exposição da Economia Circular. Na continuação, será realizada uma elucidação sobre a manutenção, seus principais tipos de atuação, na continuidade do referencial será inserida a área de manutenção mais sustentável e estratégica e como direcionadores do desenrolar da pesquisa, a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), e as importantes ferramentas de Análise dos Modo e Efeitos de Falha (FMEA) e seus parâmetros de medição e criticidade dos ativos (FMECA).

No terceiro capítulo, descreve-se a metodologia empregada no trabalho, composto pelo método da pesquisa, método de trabalho, análise da Unidade de Estudo, pelo desenvolvimento teórico, protocolo do estudo de caso, análise com os especialistas, a seleção do ativo prioritário – em que se realizará o teste piloto, coleta

de dados e as melhorias para o controle na coleta de dados –, e, por fim, a análise de dados.

No quarto capítulo, a partir do referencial teórico estudado, prossegue-se de forma prática a definição dos equipamentos críticos, o desenvolvimento da matriz de priorização e seus direcionamentos, após a aplicação da ferramenta FMECA, como consequência deste, as análises preditivas e os equipamentos implantados.

No quinto capítulo, são descritos os resultados e discussões do ativo piloto, bem como de forma geral da Unidade e o impacto ambiental que o referido trabalho resultou. Finalizando este capítulo, a pesquisa com os especialistas do antes e depois da ferramenta FMECA implantada.

Finalizando, o sexto capítulo apresenta as conclusões.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta etapa do trabalho, será apresentado o referencial teórico, que iniciou com a primeira seção que explora a Ecologia Industrial (EI); seguindo, expõe-se a Simbiose Industrial que é um dos eventos que compõe a EI, e, finalizando, as inovações sustentáveis que discorrem da Economia Circular – EC. Na sequência do referencial teórico, adentrou-se na área de manutenção, explanando sobre os principais tipos de manutenção e estratégias envolvidas na área de manutenção, além de ferramentas da manutenção centrada na confiabilidade e seus parâmetros de classificação, a priorização da criticidade dos ativos e, por fim, o referencial teórico, a fim de elucidar a ferramenta de análise dos modos e efeitos de falha e criticidade – FMECA.

### 2.1 Ecologia Industrial – EI

Iniciando o referencial teórico, será introduzido um conjunto de ideias sobre a Ecologia Industrial (EI) que busca incorporar a indústria ao ecossistema, exigindo métodos e uma remodelação radical no modelo de negócios e colaboração intersetorial. Para Silva *et al.* (2016), a EI tem como princípios a prevenção à poluição por meio da utilização eficaz dos produtos, por via da reciclagem e do reuso dos resíduos no decorrer dos fluxos produtivos. Leite (2020) destaca que, aos poucos, inicia-se a percepção da falta de recursos naturais pelo Homem, como consequência, cria-se um discernimento da necessidade de proteger o meio ambiente.

Silva *et al.* (2016) descrevem que a EI é o equilíbrio entre processo produtivo eficiente, interligado por uma postura de cuidados ambientais, sem influenciar nas condições financeiras da empresa. Com esses princípios, existem possibilidades de integrar outras empresas nesse ciclo por meio da reutilização dos resíduos, podendo ser usado como matérias primas de outras (LEITE, 2020; SILVA *et al.*, 2016).

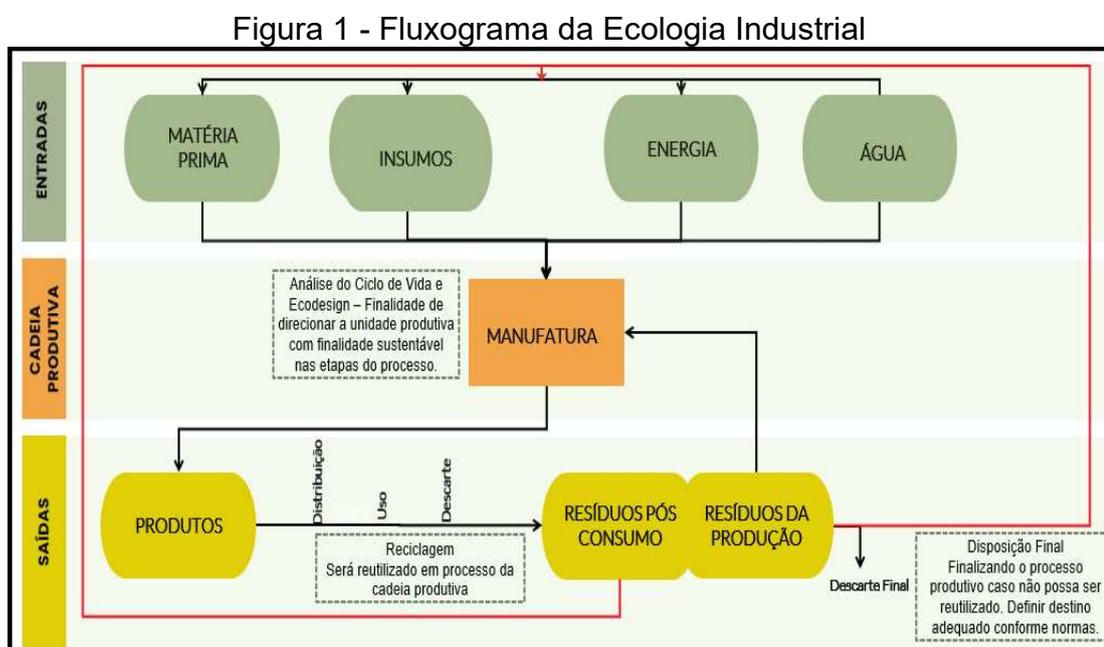
Trevisan *et al.* (2016) discorrem que diversos autores, entre eles Posh (2010) e Boons, Spekkink e Mouzakitis (2011), que consideram as empresas sendo interligadas, como se fossem elos de uma corrente, em que cada uma é o suporte para que o todo se retroalimente, não somente de materiais, mas também com conhecimentos, recursos humanos e tecnologias, com respostas positivas aos impactos ambientais e na maximização financeira das empresas simbióticas, criando processos de circuito fechado no qual os resíduos são vistos como entrada,

eliminando, assim, a noção de subproduto indesejável. (AZEVEDO, 2015; LEITÃO, 2015).

Ato contínuo, também Kravchenko, Pasqualetto e Ferreira (2016) argumentam que empresas com a visão direcionada para os indicadores de melhoria ambiental encontram-se com seus resultados positivos na eficiência produtiva, reduzindo riscos aos funcionários e ao Meio Ambiente. Em adendo, Trevisan *et al.* (2016) explanam a possibilidade da EI ser uma excelente vantagem competitiva, devido à reutilização dos materiais, da redução dos custos e reutilização dos resíduos como fonte de transformação sustentável.

Inseridos neste mesmo contexto, Franciosi *et al.* (2018) relatam que a influência da manutenção vai além da sua própria função, pois ela pode afetar os pilares da sustentabilidade, como o social, por conta da insegurança, pode gerar ao ativo condições inadequadas; financeiro, devido quebras inesperadas dos ativos; e ambiental, pela produção de novos componentes. Todas estas variáveis geram problemas na capacidade produtiva simbiótica.

Pode-se observar um exemplo da EI na Figura 1, que apresenta também algumas ferramentas e conceitos.



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Leite (2020).

Sellitto *et al.* (2021) constatarem outra influência importante para o resultado desta economia, que é a necessidade geográfica de se formarem polos simbióticos próximos (*clusters*), com direcionamentos estratégicos para redução dos custos e

movimentações logísticas. A importância de estruturar uma cadeia de abastecimento fechada é ressaltada por Nosratabadi *et al.* (2019), ou seja, ter os objetivos definidos da cadeia circular, visando a redução do impacto ambiental e ao mesmo tempo sustentável, aumentando a percepção, reputação e visibilidade dos clientes (OCDE/EUROSTAT, 2018).

Silva *et al.* (2016) relacionam a Ecologia Industrial como um ecossistema, onde as entradas e saídas dos insumos são transformadas com eficiência no que tange ao processo e seus meios de consumo, equilibrando os complexos industriais com os ecológicos, de acordo com a Simbiose Industrial.

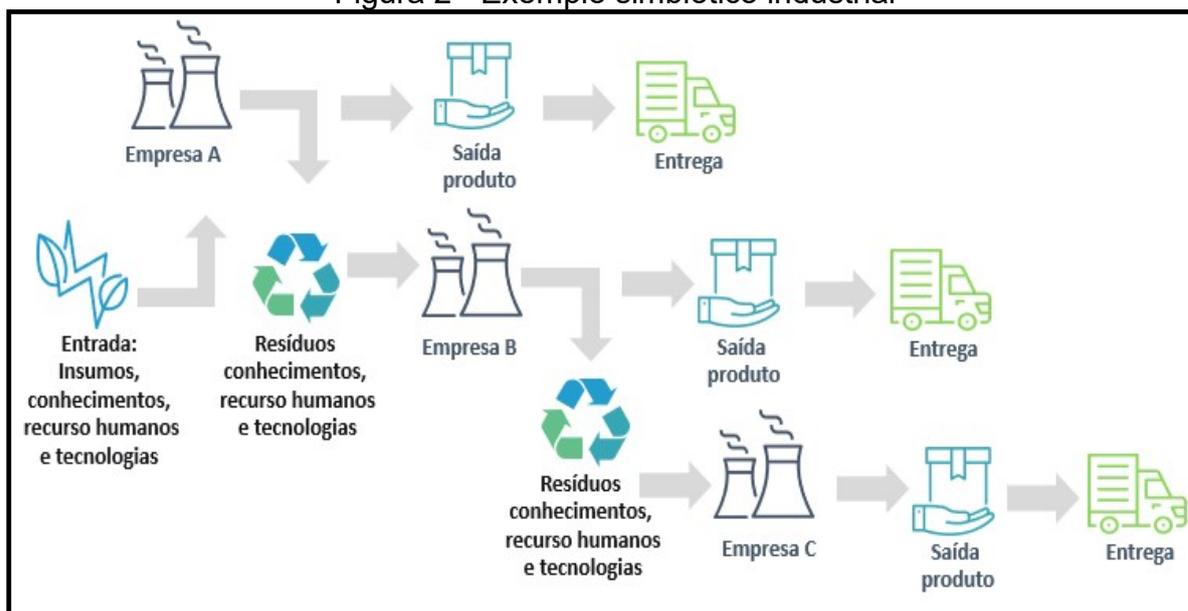
### 2.1.1 Simbiose industrial - SI

Sobre o conceito da Simbiose Industrial (SI), Chertow (2000) apresenta uma instigante definição, podendo ser ele um transmissor de valores às empresas de fontes de processos únicos, mas com uma visão sistêmica elevando os resultados para todas as empresas participantes deste ecoparque industrial.

Para Leite (2020), a SI destaca-se dentro da sistemática industrial, pois os resíduos de uma empresa podem ser reutilizados em fluxos produtivos de outra empresa parceira do circuito simbiótico. Já na visão de Chertow (2000), a chave do sucesso estratégico da utilização de ecoparques é a mútua cooperação entre empresas, por meio dos recursos das mais diversas áreas, além de sua condição geográfica e da potencialização dos fluxos dos materiais (FABRIS *et al.*, 2020).

Na existência de redes de ampla ajuda, todas as decisões intraorganização podem influenciar os resultados interorganização, com isso deve-se ter a clareza que todas as modificações prioritariamente seguem os preceitos do tripé da sustentabilidade, orientados para o auxílio recíproco, existente na natureza, muito conhecida pelos biólogos como Simbiose, que significa “viver junto” (TREVISAN *et al.*, 2016) esquematizado na Figura 2.

Figura 2 - Exemplo simbiótico industrial



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Trevisan *et al.*, (2016).

É importante enfatizar que o ciclo simbiótico transcende apenas pelo reaproveitamento dos resíduos da indústria A, que são aproveitados como matéria prima para a indústria B e sucessivamente para as demais empresas do complexo. Além deste item, podem ocorrer permutas de energias, recursos humanos e empresas terceirizadas (segurança e transporte).

Fabris *et al.* (2020) correlacionam a economia circular das empresas como uma célula ativa das trocas de insumos (subprodutos), recursos e conhecimentos, estando diretamente relacionados à sistemática da simbiose industrial, com objetivo comum de maximizar os resultados e minimizar os impactos ambientais.

Conforme Baldassarre *et al.* (2019), a SI é considerada uma rede de empresas separadas empresarialmente, mas juntas por uma rede de cooperação mútua, com trocas das mais diversas formas (materiais, energia e insumos), visando vantagens competitivas, encontrando-se conectados em ecossistemas com estruturas montadas geograficamente próximas, visando a redução da poluição e benefícios estratégicos via redução dos custos, intercâmbios tecnológicos e transformações culturais de colaboração entre empresas. O sucesso das transformações simbióticas está na compreensão da cultura regional e suas interligações entre empresas parceiras do processo (TREVISAN *et al.*, 2016).

A Simbiose Industrial transmite uma segurança às empresas que estão inseridas nessa estratégia de compartilhamentos, como exemplificam Campbell,

Jardine e McGlynn (2011), quando existe a necessidade de substituição de dispositivos mecânicos e ou eletrônicos dos ativos, tem-se a formalização de uma rede de fornecedores, reparando os componentes (coleta, reciclagem e reuso), reduzindo o custo da operação e mantendo o fluxo produtivo sustentável.

## 2.2 Economia Circular

A partir de uma lógica estratégica para a inovação sustentável do ecossistema, a Economia Circular (EC) apresenta uma visão de novos nichos de mercado e estratégias inovadoras (AZEVEDO, 2015; LEITÃO, 2015). Para Porter e Linden (1995), esta afirmação está correta, pois produtos são desenvolvidos com visão do reuso de seus materiais, constituindo estratégias competitivas e de inovação.

Assim, fala-se muito em Economia Circular, como se fosse um conjunto de ações simples e rápidas, mas há que se pontuar que se trata de uma modificação comportamental, de atitudes empresariais e governamentais, devido às necessidades de reaproveitamento e reuso de forma sustentável dos materiais processados (COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020). Heyes *et al.* (2018), nesse sentido, corroboram com uma visão coerente sobre as dificuldades da implantação da EC nas empresas, emergindo entraves possíveis devido às mudanças culturais corporativas que estão enraizadas com as estratégias da economia linear.

Abreu e Ceglia (2018) comentam com conhecimento de causa que realizar uma transição da Economia Linear para a Economia Circular exige um grande esforço de todos os envolvidos no processo, pois se trata de uma mudança sistêmica, que afeta todos os intervenientes da cadeia de valor, assim como inovações substanciais na tecnologia, na organização e na sociedade. Corroborando Ingemarsdotter, Jamsin e Balkenende (2020), argumentam a importância da criação de valor aos processos, por meio da implementação de estratégias relacionadas à Economia Circular, principalmente na área da manutenção dos ativos.

Nesta criação de valor na área de manutenção, pode-se verificar a Norma ISO 14040:2009 (ABNT, 2009), que apresenta os requisitos mínimos envolvidos na avaliação do ciclo de vida, sendo ele desde a extração da matéria-prima, até a disposição final dos produtos, é nela que estão definidas as questões ambientais, por meio do consumo de energias, emissões atmosféricas e até mesmo pela deterioração da camada de ozônio.

Moni *et al.* (2019) relacionam a Análise do Ciclo de Vida (ACV) como sendo uma ferramenta que avalia os impactos gerados pelos produtos desde as fases iniciais do desenvolvimento, até a finalização de sua funcionalidade. Para Franciosi *et al.* (2018), descrevem o quanto é importante o ciclo de vida dos componentes, devido às definições gerenciais nos Sistemas Simbióticos, via correta recuperação e ou reutilização dos componentes.

Jasiulewicz-Kaczmarek e Gola (2019) correlacionam a manutenção da última década como sendo uma atividade determinante para a redução dos custos, devido ao ciclo de vida dos componentes. Existem nos processos de manutenção uma relação direta ao ciclo de vida dos equipamentos, assim alavancando seus ativos e agregando valor através da estabilidade produtiva (JASIULEWICZ-KACZMAREK; GOLA, 2019).

Para Campbell e Jardine (2001), a extensão do ciclo de vida do equipamento é baseada na utilização de métodos/estratégias convenientes, com o mínimo possível de danos ao meio ambiente (HEYES *et al.*, 2018). Este incremento, na vida útil do equipamento, facilita a diminuição do consumo de energia, material e demais perdas relacionadas ao ciclo de vida dos equipamentos industriais (KARAULOVA; BASHKITE, 2016).

### **2.3 Manutenção**

Para a continuidade do desenvolvimento do tema em estudo, foram expostos os principais eventos relacionados à área de manutenção, iniciando por um breve descritivo dos tipos mais comuns de manutenção e direcionamentos para a manutenção estratégia com a visão a redução das perdas dos ativos, seguindo neste contexto, será adentrado a temática das falhas dos ativos. Na sequência será introduzida a metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade - RCM, que se inicia pela introdução ao RCM, sucintamente se discorre a temática sobre sua formatação da implantação, bem como os critérios de avaliação da criticidade dos ativos, finalizando o referencial, a análise dos modos de efeitos, falhas e criticidade, por via dos três parâmetros balizadores.

Entre os tipos de manutenção existentes, será explanado na sequência, de forma sintética, os tipos mais usuais nas empresas, conforme as intervenções: a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva.

### 2.3.1 Manutenção corretiva

Esta é a manutenção que ocorre no instante em que a utilização de um componente aproveita toda sua vida útil, neste caso é considerado como máximo uso, mas, para esta condição de troca, possivelmente será em momento inesperado e com perdas no processo produtivo (CORRÊA; DIAS, 2016). Sendo o principal objetivo da manutenção corretiva o de corrigir e/ou restaurar os ativos, motivo este que resulta na maior perda financeira entre as outras manutenções, pois afeta diretamente lucro do negócio, mais conhecido como lucro cessante, devido à interrupção do fluxo produtivo (TAKAHASHI; OSADA, 2015).

Sellitto (2022) descreve que este tipo de manutenção é de baixo custo, em contrapartida, pode gerar contratempos relacionados à qualidade do produto, paradas inesperadas e até mesmo ineficiência nos atendimentos aos clientes. As paradas com ação corretiva dos ativos são um dos maiores prejuízos produtivos causados pela área de manutenção (VIERO; NUNES; STAHNKE, 2015). Respalhando esta análise, Sellitto (2022) descreve que esta perda geralmente é irreparável para as áreas produtivas.

Em tempo, existem duas variantes de manutenção corretiva, a não planejada e a planejada. As diferenças entre tais variantes não foram desenvolvidas nesta pesquisa, pois o propósito é aprofundar a manutenção estratégica, metodologias aplicáveis e suas diversas influências no fluxo produtivo.

### 2.3.2 Manutenção preventiva

Esta manutenção tem como principal influenciador o planejamento da execução, seja ela do equipamento ou subconjunto a ser mantido, esta formatação apresenta a substituição antecipada à falha, normalmente com datas predefinidas antecipadamente (lubrificações, reapertos, ajustes mecânicos e ou substituições), situação que muitas empresas observam somente o custo e não como uma forma estratégica no fluxo produtivo (SELLITTO, 2022).

Para Viero, Nunes e Stahnke (2015), este tipo de manutenção demonstra que a empresa está direcionada a uma reformulação em sua cultura, por conta de garantir que seus ativos reduzam ao máximo as falhas inesperadas.

Campbell e Jardine (2001) descrevem duas circunstâncias importantes na tomada de decisão quanto às trocas dos componentes preventivamente, a primeira, se o custo a ser aplicado é menor que o ativo ficar inoperante, já a segunda está relacionada se a falha possa intervir em outros componentes e, se assim for, a aplicação preventiva é aconselhável. Corroborando Corrêa e Dias (2016), estes autores ressaltam a importância que a ação preventiva seja executada antes que a falha aconteça, aproveitando o planejamento para sua execução e sem que prejudique o fluxo produtivo.

Conforme Corrêa e Dias (2016), as manutenções preventivas estão relacionadas pelo tempo de uso e vida útil dos componentes, muitas vezes também através da sensibilidade humana e ou medições específicas (vibração, termografia, ferrografia), estas análises sistematicamente são geradoras de novas atuações preventivas. Para Sellitto (2005), estas informações oriundas das análises são por vezes influenciadoras nas decisões do gestor de manutenção, pois é através delas que se pode conseguir a otimização dos tempos e custos relacionados à manutenção, ocasionando maior disponibilidade dos ativos e reduzindo possíveis anomalias à capacidade produtiva.

### 2.3.3 Manutenção preditiva

Conforme Sellitto (2022), a manutenção preditiva também é conhecida como manutenção com base no estado do equipamento, devido ao monitoramento da vida útil dos componentes antes que sua falha ocorra. Neste tipo de manutenção, a cultura da empresa vislumbra a manutenção como protagonista, por meio da disponibilidade e confiabilidade dos ativos

Silvestri *et al.* (2020) relatam que, nas últimas 3 (três) décadas, ocorreu um aumento significativo nas pesquisas relacionadas à manutenção preditiva, este fato está diretamente associado aos seus resultados positivos, devido à melhoria do desempenho, qualidade de fabricação dos produtos e da utilização dos ativos, eliminando paradas inesperadas, bem como, aumentando a disponibilidade com custos mínimos de manutenção (TAKAHASHI; OSADA, 2015).

Conforme Zhao, Bai e Zhang (2019), a manutenção preditiva está diretamente relacionada à possibilidade de mapear as falhas, com ênfase em monitorar os desgastes, prever possíveis falhas e detectar desvios nos ativos, com a finalidade

principal de diagnosticar e antever possíveis distorções dos componentes, via coleta de dados realizadas por sensores ultrasensíveis que captam variações nas leituras das frequências pré-definidas, de acordo com o equipamento a ser analisado. (LI; WANG; WANG, 2017).

Li, Wang e Wang (2017) ressaltam que, pelo avanço da tecnologia de controle, a manutenção preditiva e ou prescritiva, são direcionadores para as tomadas de decisões, desde a sua falha potencial (inicial), até mesmo sua falha funcional (parada indesejada) de forma rápida e precisa, ampliando a robustez da ação. Comparações realizadas por Campbell e Jardine (2001) calculam que uma unidade (valor empírico) de trabalho de manutenção realizado com planejamento é de US\$ 1, e, de forma não planejada, US\$ 1,50. Ademais, se for relacionada à avaria do ativo, pode chegar a US\$ 3, ou seja, o custo das manutenções não planejadas pode custar entre 50% e 200% da planejada.

Almeida e Parra (2018) julgam que a função da manutenção detectiva é de analisar falhas ocultas, não perceptíveis aos manutentores e, como resultado, não parar os ativos em momentos inoportunos, analisando qual o melhor momento próximo para seu reparo, por meio da manutenção programada. Os autores afirmam que técnicas como a FMEA são essenciais em um plano de manutenção detectiva.

#### 2.3.4 Manutenção estratégica

Importante ressaltar que, nesta parte do referencial, algumas vezes será usada a descrição manutenção estratégica, mas existem relações muito próximas da Manutenção Lean. Neste cenário, Sellitto (2022) contextualiza sobre a mudança de visão relacionada à manutenção dos ativos, afirmando que, no passado, a manutenção era vista como área técnica, mas com a mudança da visão das organizações, atualmente ela está inserida estrategicamente nas empresas.

Ramiya e Suresh (2021) enfatizam a manutenção como área destaque nas corporações, bem como, um grupo que protagonize a redução/eliminação dos desperdícios, sendo este processo de transformação dividido com as pessoas vinculadas via iniciação da implantação de ferramentas enxutas.

Mouzani e Bouami (2019) correlacionam de modo comum as empresas com visões relacionadas à área de manutenção, por vezes considerada apenas um setor de despesas. Com as mudanças globais e percepções de algumas empresas, estas

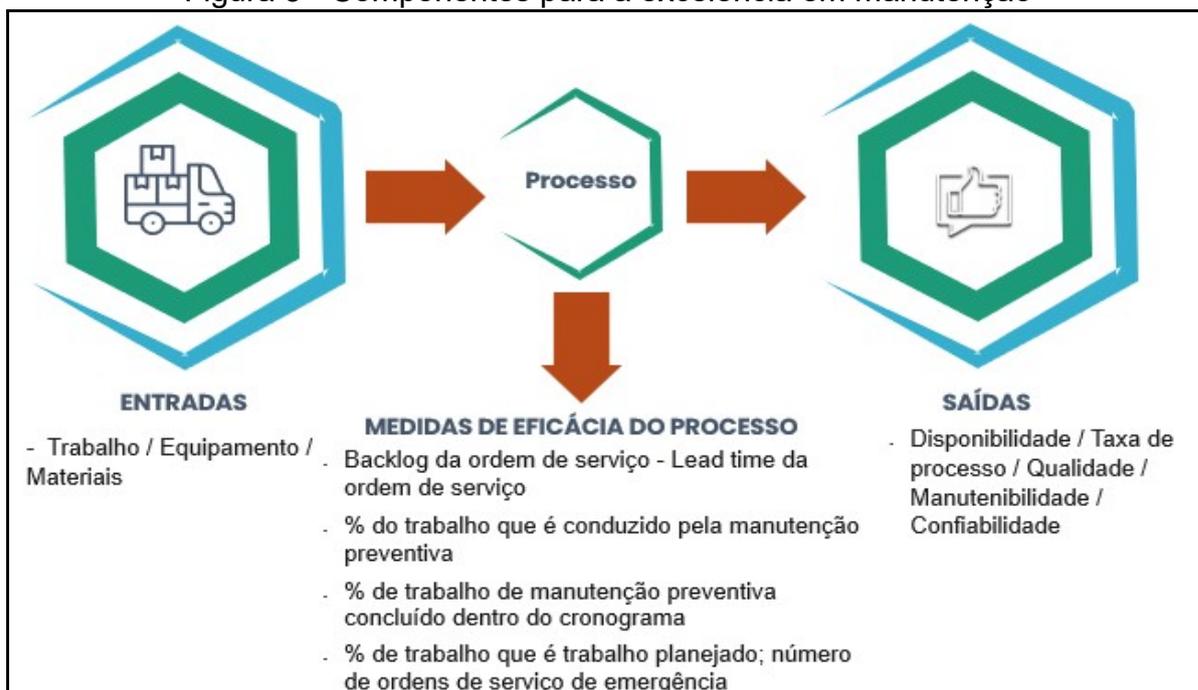
definições estão sendo modificadas, por meio do resultado que a manutenção pode exercer perante o negócio como um todo, através da eliminação das perdas por paradas inesperadas dos ativos, do aumento da produtividade, da garantia da qualidade mais assertiva, além das reduções dos impactos ambientais (SILVA; SOUZA, 2021).

Zonta *et al.* (2020) afirmam que, em certos casos, a manutenção como um todo pode representar até 60% dos custos de uma empresa, em função das diversas variáveis mensuráveis envolvidas, como produtos defeituosos no processo, queda da velocidade dos ativos e até mesmo os não mensuráveis como a desmotivação e a queda de rendimento operacional.

Silva e Souza (2021) argumentam que, no passado, a manutenção dos ativos era uma área com relação direta somente a custos, mas, com a competitividade e a necessidade das empresas de perpetuar seus negócios não somente no curto prazo, esta visão está sendo modificada rapidamente. De acordo com Campbell e Jardine (2001), a gestão dos ativos estão mais em evidência, devido à concorrência acirrada e da criação de valor, dado o diferencial competitivo que representa financeiramente. Corroborando Silvestri *et al.* (2020), destacam a atuação da manutenção como essencial para as transformações estratégicas das empresas, pois se percebe o possível impacto no ciclo produtivo, na segurança e na qualidade dos produtos.

Campbell e Jardine (2001) correlacionam a manutenção como um processo de negócios, formado de entradas que se transformam em saídas utilizáveis e com valores tangíveis (aumento produtividade) e intangíveis (técnicas, motivação e trabalho em equipe), conforme podemos verificar na Figura 3.

Figura 3 - Componentes para a excelência em manutenção



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Campbell e Jardine (2001).

Takahashi e Osada (2015) enfatiza que a meta de toda a empresa é elevar o valor do índice de utilização dos ativos ao máximo possível, fortalecendo, assim, a resiliência do negócio, mas existem algumas dificuldades para o desempenho do andamento perfeito das etapas de manutenção dentro das organizações, tais como:

- I. Definições de paradas para as manutenções (preventiva e preditiva) conforme o alinhamento entre as áreas envolvidas (PCP/Produção/ Manutenção);
- II. Custos aplicados às manutenções de acordo com o orçamento matricial definido nos planos estratégicos;
- III. Imprevistos de tempo, execução e mão de obra envolvida nos trabalhos.

Mouzani e Bouami (2019) destacam que estas implementações estratégicas resultam em diversos benefícios financeiros, pessoais e sociais, mas ressaltam também os pontos negativos que esta mudança pode gerar nas pessoas, como: estresse devido ao aumento das responsabilidades funcionais, muitas vezes não aceito por alguns envolvidos. Num relevante comparativo, Campbell e Jardine (2001) argumentam sobre a gestão da manutenção, com referência à qual direção tomar, no sentido de serem cobrados pela redução dos custos e ao mesmo momento pela melhoria da eficiência de seus ativos. Resultado esperado por conta da preservação do ativo e da redução da indisponibilidade, da qualidade dos produtos, dos prazos das

entregas e o mais importante, neste sentido, é a agregação de valor ao cliente final. (CAMPBELL; JARDINE, 2001).

Kim, Campbell e Reyes-Picknell (2015) descrevem os três principais elementos para a evolução à excelência em manutenção, composto da liderança, controle e melhoria contínua, que, na sequência, foi desenvolvido resumidamente.

- I. Liderança: este é o principal elemento, pois, para a gestão dos ativos, a liderança é crucial para o sucesso, dela partem todas as definições de recursos, metas destes eventos e, sobretudo, que a manutenção agregue valor ao negócio.
- II. Controle: atualmente, deve-se iniciar com um planejamento assertivo, pois, a partir dele, concentram-se todos os recursos, definição de prazos das tarefas e materiais disponíveis, previsões de possíveis falhas e desvios. Cuidados com as entradas e saídas, pois a mudança de uma das entradas no processo pode gerar transtornos nas saídas (resultados) do planejamento.
- III. Melhorias contínuas: neste elemento, a utilização de técnicas e métodos de gerenciamento devem estar inseridos no contexto do evento de manutenção, sendo por meio da coleta de dados, gráficos e planos de ação, explorando as habilidades e conhecimentos dos integrantes do time.

A Tabela 3 apresenta as vantagens e desvantagens dos diversos tipos de manutenção.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos tipos de manutenção  
(continua)

Tipo de manutenção	Atuação	Finalidade	Particularidades
<b>Corretiva</b>	Atuação após a detecção da avaria ou falha, é prioritário frente às outras; muitas vezes ocasiona perdas de performance no equipamento.	Reparação e colocação do ativo em operação.	Custos são elevados; podem ocorrer danos ao equipamento; lucro cessante; 3x mais cara que a preventiva; utilizado em equipamentos de baixa criticidade.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos tipos de manutenção  
(conclusão)

Tipo de manutenção	Atuação	Finalidade	Particularidades
<b>Preditiva</b>	Realizada com base na condição do ativo; avaliação por medições e análises de parâmetros predeterminados.	Diagnosticar e prever falhas; Melhora a taxa de operação, indicando as condições a reestabelecer a condição normal do ativo.	Podem ocorrer trocas de componentes antes de seu desgaste.
<b>Preventiva</b>	Conforme tempo, condição e ou falha.	Redução de avaria e degradação do ativo	Pode despende de investimentos com a troca dos componentes.
<b>Estratégica</b>	Execução das ações de forma a gerar valor e com eficácia.	Como agregar valor ao cliente por meio da disponibilidade dos ativos.	Entregar de soluções de maneira eficaz, sem desperdícios e com valor para seus clientes.

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Corrêa e Dias (2020); Sellitto (2020; 2022); Dias e Fernandes (2022).

### 2.3.5 Indicadores de manutenção

Conforme: Duran, Capaldo e Acevedo (2017), Baran e Trojan (2016), ressaltam, há a necessidade de controlar o funcionamento e o tempo disponíveis que o ativo está em uso, com a intenção de registrar as perdas no processo produtivo, estes dados foram os norteadores para as decisões gerenciais, faz-se necessário, então, utilizar indicadores com finalidade de direcionar ações, neste caso, os mais comumente usados são o *Mean time Between to Repair* (MTBR) e o *Mean Time to Repair* (MTTR).

MTBF este é um indicador de confiabilidade e expressa o tempo médio entre falhas em horas, e representa o nível da produtividade do ativo, pois quanto maior o valor do MTBF, melhor, pois representa que o ativo está em funcionamento com maior tempo sem falhas (DURAN; CAPALDO; ACEVEDO, 2017). Para Takahashi e Osada (2015), este indicador é um valor atemporal do tempo médio entre falhas dos ativos.

A equação (1) expressa o cálculo do tempo médio entre falhas (MTBF).

$$MTBF = \frac{(TD-T)}{NAp} \quad (1)$$

Onde:

*MTBF* = Tempo médio de funcionamento entre avarias em horas;

*TD* = Tempo de funcionamento do ativo em determinado período (disponibilidade);

*TM* = Tempo total em manutenção;

*NAp* = Número de avarias no período.

Sellitto (2020) formula que o *MTTR* é um indicador de desempenho da eficiência da equipe de manutenção nos trabalhos corretivos, e ele é calculado através da média dos tempos de reparação das avarias (falhas) ocorridas em horas, durante um período preestabelecido, dividido número de intervenções realizadas. Pode-se analisar a fórmula na equação (2).

$$MTBF = \frac{(TD-TM)}{NAp} \quad (2)$$

Onde:

*MTTR* = Tempo médio de reparo no período

$\Sigma TRF$  = Somatório dos tempos de reparo no período

*NR* = Número de reparos no período

De acordo com a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), disponibilidade é referido ao intervalo de tempo em que um ativo está em disponibilidade (%) para o uso. A equação (3) informa a disponibilidade.

$$\% = \frac{MTBF}{MTBF-MTTR} \quad (3)$$

Com estas sínteses descritas acima, verificou-se a necessidade de realizar uma explicação em formato de um diagrama, para melhor elucidar os indicadores *MTTR* e *MTBR* e suas intervenções conforme Figura 4.

Figura 4 - Diagrama explicativo



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Sellitto (2020).

Campbell, Jardine e McGlynn (2011) ressalta a importância de aumentar a disponibilidade e a confiabilidade do ativo, através do aumento do *MTBF*, e minimizar ao máximo o *MTTR*. Como exemplificado na Tabela 4, foram desenvolvidos na sequência alguns indicadores relacionados à manutenção, mesmo que alguns deles não foram utilizados na pesquisa.

Tabela 4 - Indicadores de manutenção

Indicadores	Influência	Fórmula
MTBF	Tempo médio entre falhas	$MTBF = \frac{(TD - TM)}{NAp}$
MTTR	Tempo médio de reparo no período	$MTTR = \frac{\sum TRF}{NR}$
MTTF	Tempo médio para falha	$MTTF = \frac{\sum RF}{n^{\text{e eventos}}}$
Disponibilidade	Produtividade	$\% = \frac{MTBF}{MTBF - MTTR}$
HHTP	Hora homem por tipo de manutenção	$HHTP = \frac{TP}{HH}$

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Correa e Dias (2020); Sellitto (2020); Dias e Fernandes (2022)

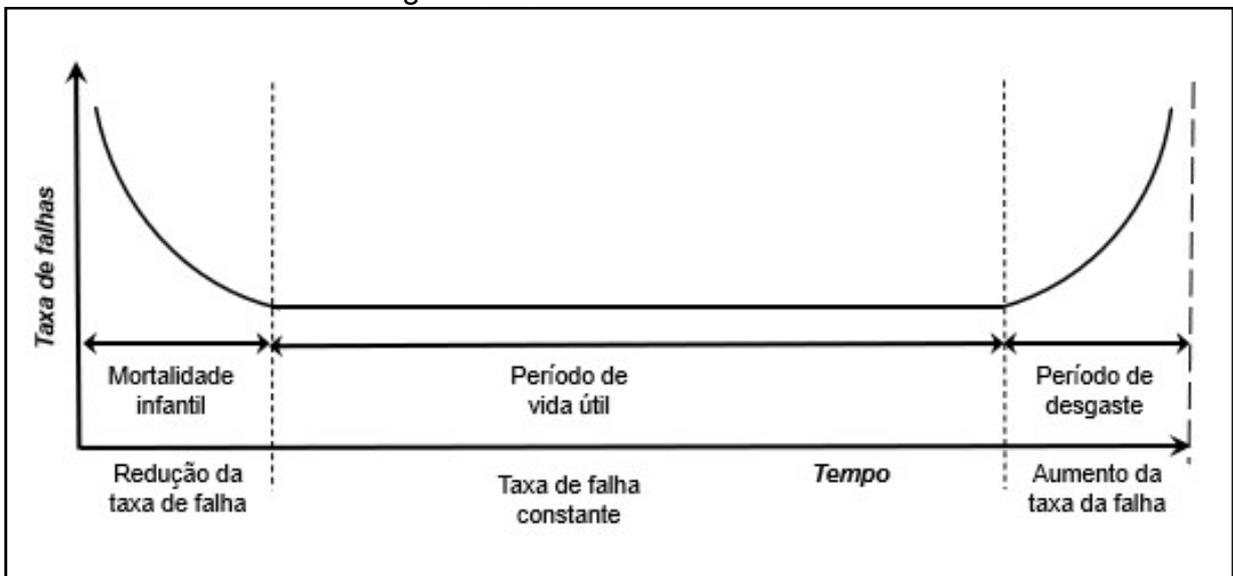
### 2.3.6 Falha dos ativos

De acordo com Campbell, Jardine e McGlynn (2011), o termo "falha" é considerado inexato e físico, e refere-se à perda das propriedades de um item. Já para Sellitto (2022), a falha é o fim da capacidade que um item tem de exercer sua função definida, e sua consequência é o efeito que ela tem sobre a falha, cuja gravidade é classificada de acordo com o efeito produzido. Schmitt e Lima (2016) corroboram essa

ideia, estabelecendo que a falha pode ser intrínseca e/ou extrínseca, estando diretamente relacionada a um acidente que impede o ativo de cumprir suas funções necessárias.

Sellitto (2005) descreve a curva da banheira como uma estrutura genérica que tem como objetivo representar a possibilidade de ocorrência de uma falha ao longo do tempo. Moubray (1997) descreve essa curva como uma forma peculiar de análise para a detecção de falhas, também conhecida como curva da taxa de falha, composta por três zonas em períodos distintos: a mortalidade infantil, a vida útil e o desgaste, como representado na Figura 5.

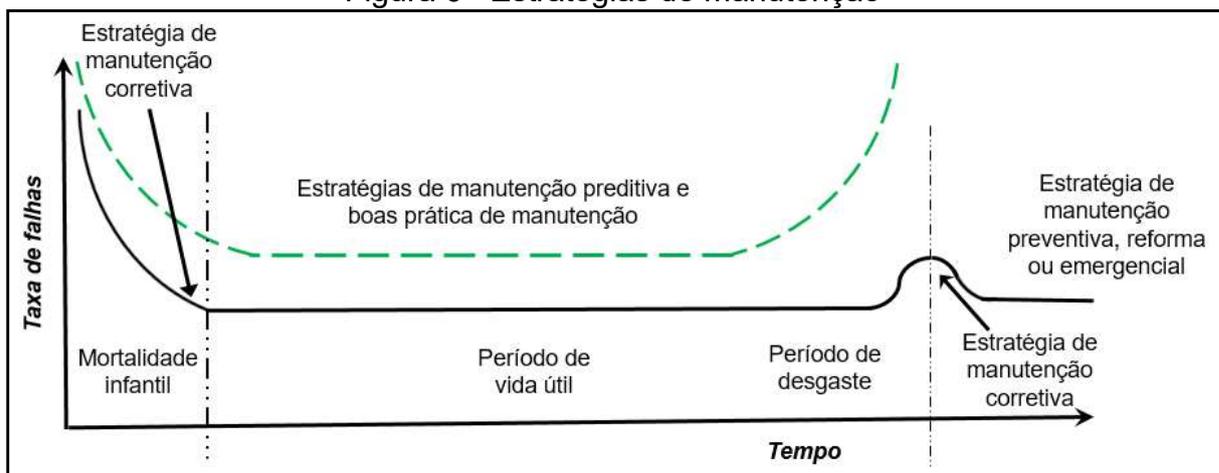
Figura 5 - Curva da taxa de falha



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Moubray (1997); Sellitto (2005).

Moubray (1997) e Sellitto (2005) dividem a curva da banheira em três fases: a primeira é a mortalidade infantil, em que as falhas ocorrem devido a problemas relacionados à fabricação, instalação, erros de projeto ou montagem incorreta; a segunda é a fase de vida útil, em que as falhas ocorrem aleatoriamente; e a última é a fase de desgaste, em que os componentes atingem o fim da vida útil. Outro ponto relevante descrito por Sellitto (2005) é o uso da curva da banheira para definir estratégias de manutenção, conforme representado na Figura 6.

Figura 6– Estratégias de manutenção



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Moubray (1997); Sellitto (2005).

Na norma IMCA M 166 (IMCA, 2019), destacam-se três principais níveis de falhas: os com efeitos sistêmicos, os locais e os globais. Os efeitos locais estão diretamente relacionados ao ativo ou ao subsistema responsável por uma operação, os efeitos sistêmicos estão relacionados aos impactos de todo um sistema ou em partes dele, e o global seria a falha em diversos sistemas, indisponibilizando toda uma fração local.

Em geral, as falhas são classificadas de acordo com o efeito que geram perante o ativo, podendo ser funcional ou potencial. De acordo com Sellitto (2005), falha funcional está diretamente relacionada à ineficiência do ativo em executar sua função definida. Ela pode ser oculta, múltipla ou evidente. Na falha potencial, existe a condição de ser identificada e mensurada antecipadamente. De acordo com Oliveira *et al.* (2020), as falhas dos ativos são descritas como sendo o sintoma, que nada mais é que a manifestação que a falha potencial já existe e que a próxima consequência possivelmente será o efeito, sendo este o momento que a falha já aconteceu.

A norma IMCA M 166 (IMCA, 2019) destaca as falhas ocultas, que não estão em evidência no primeiro contato do manutentor, mas podem aparecer ao longo do tempo, na sequência do sistema. Na Tabela 5, é possível analisar algumas categorias de falhas, prejuízos causados, possíveis danos e exemplos de falhas reconhecidas na prática pelas áreas de manutenção.

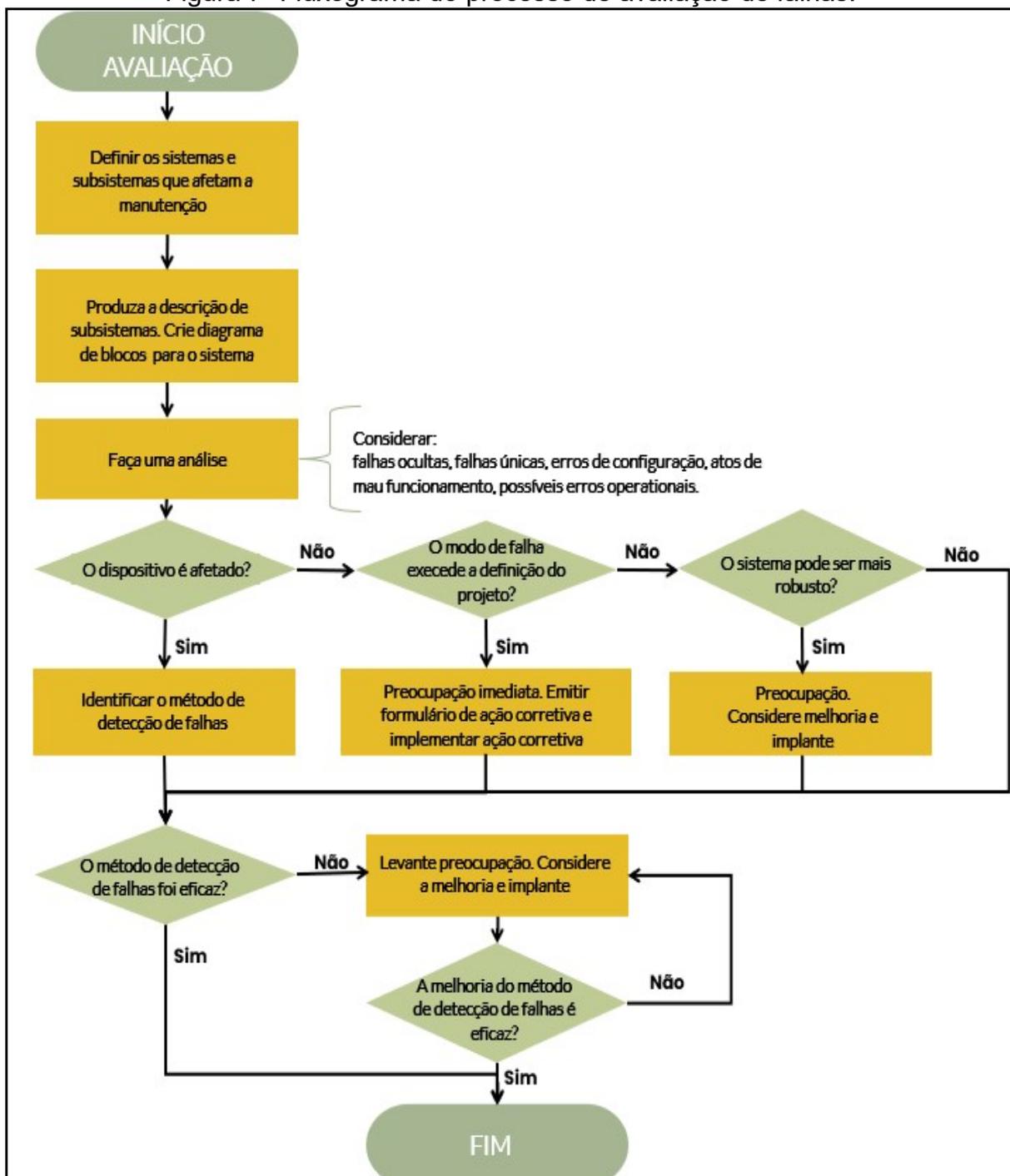
Tabela 5- Categorização, prejuízos e danos das falhas

Categorias	Prejuízos	Dano/perda	Exemplos
Catastróficas	Imensuráveis	Acidente grave e ou equipamento	Curto-circuito, vazamentos e incêndios
Simple	Apenas um item do equipamento	Perda parcial de um dispositivo	Quebra de cilindro, vazamentos
Permanentes	Irreparáveis	Perda total de um dispositivo	Não há possibilidade de conserto
Intermitentes	Atraso a clientes	Ocorre periodicamente	Bomba de recalque com cavitação
Mascaradas	Parada inesperada	Parada inesperada e sem definição	Difíceis de detecção
Potencial	Parada inesperada, com possibilidade de prevenção	Afeta a performance	Vazamentos, excesso de vibração, ruídos
Funcional	Incapacidade de execução	Parada acidental	Vazamentos de lubrificantes, vida útil do componente

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Corrêa e Dias (2020); Takahashi e Osada (2015); Campbell, Jardine e McGlynn. (2011).

Como uma solução ideal para possíveis falhas, deve-se inserir no sistema meios de alertar a operação sobre o local da falha assim que ela ocorra, por meio de avisos sonoros e alarmes. Isso porque somente a implantação do FMECA não resultará na eliminação dessa falha, uma vez que ele analisa falhas individuais e não do sistema (IMCA, 2019). Para finalizar a temática sobre falha, a Figura 6 mostra um exemplo de avaliação de falhas.

Figura 7- Fluxograma do processo de avaliação de falhas.



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de IMCA M 166 (IMCA, 2019).

Para uma melhor compreensão da Figura 7, é necessário descrever brevemente as fases do processo de avaliação de falhas e suas interfaces.

Conforme a Figura 7, inicia-se o processo de avaliação de falha a partir da identificação das falhas do sistema e ou subsistema; cria-se um diagrama de blocos do mais alto nível, ou seja, do sistema que está em análise, até o detalhamento da peça, com a finalidade de encontrar as possíveis causas da falha; na sequência,

trabalha-se na análise dos níveis superiores (sistema) e inferiores (eventos relacionados ao componente unitário); a análise dos níveis superiores (sistema) e inferiores (eventos relacionados ao componente unitário) é, então, realizada.

Nessa análise, a primeira pergunta a ser feita é se o componente foi danificado. Se a resposta for sim, o método de detecção da falha é definido, analisado e monitorado para garantir que seja eficaz. Se a resposta for negativa, outra pergunta é feita: se o modo de falha excede o projeto? Se a resposta for sim, é iniciado um processo corretivo urgente. Se a resposta for não, é analisado se o sistema pode ser mais robusto. Se também for negativo, um método de detecção é instalado. O processo continua até que a detecção seja eficaz em todos os itens finais.

## **2.4 Manutenção centrada na confiabilidade – RCM**

### 2.4.1 Introdução ao RCM

Nesta pesquisa, realizamos uma análise da ferramenta de criticidade dos ativos, visando identificar as prioridades de manutenção. Em seguida, aprofundaremos a metodologia de Análise dos Modos e Efeitos da Falha (FMEA) para manutenção, que nos orientará a melhorar a eficiência por meio da análise dos efeitos, tipos e modos de falhas. Por fim, realizaremos uma avaliação do risco associada aos modos de falha classificadas conforme a importância da criticidade, introduzindo a ferramenta de Análise do Modo de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA).

### 2.4.2 Implantação do RCM

De acordo com Oliveira *et al.* (2020), a *Reliability Centered Maintenance* (RCM) teve origem nos trabalhos realizados pela Empresa Boeing (EUA), em 1968, voltados para o Boeing 747. Foi somente em 1999 que um comitê da Suíça elaborou a primeira norma (IEC 60300-3-12) que direcionava políticas de gerenciamento de falhas. Em 2012, nos Estados Unidos, foi lançada a SAE JA 1012, que tratava das falhas relacionadas ao setor automotivo e se estendeu a outras áreas.

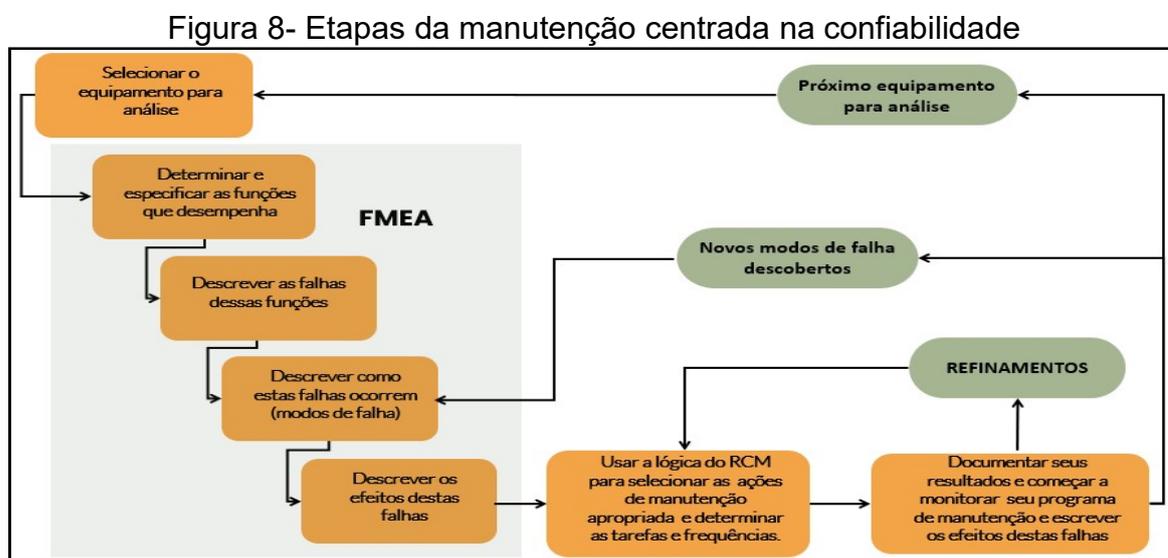
De acordo com Campbell, Jardine e McGlynn (2011), o objetivo principal da RCM é eliminar a indisponibilidade dos ativos, antecipando possíveis falhas por meio de uma investigação aprofundada, detecção e prevenção, agregando valor à

funcionalidade do ativo. Oliveira *et al.* (2020) afirmam que a metodologia RCM busca otimizar estrategicamente a manutenção, preservando o ativo operante o maior tempo possível, de forma segura e confiável, reduzindo o custo do ciclo de vida do ativo, que pertence ao ativo desde o desenvolvimento do projeto até o seu descarte final.

Para Moubray (1997), a RCM visa atender às necessidades das empresas em relação aos ativos, estabelecendo metodologias para análise de falhas com critérios de priorização conforme aspectos econômicos, garantindo a vida útil do ativo com práticas eficazes e seguras.

A metodologia RCM oferece oportunidades nas áreas de segurança, integridade ambiental, disponibilidade da planta e melhoria no ciclo de vida do ativo, mas também recebe críticas devido à mística de ser um custo alto para resolver problemas simples, além de ser vista como uma prioridade inferior em empresas que não valorizam a conformidade e os cuidados ambientais (CAMPBELL; JARDINE; MCGLYNN, 2011).

Campbell, Jardine e McGlynn (2011) esquematizam 7 etapas principais para o processo da RCM, conforme pode-se verificar na Figura 8.



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Campbell, Jardine e McGlynn (2011).

De acordo com Oliveira *et al.* (2020), uma das principais características do RCM é a prevenção baseada na condição do ativo. Isso é feito por meio da identificação de falhas e dados históricos coletados em manutenções preventivas, preditivas e detectivas, utilizando o FMECA. O processo direciona as revisões para os componentes e se concentra em encontrar as causas raízes das falhas para resolvê-las.

### 2.4.3 Critérios de criticidade dos ativos

O estudo de Baran e Trojan (2016) destacam a importância da avaliação da criticidade dos ativos como fonte primária para a redução de perdas nas capacidades produtivas. Eles afirmam que é possível estabilizar o fluxo produtivo de maneira eficaz e coerente ao manter os equipamentos em condições de uso quando necessário, com qualidade, segurança e responsabilidade ambiental.

Silva e Souza (2021) complementam o estudo de Baran e Trojan (2016) e mencionam que outros aspectos importantes devem ser considerados na definição da criticidade dos ativos, como o desempenho e os requisitos legais. Além disso, Baran e Trojan (2016) acrescentam que o regime de trabalho e a disponibilidade dos ativos também devem ser levados em conta.

Campbell e Jardine (2001) destacam a importância da segurança e meio ambiente como critério para a avaliação da criticidade dos ativos. Não se deve negligenciar essas questões, já que qualquer risco potencial para as pessoas e o meio ambiente pode afetar a imagem da empresa.

A qualidade e produtividade também são critérios importantes na avaliação da criticidade dos ativos, já que afetam diretamente as finanças da empresa e podem prejudicar a relação com os clientes devido ao não atendimento dos prazos determinados.

O regime de trabalho e disponibilidade é um critério fundamental para definir a criticidade dos ativos em relação à estabilidade do fluxo produtivo. Ele é responsável por determinar a tomada de decisão em relação aos equipamentos.

Baran e Trojan (2016) recomendam o uso da ferramenta de classificação ABC para avaliar a criticidade das máquinas. Os equipamentos altamente críticos são classificados como classe A, aqueles relevantes ao processo são da classe B e os de baixo impacto no processo produtivo são da classe C.

A avaliação da criticidade dos ativos começa com a análise de risco e suas dimensões (consequência e probabilidade) inseridas em 6 circunstâncias (BARAN; TROJAN, 2016). A Tabela 6 apresenta um esboço da classificação ABC a partir da relação e suas variáveis de avaliação.

Tabela 6- Criticidades e seus impactos

(continua)

Fator de Avaliação	Critérios/escores			
	3	2	1	0
Segurança e meio ambiente	Caso falhe o ativo e provoque risco de vida e danos grave ao meio ambiente	A falha do ativo provoca grande impacto ambiental e grande efeito sobre a segurança.	A falha do ativo pode gerar risco ambiental ou efeito sobre a segurança.	Não se aplica.
Qualidade e produtividade	Caso o ativo pare, impacta de forma irrecuperável a imagem com o cliente.	A falha do ativo afeta muito a qualidade, por produtos defeituosos, afetando o faturamento.	A falha do ativo faz variar a qualidade do produto e afeta o faturamento da empresa.	Sem efeitos sobre o produto ou faturamento.
Regime de trabalho	Ativo exigido 24 horas por dia. 7 dias por semana.	Ativo exigido 24 horas por dia.	Ativo utilizado mais da metade do dia.	Uso ocasional.
Atendimento	Caso o ativo pare, irá interromper o processo e provocar o lucro cessante.	A falha do ativo provoca interrupção total do processo produtivo.	A falha do ativo provoca a interrupção do sistema reduzindo a produção.	Têm ativo reserva ou é mais econômico reparar o ativo.
Segurança e meio ambiente	Caso falhe o ativo e provoque risco de vida e danos grave ao meio ambiente	A falha do ativo provoca grande impacto ambiental e grande efeito sobre a segurança.	A falha do ativo pode gerar risco ambiental ou efeito sobre a segurança.	Não se aplica.
Qualidade e produtividade	Caso o ativo pare, impacta de forma irrecuperável a imagem com o cliente.	A falha do ativo afeta muito a qualidade, por produtos defeituosos, afetando o faturamento.	A falha do ativo faz variar a qualidade do produto e afeta o faturamento da empresa.	Sem efeitos sobre o produto ou faturamento.

Tabela 6 - Criticidades e seus impactos

(conclusão)

Fator de Avaliação	Critérios/escores			
	3	2	1	0
Regime de trabalho	Ativo exigido 24 horas por dia. 7 dias por semana.	Ativo exigido 24 horas por dia.	Ativo utilizado mais da metade do dia.	Uso ocasional.
Atendimento	Caso o ativo pare, irá interromper o processo e provocar o lucro cessante.	A falha do ativo provoca interrupção total do processo produtivo.	A falha do ativo provoca a interrupção do sistema reduzindo a produção.	Têm ativo reserva ou é mais econômico reparar o ativo.

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Herpich e Fogliatto (2013); Baran e Trojan (2016).

Os fatores descritos na Tabela 6 estão inter-relacionados. A segurança e o meio ambiente estão diretamente relacionados aos riscos potenciais para as pessoas e o meio ambiente, enquanto a qualidade e a produtividade estão relacionadas aos efeitos da falha dos ativos na qualidade dos produtos e no rendimento da empresa. A qualidade e a produtividade estão relacionadas com a conformidade do produto com as necessidades do cliente e os parâmetros definidos pela engenharia para a produção.

No regime de trabalho, a relação é com o tempo que o ativo está agregando valor à empresa e como a falha dos equipamentos afeta o processo produtivo. A frequência é a quantidade de falhas por período de utilização (taxa de falha), e o custo é o valor e o tempo envolvido na correção das falhas.

Para definir a criticidade dos ativos, é atribuída uma nota de 0 a 3 para cada uma das circunstâncias descritas na Tabela 6. Com base nesses critérios e notas, é possível realizar a soma das circunstâncias e encontrar a criticidade do ativo, além de sua priorização. Esse processo está ilustrado na Figura 9.

Figura 9- Fórmula de cálculo de criticidade



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Silva *et al.* (2019).

De acordo com Baran e Trojan (2016), após a soma das seis circunstâncias e a obtenção da nota de criticidade, utiliza-se esse valor para direcionar o ativo à sua devida categoria de criticidade, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1- Definição da criticidade

<b>NOTA</b>	<b>CRITICIDADE</b>	<b>ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO</b>
<b>9 a 16</b>	A = Criticidade Alta	Manutenção Preditiva
<b>6 a 9</b>	B = Criticidade Média	Manutenção Preventiva
<b>4 a 5</b>	C = Criticidade Baixa	Manutenção Corretiva
<b>&lt; 4</b>	Não aplicável	

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Herpich e Fogliatto (2013), Silva *et al.* (2019).

#### 2.4.4 Análise dos modos, efeitos de falha e criticidade - FMECA

A Análise de Modos, Efeitos e Criticidade (FMECA – *Failure Mode and Effects*) é uma ferramenta importante que foi desenvolvida na década de 1940 pelo Exército dos Estados Unidos, com o objetivo de reduzir falhas por meio da identificação, priorização e delimitação de potenciais falhas. Posteriormente, em 1963, a NASA (Agência Nacional de Aeronáutica) propôs transformá-la em uma metodologia, que foi acrescentada pela Ford Company em seus conceitos nas áreas de qualidade e desenvolvimento de projetos em 1978 (MENEZES, 2020).

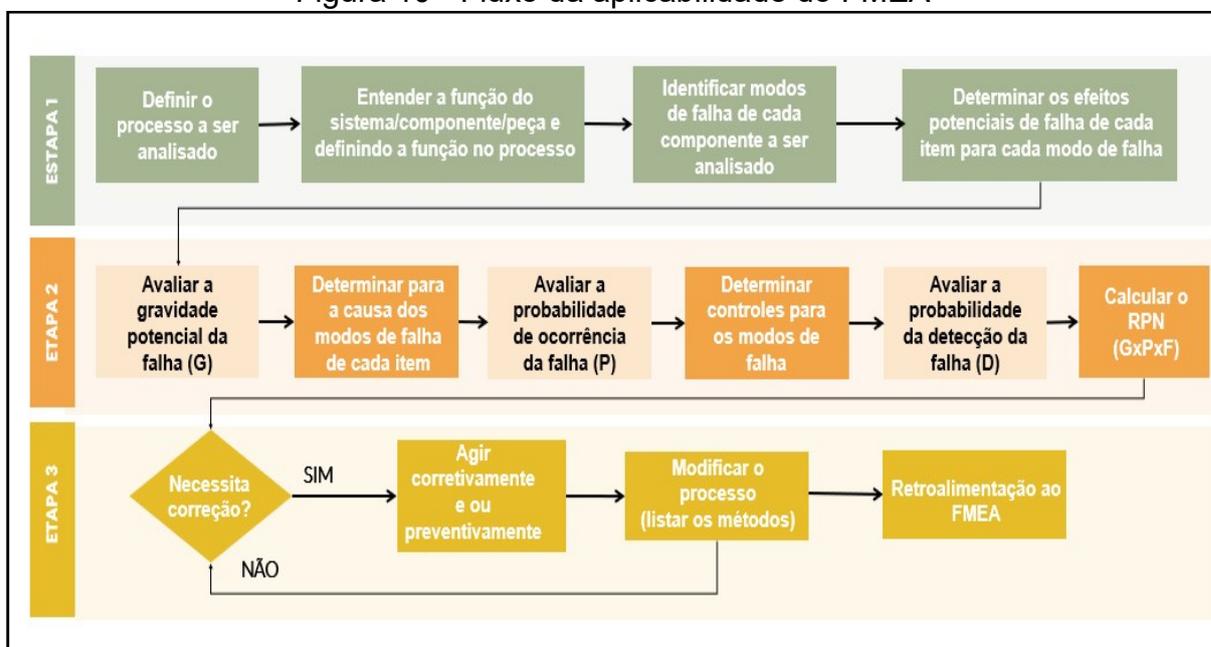
De acordo com Menezes (2020), a FMECA é uma ferramenta preventiva que aumenta a confiabilidade de projetos e processos, permitindo a detecção entre possíveis falhas e seus efeitos relacionados, sendo um documento vivo e passível de revisões contínuas. Para Herpich e Fogliatto (2013), a FMECA é uma técnica analítica de engenharia que visa encontrar a causa raiz e seus efeitos das falhas potenciais, permitindo que elas sejam identificadas e corrigidas por meio de análises qualitativas utilizadas nas áreas produtivas, principalmente no setor automotivo.

A norma IMCA M 166 (IMCA, 2019) define o FMEA como uma ferramenta capaz de identificar as falhas antes que elas ocorram e que pode ser aplicada em qualquer sistema, podendo incluir a análise de criticidade (FMECA) para identificar a criticidade das falhas em relação aos ativos, além de categorizá-las com base na probabilidade e gravidade da falha.

De acordo com Baran e Trojan (2016), a FMEA & FMECA (*Failure Mode Effects and Criticality Analysis*) são metodologias similares, pois a FMECA é a FMEA com a adição da análise de criticidade, ou seja, analisa os riscos por meio da falha potencial de acordo com a gravidade, probabilidade e a ocorrência combinadas, podendo ser uma análise qualitativa ou quantitativa. Por ser uma ferramenta complexa, a FMECA foi desenvolvida na prática para orientar e evidenciar preventivamente as falhas para a tomada de ações antes da ocorrência da falha (BARAN; TROJAN, 2016).

Silva (2019) apresenta um fluxo padronizado para facilitar a utilização prática da FMEA, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxo da aplicabilidade do FMEA



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Silva (2019); Baran e Trojan (2016).

Ao analisar a Figura 10, é possível notar que a primeira fase da aplicação da ferramenta FMEA consiste em definir o processo a ser analisado, levando em consideração o potencial da falha (global, sistêmica ou local). Em seguida, deve-se entender a função do sistema, componente ou peça, a fim de identificar os modos de falha e seus respectivos efeitos potenciais (BARAN; TROJAN, 2016; SILVA, 2019b).

Existem influenciadores diretos para o RPN (Risk Priority Number), como a severidade (impacto ou gravidade da falha), a ocorrência (probabilidade de a falha ocorrer), e a detecção (capacidade de detectar a falha antes que ela ocorra). Na aplicação do método FMEA/FMECA, é necessário adotar medidas essenciais para definir a classificação das prioridades, por meio da pontuação final. Quanto maior a

pontuação, maior será o risco de a falha ocorrer (CAMPBELL; JARDINE; MCGLYNN, 2011).

Na norma IEC 60812 (IEC, 2006), a severidade é pontuada de acordo com a gravidade do resultado. Já a ocorrência está relacionada com a quantidade de vezes que a falha ocorre em um determinado período de tempo, e a detecção se refere à probabilidade de detectar a causa raiz antes que ocorra ou imediatamente após. De acordo com a norma IMCA M 166 (IMCA, 2019), o RPN (*Risk Priority Number*) é calculado como o produto matemático entre os parâmetros de severidade, ocorrência e detecção. Os índices gerados hierarquizam as falhas conforme os valores encontrados, por meio da classificação do RPN, resultante do produto de três parâmetros: severidade da falha (S), probabilidade de ocorrência da falha (O) e probabilidade de detecção da falha (D), resultando em  $RPN = S \times O \times D$ . (HERPICH; FOGLIATTO, 2013; BARAN; TROJAN, 2015; SILVA, 2019b).

Na última fase do processo, após o cálculo do maior *Risk Priority Number* (RPN), verifica-se a necessidade de correção. Em caso afirmativo, é realizada a intervenção e modifica-se o processo, documentando a ação para posterior retroalimentação do FMEA com os novos direcionamentos (BARAN; TROJAN, 2016; SILVA, 2019).

Quanto à severidade, Baran e Trojan (2016) afirmam que ela está diretamente relacionada às questões prioritárias nas empresas, como a segurança, o meio ambiente e a funcionalidade. Devido à existência de diversas classificações para priorizar o RPN, é conveniente utilizar os critérios de avaliação de severidade descritos pela *Ford Motor Company* (1998), conforme apresentado na Tabela 7, uma vez que estão diretamente relacionados ao tema em estudo, a manutenção dos ativos.

Tabela 7- Níveis de Severidade

		(continua)
SEVERIDADE	EFEITO DA SEVERIDADE	SCORE
Nenhuma	Sem efeito identificado.	1
Muito menor   Incômodo e desconforto	Itens de ajuste. Barulho não conforme. Defeito evidenciado por clientes (menos que 25%).   Pequena inconveniência para operação e operadores.	2
Menor   Interrupção menor	Itens de ajuste. Barulho não conforme. Defeito evidenciado por clientes (menos que 50%).   Retrabalho em uma parcela do lote antes de ser processado.	3

Tabela 7- Níveis de Severidade

SEVERIDADE	EFEITO DA SEVERIDADE	(conclusão) ESCORE
Muito baixo   Interrupção menor	Itens de ajuste. Barulho não conforme. Defeito evidenciado por clientes (menos que 75%).   Retrabalho de 100% do lote antes de ser processado.	4
Baixo   Perda ou interrupção	Equipamento operável, mas itens de conforto conveniência operáveis com níveis de desempenho reduzidos.   Retrabalho em uma parcela de produtos fora da linha e aceito.	5
Moderado   Perda ou interrupção	Equipamento operável, mas itens de conforto   conveniência inoperáveis. Clientes insatisfeitos.   Necessário retrabalho em 100% do lote fabricado	6
Alto   Grande perda significativa	Equipamento inoperável, mas com níveis de desempenho reduzidos. Cliente muito insatisfeito.   Parcela lote refugado, redução do fluxo produtivo e possibilidade de acréscimos de mão de obra.	7
Muito alto   Perda total do produto ou processo	Equipamento inoperável (perdas das funções primárias).   Não afeta a segurança, refugado 100% produção, parada do fluxo produtivo.	8
Perigoso com aviso prévio   Falha em atender normas ou requisitos legais	Modo de falha potencial afeta a segurança na operação do equipamento com aviso prévio.   Não conformidade com normas regulamentadoras e com aviso prévio ou pode trazer perigo ao operador.	9
Perigoso sem aviso prévio   Falha em atender normas ou requisitos legais	Modo de falha potencial afeta a segurança na operação do equipamento sem aviso prévio.   Não conformidade com normas regulamentadoras, sem aviso prévio ou pode trazer perigo ao operador.	10

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Ford Motor Company (1988); Fogliatto e Duarte, (2011).

Prosseguindo com a análise de priorização de riscos, Campbell, Jardine e McGlynn (2011) enfatizam a importância da ocorrência de falhas, que se refere à frequência com que um modo de falha acontece ou a probabilidade de ocorrer a falha. Geralmente, para reduzir a ocorrência do modo de falha, é necessário analisar e modificar o projeto (SCHMITT; LIMA, 2016).

Os critérios de avaliação propostos por de Fogliatto e Duarte (2011) são baseados em uma escala de 1 a 10, na qual 1 representa a menor probabilidade de ocorrência da falha e 10 a maior, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação das Ocorrências

PROBABILIDADE DE FALHA	TAXA DE FALHAS POSSÍVEIS	SCORE
Remota: falha é improvável	Chance remota de falha	1
Baixa: relativamente poucas falhas	Frequência muito baixa: 1 vez a cada 5 anos	2
	Pouco frequente: 1 vez a cada 2 anos	3
	Frequência baixa: 1 vez por ano	4
Moderada: falhas ocasionais	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5
	Frequência moderada: 1 vez por ano	6
	Frequente: 1 vez no semestre	7
Alta: falhas frequentes	Frequência elevada: algumas vezes por semana	8
Muito alta: falhas persistentes	Frequência muito elevada: 1 vez ao dia	9
	Frequência máxima: várias vezes ao dia	10

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Fogliatto e Duarte (2011).

Para finalizar a análise dos índices de priorização, Baran e Trojan (2016) destacam que a detecção está relacionada à capacidade de um sistema de controle de detectar modos potenciais de falha. Já Leal, Pinho e Almeida (2006) enfatizam a importância da detecção antes que a falha ocorra e interfira no cliente.

A Tabela 9 apresenta o sistema de pontuação para detecção, com uma escala de 1 a 10. O valor 1 indica que o modo de falha será detectado durante o processo, enquanto o valor 10 indica que certamente o potencial de falha não será detectado.

Tabela 9 - Classificação da detecção.

			(continua)	
DETECÇÃO		CRITÉRIO	MÉTODO DE DETECÇÃO	SCORE
Quase certa	Controles certamente detectaram	Item projetado a prova de erros pelo projeto	Prova de erro	1
Muito Alta	Os controles quase certamente detectarão	Erro detectado na estação (medição automática)	Prova de erro e Medição	2

Tabela 9 - Classificação da detecção.

				(conclusão)
DETECÇÃO		CRITÉRIO	MÉTODO DE DETECÇÃO	ESCORE
Alta	Controles com altas chances de detectar	Erro detectado na estação ou em estação subsequente	Prova de erro e Medição	3
Moderada alta	Controles com moderada chance de detectar	Erro detectado em operações subsequentes	Prova de erro e Medição	4
Moderada	Controles podem detectar	Controle baseado em medições feitas em 100% das peças	Medição	5
Baixa	Controles podem detectar	Utilização de métodos gráficos como CEP (Controle Estatístico do Processo)	Medição e inspeção manual/ visual	6
Muito baixa	Controles tem pouca chance de detectar	Controle alcançado somente com dupla inspeção visual	inspeção manual/ visual	7
Remota	Controles tem pouca chance de detectar	Controle alcançado somente com inspeção visual	inspeção manual/ visual	8
Muito remota	Controles provavelmente não irão detectar	Controle alcançado somente com verificação aleatória ou direta	inspeção manual/ visual	9
Quase impossível	Certeza absoluta de não detectar	Não pode detectar ou não é verificado	inspeção manual/ visual	10

Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de *Ford Motor Company* (1988); Fogliatto e Duarte, (2011); Hu-Chen, Long e Nan (2013)

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foi implementado um novo fluxo que incluirá análises críticas para detectar possíveis desvios que pudessem resultar em falhas dos ativos. Esse novo fluxo não apenas aumentou a capacidade produtiva, mas também permitiu o uso mais eficiente dos resíduos e auxiliou a minimizar os impactos ambientais associados à manutenção.

## 2.5 Comentários finais do capítulo

Este capítulo da pesquisa apresentou uma revisão da literatura, começando com a temática da Ecologia Industrial e seus ecossistemas, abordando também a Simbiose Industrial, os conceitos de ecoparques e os arranjos necessários para a sua efetivação, e finalizando com a Economia Circular e suas definições de inovação estratégica sustentável.

No próximo trecho, foram abordados os tipos principais de manutenção, a corretiva, que consiste na lógica de "quebra e reparo", a preventiva, que se baseia em um cronograma, a preditiva, que envolve o mapeamento e monitoramento dos ativos, e a estratégica, que visa agregar valor à manutenção e torná-la uma área estratégica do negócio. Além disso, também foram apresentados os principais indicadores chave da área de manutenção e uma breve síntese sobre as falhas dos ativos.

Para expandir o conhecimento nesta área, será abordada a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), que inclui a introdução, implantação e critérios de criticidade dos ativos. Nesta etapa da pesquisa, discutimos tais referenciais e baseado na pesquisa, usarei a ferramenta de análise dos modos e efeitos de falhas e suas respectivas criticidades (FMECA), a fim de, providenciar a estabilidade dos ativos e a sustentabilidade. É importante lembrar que a RCM é composta por duas partes, uma qualitativa (já incluída na pesquisa) e outra quantitativa (modelagem dos tempos até a falha e reparo), que não será abordada neste escopo.

### 3 METODOLOGIA

Na primeira parte deste capítulo, serão apresentados os métodos de pesquisa que orientarão as ações do trabalho. Em seguida, serão descritas as etapas do método de trabalho, que incluem: apresentação da unidade em estudo, desenvolvimento da base teórica/prática, elaboração do protocolo da pesquisa, análise dos especialistas, formatação do teste piloto, coleta de dados, melhorias para a coleta de dados e, por fim, a análise dos dados obtidos.

#### 3.1 Método de pesquisa

O método de pesquisa utilizado foi o Estudo de Caso Único, tendo em vista que as expectativas são relevantes e decisivas para futuras decisões estratégicas (YIN, 2010). A pesquisa envolveu análises qualitativas relacionadas aos dados coletados por meio de entrevistas comparativas (feedback) antes e depois das ações no equipamento piloto, bem como análises quantitativas, utilizando o Teste t de Student, teste não-paramétrico U de Mann-Whitney, regressões lineares e a Análise de Variância (ANOVA). Os testes envolveram a produtividade, disponibilidade e precisão dos pedidos, comparando os resultados antes e depois da intervenção. A empresa estudada é especializada em reprocessamento de resíduos classe II gerados na produção de calçados e coleta seletiva.

Segundo Yin (2010), o método de pesquisa é o caminho a ser seguido pelos pesquisadores na busca pelo conhecimento, enquanto a pesquisa é todo trabalho destinado à busca da solução de problemas, através dos registros, análises e interpretações dos dados, categorizando-a como uma pesquisa explicativa e indutiva. Por ser um método investigativo exploratório e com ligações de variáveis-chaves, pode decorrer de se criarem novas teorias após as observações *in loco* (CAUCHICK, 2018).

A utilização deste método consiste em oferecer aos pesquisadores melhores condições de compreensão, interpretação e visão sistêmica do evento (THIOLLENT, 2002). A finalidade do estudo de caso é esclarecer decisões e seus motivos, assimilando a necessidade de responder à questão de pesquisa e solucionar um déficit no fluxo produtivo. Permite, assim, fornecer uma explanação dos fatos/variáveis, identificando as fontes para uma sólida ação, alcançando os resultados definidos anteriormente (YIN, 2010).

Para desenvolver um estudo de caso exemplar, é necessário empregar os procedimentos metodológicos (protocolo do estudo, construção de uma cadeia de evidência e estabelecimento de base de dados), além de documentar todas as variações existentes no processo, pois somente assim os resultados serão confiáveis e relevantes (YIN, 2010).

Na coleta de dados, é prudente analisá-los com o protocolo anteriormente desenvolvido no estudo de caso, para aplicação na implantação do trabalho piloto, sendo este necessário para conforme a condução definida para a realização deste trabalho (YIN, 2010). Por meio do teste piloto e com direcionamentos que possam resultar em novos *insights*, amplia-se, assim, a qualidade da coleta de dados e seus respectivos constructos (CAUCHICK, 2018)

Conforme Yin (2010), o estudo de caso piloto é uma forma de alinhamento, com a finalidade de elucidar dúvidas e não comprometer o projeto como um todo. Neste projeto, o teste piloto foi realizado em uma das máquinas gargalo, pois as possíveis variações que possam ocorrer neste evento chamarão a atenção de toda a equipe envolvida no processo.

Para garantir a alta qualidade e confiabilidade dos estudos de caso, existem diversas abordagens que podem ser adotadas. Neste projeto, foi utilizada a metodologia proposta por Yin (2010), que inclui a observação participante para registrar as incidências em tempo real e uma análise documental abrangente. Dessa forma, foi possível evidenciar as informações de forma precisa e confiável. Nesta pesquisa, foi adotada a gestão visual por meio de um quadro de controle de produção horário, detalhado na seção 3.2.6, para que, posteriormente, possam ser criados planos de ação estruturados a partir dos acontecimentos observados.

A fim de justificar a escolha pelo estudo de caso, algumas hipóteses podem ser apresentadas, tais como:

- A pesquisa visa compreender em profundidade as perdas na cadeia produtiva;
- O aumento da capacidade produtiva tem o potencial de reduzir os resíduos e o impacto ambiental;
- O tema abordado é contemporâneo e relevante para a indústria em questão.

Para a finalização das hipóteses, todas as etapas dos estudos foram realizadas com a participação do pesquisador. Além disso, ao longo do projeto, novas inclusões e mudanças foram realizadas no processo predefinido.

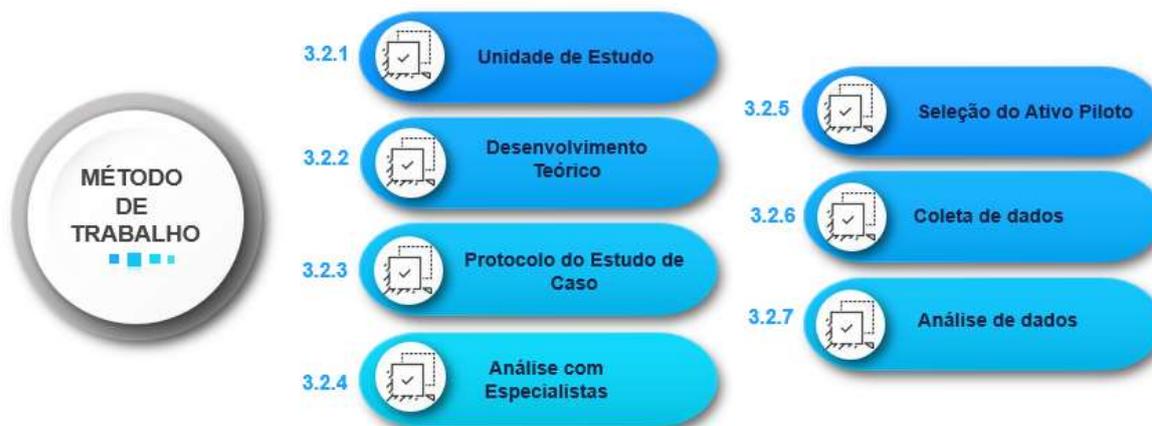
A seguir, destacam-se alguns pressupostos da pesquisa para melhor compreensão:

- A Simbiose Industrial possui vantagem competitiva (TREVISAN *et al.* 2016; KIRCHHERR *et al.*, 2017);
- O aumento da capacidade produtiva não se limita apenas a questões financeiras (CAMPBELL; JARDINE, 2001);
- A limitação da unidade fabril aumenta os possíveis impactos gerados pelas empresas inseridas na cadeia simbiótica calçadista (SINGH; KHAMBA; SINGH, 2020);
- A mudança na cultura interna da empresa requer cuidados significativos para a pesquisa (TREVISAN *et al.*, 2016; HEYES *et al.*, 2018).

### 3.2 Método de trabalho

O método de trabalho foi desenvolvido em 6 etapas, de acordo com o projeto em estudo. É possível analisar essas etapas na Figura 11, detalhada a seguir.

Figura 11- Etapas do método de trabalho



Fonte: elaborado pelo autor. Adaptado de Cauchick (2018).

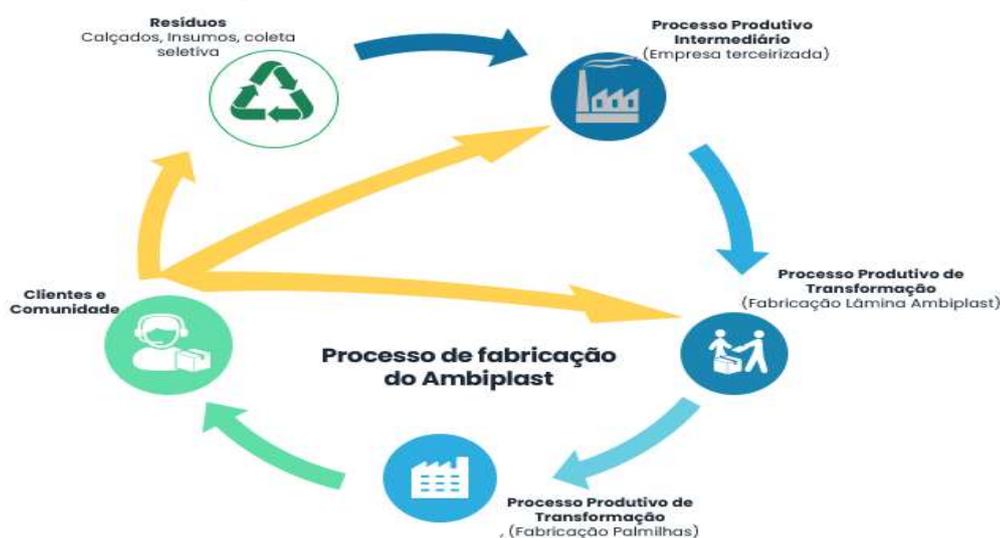
#### 3.2.1 Unidade de estudo

A empresa focal em estudo representa uma mudança de cultura no setor calçadista da região, por meio da ideia inovadora de tornar a cadeia industrial calçadista autossustentável. Ela utiliza resíduos classe II gerados no processo de

produção de calçados e também resíduos da coleta seletiva urbana, transformando-os em produtos idênticos aos originais, resultando no atendimento de um dos elos principais da cadeia simbiótica da região. Atualmente, opera com capacidade de consumo de resíduos reciclados de 320 ton/mês, gerando uma produção média de 264 Km<sup>2</sup>/mês de termoplásticos laminados, utilizados como palmilhas na base dos calçados, displays de ponto de venda e embalagens sustentáveis. A empresa fornece para todo o território brasileiro e exporta para países como Argentina, Peru, Equador, Paraguai e Colômbia.

O processo produtivo envolve a mistura de ingredientes, por meio da extrusão à quente dos mais variados materiais, resultando no composto chamado de blenda polimérica. Em seguida, o produto passa por uma transformação mecânica, por meio da extrusão à quente por meio de calandras hidráulicas, adquirindo a espessura final do material, surgindo, assim, o termoplástico que é a base do material reciclado que atende aos clientes da cadeia simbiótica, principalmente do segmento calçadista da região. Na Figura 12, é possível verificar o fluxo produtivo e de transformação do produto em estudo.

Figura 12- Ciclo produtivo do termoplástico



Fonte: elaborado pelo autor

### 3.2.2 Desenvolvimento Teórico

Segundo Cauchick (2018), o estudo de caso é um evento empírico que examina fatos reais e recentes com a finalidade de detalhar e elucidar lacunas de questões

indefinidas. Os objetivos finais do estudo de caso podem ser exploratórios, explanatórios e descritivos. Neste trabalho, a pesquisa exploratória foi utilizada devido à falta de uma fundamentação teórica bem estruturada ou por uma teoria em desenvolvimento ou até mesmo por pouca ligação com o tema do pesquisador (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

Nesta fase exploratória, o objetivo foi mapear as literaturas nacional e internacional relacionadas à manutenção, ecologia industrial, simbiose industrial, economia circular e manutenção de ativos. Para isso, foram selecionadas diversas bases de pesquisa, usando palavras-chave relevantes e refinando a busca para incluir os 20 artigos mais citados em cada palavra-chave entre 2015 e 2022, além de autores importantes em anos anteriores. As bases de dados utilizadas foram Scopus, Web of Science, Journals, Congressos, Normas e livros referenciais, durante o período de dezembro de 2021 a maio de 2022.

Em seguida, a pesquisa foi direcionada para as áreas relacionadas ao tema: Meio Ambiente, Engenharia, Negócios e Energia. Depois de analisar os resumos, foram selecionados 95 artigos para leitura em profundidade.

A revisão bibliográfica foi iniciada com uma análise das palavras-chave em português e inglês relacionadas ao tema, incluindo Ecologia Industrial, Economia Circular, manutenção enxuta, manutenção sustentável e suas variáveis. Durante a pesquisa nas bases de dados, alguns itens relevantes foram identificados:

- a) Em 2015, houve um crescimento significativo nas pesquisas sobre Economia Circular, chegando a um total de 6464 documentos publicados em 2022. Os países com maior destaque em publicações foram Itália, China e Reino Unido, enquanto o Brasil ficou em 9º lugar.
- b) Três autores já publicaram mais de 30 documentos sobre o tema, com as áreas de Meio Ambiente e Engenharia liderando o número de publicações.
- c) As palavras-chave "manutenção prescritiva" e "manutenção detectiva" não apresentaram resultados durante a pesquisa na base de dados Scopus.
- d) Na Web of Science e na Scopus, a busca pelas palavras-chave "Manutenção AND Simbiose Industrial" não encontrou artigos, mas, ao usar a busca booleana OR, foram encontrados apenas 9 artigos direcionados à área de Engenharia. Desses, apenas 2 resumos foram lidos e não resultaram em nenhum artigo para leitura em profundidade. Essa situação

sugere que há espaço para mais pesquisas sobre o tema na academia e na sociedade.

Ao finalizar a pesquisa nas bases de dados, foram identificados 95 artigos relacionados às palavras-chave selecionadas, como apresentado na Tabela 10:

Tabela 10 - Resultados de pesquisas nas bases

Base de dados	Palavra-chave	Artigos 2015/2022	Total de artigos	Leitura em profundidade
Scopus	Economia Circular	61	41	7
	<i>Circular Economy</i>	12982	9502	13
	Manutenção Sustentável	1	0	0
	<i>Sustainable maintenance</i>	230	94	6
	Manutenção Enxuta	1	1	1
	<i>Lean Maintenance</i>	80	34	7
	Manutenção preditiva	5	5	5
	<i>Predictive Maintenance</i>	6530	2687	12
	<i>Detective Maintenance</i>	54	7	3
	Ecodesign	4772	2025	4
	<i>Maintenance and Circular Economy</i>	186	16	2
<i>Manutenção AND e OR Simbiose Industrial</i>	486	9	0	
Web of Science	<i>Lean Maintenance</i>	803	74	12
	<i>Predictive Maintenance</i>	9621	496	9
	<i>Prescriptive Maintenance</i>	188	35	5
	<i>Detective Maintenance</i>	23	3	4
	Ecodesign	1160	78	5

Fonte: elaborada pelo autor.

Além disso, é importante ressaltar que foram encontrados 29 artigos duplicados na análise final. Para uma melhor visualização da operacionalização da fase exploratória da pesquisa, a Figura 13 ilustra a sua formatação.

Figura 13- Operacionalização da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### 3.2.3 Protocolo do estudo de caso

O protocolo do estudo de caso tem como objetivo esclarecer tanto o objetivo principal quanto os objetivos específicos mencionados no capítulo 1 desta pesquisa. Para isso, a pesquisa seguirá o roteiro descrito na Tabela 11.

Tabela 11- Protocolo da pesquisa.

(continua)

Componentes da pesquisa	Descrição
Questão de estudo	Como os avanços baseados na manutenção estratégica dos ativos influenciam na capacidade produtividade de uma empresa que emprega técnicas de simbiose industrial?
Objetivo principal	Analisar a influência da manutenção estratégica dos ativos na capacidade produtiva em uma empresa simbiótica que realiza reprocessamento de resíduos classe II.
Período de realização	O projeto de pesquisa começou a ser delineado em 2021 e foi finalizado em 2022.
Unidade de análise	Foi analisada uma empresa de reprocessamento de resíduos classe II, componente do elo simbiótico do setor calçadista localizada no Vale do Paranhana – RS.
Entrevistas e outras fontes de dados	Composto de múltiplas fontes de evidências: Entrevistas com clientes internos (coordenadores), também foi realizada análise documental e observação direta nos equipamentos em estudo.
Validade interna	Realizar a comparação entre a literatura estudada com os padrões realizados na organização que é o objeto de pesquisa.

Tabela 11 - Protocolo da pesquisa.

(conclusão)

Componentes da pesquisa	Descrição
Validade externa	Neste desenho de pesquisa, não é possível representar validade externa, somente levantar hipóteses para futuras pesquisas.
Questões elementares do estudo de caso	Como iniciar o processo de controle de paradas dos ativos?
	De que forma definir onde será aplicada os controles e monitoramentos?
	Quais os participantes no processo de implantação dos novos métodos de trabalho? Qual o resultado perante o meio ambiente após a pesquisa finalizada?

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

É essencial acompanhar as etapas a partir do protocolo descrito, pois a pesquisa envolve múltiplas fontes de coleta de dados, que são fundamentais para a validade da pesquisa. As fontes podem ser estruturadas, semiestruturadas ou não estruturadas, com possíveis triangulações para obter dados mais precisos. Neste caso, foi realizada uma pesquisa semiestruturada, que foi balizada pelo protocolo que contém todas as informações relevantes, como o contexto, a investigação e as variáveis de controle. O estabelecimento de controles e suas variáveis para a coleta de dados também foi destacado (YIN, 2010).

De acordo com Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002), o protocolo é o documento prioritário, pois é responsável por desenvolver a pesquisa, devido a sua amplitude e profundidade. No centro do protocolo, está a formulação da entrevista semiestruturada com especialistas, conforme mostrado no Anexo B, com perguntas abertas no início e mais específicas ao final da entrevista (CAUCHIK, 2018).

#### 3.2.4 Análise de especialistas

Yin (2010) destaca que as entrevistas com especialistas são importantes para a elaboração da análise dos constructos, uma vez que permitem compreender o contexto do evento e aprofundar a pesquisa. As entrevistas semiestruturadas com especialistas foram realizadas em diferentes momentos, durante reuniões em que foram discutidas a disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Cauchik (2018) alerta para a possibilidade de divergências de ponto de vista entre os especialistas, e recomendam excluir dados que não sejam relevantes para a pesquisa. Foram

entrevistados especialistas com profundo conhecimento dos processos e perdas, das áreas estratégicas e tático-operacional, com cargos de liderança (coordenadores) das diferentes áreas relacionadas às operações produtivas. Importante salientar também a aceitação foi positiva de todos os especialistas nesta mudança cultural em direção a excelência produtiva.

O papel principal dos especialistas na pesquisa foi avaliar a história da manutenção dos ativos, desde o momento anterior ao desenvolvimento do projeto piloto, e devido à falta de histórico sobre as perdas que a manutenção acarretava o processo fabril. As opiniões dos especialistas foram uma das formas de validar os resultados, tanto positivos quanto negativos.

### 3.2.5 Seleção do ativo prioritário

Seguindo o processo descrito por Yin (2010), o teste piloto é uma etapa crucial da pesquisa, que deve ser realizado com correções no protocolo, a partir das melhorias e dificuldades encontradas. Em seguida, é necessário selecionar colaboradores com poder de decisão e conhecimento técnico para lidar com possíveis impasses na implementação prática da pesquisa.

Cauchick (2018) ressalta que a condução dos testes pilotos nem sempre é unanimidade nos estudos de caso, apesar de ser uma etapa fundamental. É preciso considerar a viabilidade em termos de tempo e custo, a fim de melhorar o estudo para sua execução em grande escala. Nesta pesquisa, seguir-se-á esses conceitos, para garantir a veracidade dos resultados.

Posteriormente, foi necessário um acompanhamento mais aprofundado do equipamento, e para isso foi implantado um quadro de controle de produção de gestão à vista. Este quadro será detalhado no item 3.2.6.

### 3.2.6 Coleta de dados e melhorias

A coleta de dados para a pesquisa começou em março/22 e envolveu o acompanhamento diário da disponibilidade dos ativos da empresa. Em maio/22, o processo de coleta de dados foi implementado no ativo piloto, com o objetivo de diagnosticar variações nos problemas de manutenção durante um período de 4 meses. Antes de iniciar a coleta de dados, foi necessário implantar meios para um

acompanhamento preciso e coerente. Assim, foi instalado um controle de gestão a vista no equipamento piloto, que permitiu o monitoramento produtivo através de um quadro hora a hora, como demonstrado na Figura 14.

Figura 14 - Quadro de acompanhamento de produção

GESTÃO À VISTA - INDICADOR DE PRODUÇÃO									
		setup	esp.	PREVISTO	REALIZADO	2ª LINHA	REJEITO	MOTIVO	ACÇÃO
Turno 1	07:00								
	08:00								
	09:00								
	10:00								
	11:00								
	12:00								
	15:00								
	16:00								
	Total turno								
Turno 2	13:00								
	14:00								
	17:00								
	18:00								
	19:00								
	20:00								
	21:00								
	22:00								
	Total turno								
Turno 3	23:00								
	00:00								
	01:00								
	02:00								
	03:00								
	04:00								
	05:00								
	06:00								
	Total turno								

Fonte: adaptado pelo autor de Suzaki (1993).

A Figura 15 apresenta os participantes do processo de melhoria do controle de produção, recebendo treinamento na nova metodologia de controle produtivo. Eles estão sendo orientados sobre a real finalidade desse controle, a fim de garantir a eficácia das ações. Independentemente de os dados serem positivos ou negativos, a Engenharia e Produção foram responsáveis por controlá-los.

Figura 15 – Treinamento in loco



Fonte: acervo do autor (2022).

Durante a coleta de dados em campo, as lideranças que participaram do Genba Walk analisam os resultados alcançados e os possíveis desvios das metas de produção. Caso ocorresse algum problema descrito no quadro hora a hora, as ações seriam direcionadas com agilidade e acompanhamento de todos os envolvidos.

Perdoná *et al.* (2016) enfatizam a importância do acompanhamento e do conhecimento da situação do equipamento. Na fase seguinte do projeto, foram realizados acompanhamentos diários dos dados lançados via sistema interno da empresa em estudo para definir a melhor forma de atuação, sempre garantindo que a intervenção no fluxo produtivo não seja influenciada.

### 3.2.7 Análise de dados

Durante a etapa de análise de dados, é importante realizar a condensação das informações, como descrito por Bardin (2011). Para isso, é recomendado seguir a abordagem proposta por Cauchick (2018), que prioriza a verificação das respostas que realmente agregam valor ao relatório da pesquisa.

Yin (2010) sugere que, na etapa inicial da análise de dados, é necessário detalhar os eventos em formato de matriz, criando uma codificação para exibir informações importantes e reduzir o peso da pesquisa. Neste estudo, foram coletados

dados diariamente, por turnos e com informações a cada hora, sobre a disponibilidade dos ativos, problemas de qualidade e paradas diversas.

Após a coleta de dados, a área de Engenharia centralizou os direcionamentos das informações. Com os dados em mãos, foram realizados testes estatísticos como o Teste T de Student, ANOVA, o teste U de Mann-Whitney e regressão linear para avaliar as relações entre as variáveis.

As definições da utilização da Análise de Variância (ANOVA) é devido ser uma técnica estatística amplamente utilizada na área de engenharia de produção para investigar e comparar as médias de diferentes grupos ou tratamentos. Ela permite identificar se existem diferenças significativas entre esses grupos, bem como entender a contribuição das variáveis independentes em relação à variável dependente.

A ANOVA é baseada na decomposição da variação total em componentes relacionados à variação entre os grupos e à variação dentro dos grupos. Isso possibilita a avaliação da significância estatística das diferenças observadas, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisões na otimização de processos produtivos e no aprimoramento da qualidade dos produtos e serviços.

O teste U de Mann-Whitney é um procedimento estatístico não paramétrico usado para comparar duas amostras independentes com menos de 30 observações. Os dados são combinados e ordenados, e a estatística U é calculada para determinar se as amostras diferem estatisticamente. Esse teste é útil quando a distribuição dos dados é desconhecida ou não é normal. Ele fornece uma análise robusta e confiável, mesmo com um número limitado de observações. Além disso, foi calculado o tamanho de efeito (Effect Size) que, no teste U de Mann-Whitney, fornece uma medida padronizada da diferença entre grupos, ajudando a interpretar a magnitude da relação entre as variáveis comparadas. Geralmente, um tamanho de efeito abaixo de 0,3 é considerado pequeno, entre 0,3 e 0,5 é considerado moderado e acima de 0,5 é considerado grande.

Na sequência apresenta-se o Quadro 2, demonstrando as variáveis envolvidas na análise de dados, que nos itens 5.1.1 e 5.1.2 foram utilizadas.

Quadro 2 – Variáveis e suas ferramentas estatísticas

	Variável	Teste Estatístico
Variáveis	Produtividade (kg/h)	Teste T, ANOVA, Teste U, Regressão Linear
	Produção (kg)	Regressão Linear

	Produção (m <sup>2</sup> )	Teste T, ANOVA, Teste U
	Disponibilidade (%)	Teste T, ANOVA, Teste U
	Acuracidade (%)	Descritivo

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 4 A PESQUISA

Nesta etapa do trabalho, o foco estará no primeiro objetivo específico da pesquisa, que se relaciona diretamente com o estudo aprofundado da revisão da literatura apresentado no Capítulo 2. Em seguida, será apresentada a definição dos equipamentos críticos por meio da ferramenta de análise de criticidade, seguida da aplicação da matriz de criticidade. O objetivo é direcionar as formas de atuação da área de manutenção, com destaque para as manutenções baseadas em inspeções preditivas.

Para isso, é realizada a aplicação da ferramenta FMECA, considerando tanto os aspectos positivos quanto os negativos de sua aplicação. Também são descritas as análises preditivas e as formas de inspeção utilizadas, assim como os resultados da implantação da ferramenta.

### 4.1 Definição dos equipamentos críticos

Conforme as recomendações de Baran e Trojan (2016), a definição dos equipamentos críticos no processo fabril teve início com a consideração dos critérios de segurança, meio ambiente, econômicos, produtividade e manutenibilidade, conforme a Tabela 12. Após disseminar esses critérios entre o time multidisciplinar, foi utilizada a ferramenta de análise de criticidade dos ativos, representada na Figura 16, para classificar, priorizar e definir direcionamentos visando aumentar a confiabilidade dos ativos e, por consequência, aumentar a capacidade produtiva.

Tabela 12 – Influenciadores da criticidade

(continua)

IMPACTO	Este critério está relacionado diretamente ao atendimento aos pedidos do cliente, podendo afetar a qualidade, capacidade produtiva e a eficiência do processo, o que consequentemente pode afetar o faturamento da empresa.
MTTR	Representa a disponibilidade do ativo, o valor simboliza o tempo médio que o time da manutenção utiliza para o reparo do ativo após uma falha.
SEGURANÇA	Bem maior de cada empresa, é uma análise direcionada ao bem estar, segurança dos colaboradores e sociedade.
CUSTOS DE MANUTENÇÃO	Na manutenção estratégica existe a agregação de valor através da harmonia financeira das corporações. Englobam-se os custos diretos (reparos, peças de reposição e mão de obra,), indiretos (preventivas e preditivas) e induzidos (desgastes, falhas ou vida útil dos componentes vencida).

Tabela 12 – Influenciadores da criticidade

(conclusão)

MEIO AMBIENTE	Item importante principalmente para a empresa em estudo, não se pode negligenciar este item na criticidade, neste caso, os desvios estão relacionados diretamente com a imagem, infrações de leis e a visão estratégica da empresa.
TEMPO MÉDIO PREVENTIVA	Tempo necessário para realizar o trabalho preventivo, existe influência direta na produção. Pode afetar os resultados.

Fonte: adaptado pelo autor de Baran e Trojan (2016) e Mohanty, Dash e Pradhan (2020);

Figura 16 - Classificação dos equipamentos críticos

DENOMINACAO EQUIPAMENTO	Impacto				MTTR				Segurança				Custo de manutenção por mês				Meio ambiente			Tempo medio preventiva				Nota	
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	0	1	2		3
Lavador de gases																									13
Torre de Resfriamento																									12
Empilhadeira																									4
Rebobinadores																									1
Extrusora M1/4																									13
Extrusora M2/3																									14
Extrusora M5																									13
Misturador 1																									9
Misturador 2																									9
Balança B1																									1
Balança B2																									1
Funil Central 1																									1
Funil Central 2																									1
Funil M5 - 1																									1
Funil M1/4 -1																									1
Funil M1/4 -2																									3
Funil M2/3 - 1																									3
Funil M2/3 - 2																									3
Guilhotina 1																									8
Guilhotina 2																									8
Guilhotina 3																									7

Fonte: adaptado pelo autor de Baran e Trojan (2016) e Mohanty, Dash e Pradhan (2020).

É importante destacar que o impacto de um equipamento, seu tempo médio de reparo (MTTR), a segurança, o custo de manutenção e o tempo preventivo podem ser classificados por uma cor específica, de acordo com o seu valor no critério, como

mostra a Tabela 13. Essa definição segue o que é proposto por Baran e Trojan (2016) e Mohanty, Dash e Pradhan (2020).

CORES	ESCORE
Verde	0
Amarelo	1
Laranja	2
Vermelho	3

Fonte: adaptado pelo autor de Baran e Trojan (2016) e Mohanty, Dash e Pradhan. (2020).

Após a aplicação da ferramenta de criticidade, o foco do trabalho direcionou-se para os ativos mais críticos da empresa. Isso se deve ao fato de que, se houver uma parada inesperada desses ativos, toda a produção será afetada, causando um colapso no planejamento e prejudicando a capacidade de atender às necessidades da Simbiose Industrial. Como solução, surgiu a ideia de implantar a redundância mecânica em máquinas mais críticas.

A redundância mecânica consiste em sistemas duplicados, como bombas, painéis, motores, acoplamentos e adaptações, que representam uma excelente saída financeira para eliminar as paradas inesperadas de uma empresa (SELLITTO, 2022). Um resultado importante da implantação da redundância é a possibilidade de realizar manutenções corretivas, preventivas e preditivas nos ativos, sem a necessidade de interromper o fluxo produtivo. A Figura 17 ilustra esse conceito.

Figura 17- Exemplo de sistema redundante



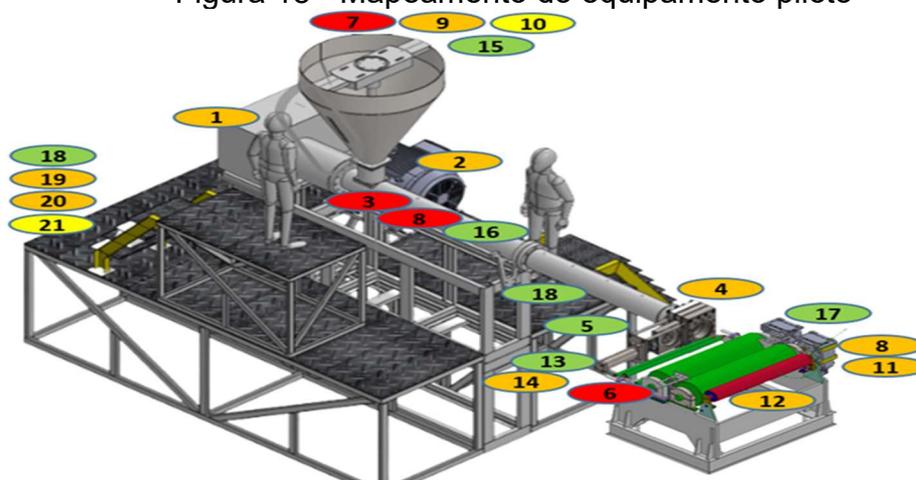
Fonte: acervo do autor.

Após a conclusão da análise dos equipamentos críticos e da implementação das redundâncias necessárias, uma nova classificação de criticidade foi realizada, desta vez concentrando-se nos componentes da Extrusora TAG M 2/3, que foi escolhida como equipamento piloto para este trabalho, devido ao equipamento ser o ativo de maior capacidade produtiva, fato este que proporcionou maior atenção para todos os envolvidos, bem como, um retorno rápido quanto a aplicação da ferramenta, possibilitando na sequência, implantar nos demais ativos da Unidade Fabril.

#### 4.2 Direcionamentos da matriz de priorização

Através da matriz de priorização, foi possível mapear o equipamento piloto, que neste trabalho foi a Extrusora TAG M 2/3, como mostrado na Figura 18. Além de apresentar o desenho do equipamento, a matriz permite destacar seus componentes de acordo com as cores vermelha, laranja, amarela e verde. Os componentes destacados na cor vermelha possuem altíssima criticidade e são direcionados para a manutenção centrada na confiabilidade. Os componentes destacados na cor laranja possuem alta criticidade e são submetidos a controles preditivos, com a execução das manutenções sendo realizadas conforme a coleta de dados nas inspeções preditivas. Já os componentes destacados na cor amarela possuem criticidade média e são direcionados para ações de manutenção preventiva com intervalos de tempos predeterminados. Os componentes destacados na cor verde possuem baixa criticidade e não se aplicam as estratégias de manutenção a estes componentes, sendo que a ação ocorre apenas após a falha do componente.

Figura 18 - Mapeamento do equipamento piloto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a aplicação da ferramenta de classificação dos ativos e a análise dos resultados, foi possível definir a melhor forma de atuação da manutenção para cada componente do ativo piloto. Essa definição inclui a estratégia de manutenção a ser seguida (preditiva, preventiva ou corretiva) e as inspeções e intervenções necessárias para cada componente. Na Figura 19, é possível observar a aplicação dessa definição completa.

Figura 19 - Classificação dos componentes

ITEM	DENOMINACAO EQUIPAMENTO	Impacto				MTTR				Segurança				Custo de manutenção mês				Meio ambiente			Tempo medio preventiva				
		0	1	2	3	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	0	1	2	3
1	Redutor Principal																								7
2	Motor Principal																								6
3	Conjunto de Plastificacao																								9
4	Troca Tels																								7
5	Bicos																								3
6	Calandras																								11
7	Puxador																								9
8	Bobinador																								9
9	Motoredutor Forçador																								6
10	Helicoide do Forçador																								5
11	Motoredutor Calandras																								7
12	Unidade Hidraulica																								7
13	Pistao Hidraulico do Troca Tels																								2
14	Pistao Hidraulico da Espessura da Calandra																								7
15	Pistao Pneumatico Puxador																								2
16	Resistencias Conjunto																								3
17	Resistencias Bicos																								3
18	Ventilador Siroco																								3
19	Inversor Frequncia Rosca																								8
20	Inversor Frequncia Calandras																								6
21	Inversor Frequncia Forçador																								4

Fonte: adaptado pelo autor de Baran e Trojan (2016); Mohanty, Dash e Pradhan (2020).

Continuando a pesquisa, seguindo as definições estabelecidas na NBR 5462 de 1994 - Confiabilidade e Manutenibilidade (ABNT, 1994), foram definidas as ações, estratégias e métodos de atuação da manutenção com base na classificação de criticidade dos componentes como A, B, C e D, em ordem decrescente de criticidade, de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 - Estratégias de manutenção

Classe	Valor	Estratégia de manutenção	Método de atuação
A (altíssima criticidade)	$\geq 9$	Manutenção centrada na confiabilidade	Priorização, procedimentos, estratégico.
B (alta criticidade)	$\leq 8 \geq 6$	Manutenção Preditiva	Manutenção sob condições (coleta de dados por instrumentos)
C (média criticidade)	$\leq 5 \geq 4$	Manutenção Preventiva	Intervalos predeterminados (inspeções, lubrificações e substituições)
D (baixa criticidade)	$\leq 3$	Manutenção Corretiva	Após a falha e ou quebra acontece.

Fonte: adaptado de Sellitto (2020,2022).

Foi realizada uma análise aprofundada da implantação do FMECA para os componentes e conjuntos mais importantes para o processo produtivo da empresa em estudo, devido à sua grande relevância para a empresa e para a pesquisa.

#### 4.2.1 Aplicação da ferramenta - FMECA

Leal, Pinho e Almeida (2006) destacam a FMECA como uma das metodologias mais versáteis para prevenir falhas e riscos, além de estabilizar a confiabilidade dos ativos. Corroborando com esta afirmação Herpich e Fogliato (2013), salientam o FMECA utilizado nos sistemas de controle dos turbogeradores de uma empresa petroquímica com resultados expressivos, já Mohanty; Dash; Pradhan (2020) destacam a mesma metodologia utilizada nos equipamentos críticos de uma Usina térmica. Visto o eminente resultado positivo da pesquisa, iniciou-se a formação de uma equipe multidisciplinar, com o objetivo de incluir diferentes perspectivas em relação às melhores práticas possíveis. Em seguida, foi realizada a aplicação da ferramenta FMECA, visando aprimorar os conhecimentos e suprir as carências da

empresa em estudo. É importante ressaltar que cada modificação realizada tem uma resposta, que pode ser positiva ou negativa, conforme demonstrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparativos da aplicabilidade do FMECA

<b>POSSIBILIDADES</b>	
<b>Positivas</b>	<b>Negativas</b>
Resultados financeiros	Pode ocorrer custos desnecessários
Aumenta a satisfação dos clientes	
Estabilidade produtiva	
Eliminação de retrabalhos	Desalinhamento profissional
Nivelamentos dos conhecimentos	Insatisfação profissional
Ações com foco preventivo	Necessita investimento em tecnologias
Identifica e elimina rapidamente o modo potencial de falha	Não aplicável
Aglutinador dos times de trabalho através das trocas de ideias entre diferentes funções	Não aplicável

Fonte: adaptado pelo autor de Fogliatto e Duarte (2011).

Dentre os diversos equipamentos-chave da empresa, foi escolhido um responsável pela extrusão do produto. Após a aplicação da ferramenta FMECA para a empresa em estudo, foram definidos escores de valores para cada estratégia de manutenção, a partir da multiplicação dos parâmetros de risco e criticidade, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Estratégia de manutenção

Escore	Estratégia de manutenção
$400 \leq 500$	Preditiva
$300 \leq 399$	Preventiva (inspeções)
$200 \leq 299$	Corretiva planejada
$100 \leq 199$	Corretiva não planejada

Fonte: adaptado pelo autor de Herpich e Fogliatto (2013).

Conforme pode ser observado no Anexo A, surgiram algumas necessidades de mudanças nas atuações da equipe de manutenção diante da nova concepção, o que demonstra a influência desse setor na capacidade produtiva e no resultado estratégico da empresa. Com base nos resultados obtidos, pela aplicação da FMECA e pela profundidade que a ferramenta proporciona, a partir do estudo relacionado as falhas

(modo, efeito, causa e detecção), bem como, as ações a serem realizadas conforme a pontuação da criticidade da cada falha, foram direcionadas algumas ações para melhorar a confiabilidade dos ativos. Na sequência do trabalho, foram destacadas essas melhorias com ênfase.

#### 4.2.2 Análises preditivas

Após a aplicação da ferramenta FMECA, foram definidos quais componentes medir e como medir, o que possibilitou o início do processo de análise preditiva dos componentes do ativo piloto. Especial atenção foi dada aos componentes com alta e altíssima criticidade. As análises preditivas foram realizadas por meio de termografia, vibração e ferrografia. Na Tabela 17, é possível verificar essas análises e a finalidade prática de cada teste no contexto preditivo.

Tabela 17 - Análises Preditivas

Análises	Finalidades
Termografia	Verificações realizadas em sistemas elétricos diversos, por meio de câmeras termográficas, com capacidade de verificar a temperatura dos componentes elétricos, via análise do espectro infravermelho.
Análise de Vibração	Realizada em mancais de rolamentos e rolamentos das mais diversas aplicações. Conforme ISO10816, quando excede 9,81 m/s <sup>2</sup> (aceleração da gravidade) é sinal que o componente está com falha de lubrificação, neste caso, existe a possibilidade deste componente estar desgastado.
Análise de óleo (ferrografia)	Trabalho realizado com extrema preocupação, pois este teste é realizado pela primeira vez nos componentes chamados de caixa de redução, componente responsável em transmitir o movimento de giro na helicoide do canhão.

Fonte: adaptado pelo autor do relatório de análise preditiva (BUENO, 2022)

Perdoná *et al.* (2016) descrevem as principais etapas das análises preditivas, que consistem em verificar as condições reais de funcionamento dos equipamentos, bem como os desgastes e degradações atuais. No entanto, devido ao alto custo dos equipamentos necessários para essa análise e ao desenvolvimento de mão de obra interna especializada, decidiu-se contratar uma empresa especializada em análises preditivas. Esse fato marcou o redesenho da manutenção dentro da organização.

Com base nessas análises, os componentes inspecionados são classificados como tendo um estado de conservação bom, aceitável, em atenção ou até mesmo em

situação crítica, o que direciona a manutenção de forma mais adequada. Na Tabela 18, é possível verificar o significado de cada uma dessas nomenclaturas.

Tabela 18 - Nomenclaturas de estado

Estado do equipamento	Caracterização
Bom	Equipamento em condições normais.
Aceitável	Equipamento em condições ainda aceitáveis.
Atenção	Equipamentos que não necessitam de correção urgente, mas o potencial de falha está detectado.
Crítico	Equipamento com possibilidade eminente de parada, necessita ação o mais prevê possível.

Fonte: adaptado pelo autor do relatório de análise preditiva (BUENO, 2022)

No contexto das análises preditivas, as normas são uma referência importante. Um exemplo disso pode ser visto no Quadro 3, onde é apresentado o sistema de análise de criticidade na análise de vibração, seguindo a norma DIN ISO 10816-3, que trata das medições de máquinas industriais com peças não rotativas.

Quadro 3- Exemplo decisório de criticidade

DIN ISO 10816-3	Group 1		Group 2	
Machine type	Large machines 300 kW < P < 50 MW		Medium sized machines 15 kW < P < 300 kW	
	Motor H > 315 mm		Motor 160 mm < H < 315 mm	
Foundation	flexible	rigid	flexible	rigid
Velocity $v_{\text{eff}}$ mm/s rms	11,0	D	D	D
	7,1	C	C	D
10–1000 Hz $r > 600$ rpm	4,5	B	B	C
2–1000 Hz $120 < r < 600$ rpm	3,5	B	B	C
	2,8	B	B	C
	2,3	B	B	C
	1,4	A	A	C
		A	A	C

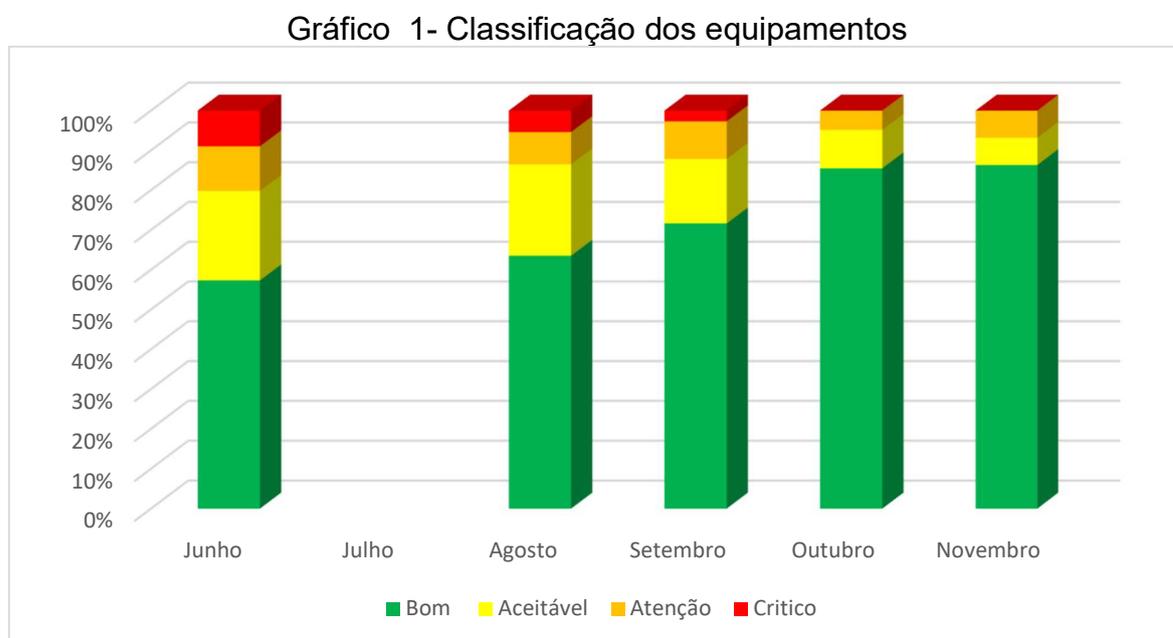
A Newly commissioned machines   
B Unrestricted long term operation   
C Restricted long term operation   
D Vibration causing damage

Fonte: ISO (1998)

Neste íterim, surgiu a necessidade de executar os trabalhos nos equipamentos conforme a prioridade dentro do parque fabril, bem como de acompanhar se as ações pós-análises eram eficazes.

### 4.2.3 Equipamentos implantados

No início da implantação do plano preditivo, foram selecionados 96 ativos da unidade por meio da análise de criticidade. Atualmente, as verificações preditivas envolvem 68 equipamentos, como pode ser visto no Gráfico 1, que demonstra uma melhoria considerável nos ativos após a implementação deste processo de análise e tomada de ações preditivas e preventivas. Vale destacar que não houve medição em julho devido à aplicação da ferramenta FMECA e, em seguida, iniciaram-se as ações nos equipamentos com base nos resultados das análises preditivas.



Fonte: adaptado pelo autor do relatório de análise preditiva (BUENO, 2022)

Os resultados das análises preditivas foram representados por cores que indicam o estado do equipamento, sendo:

- Cor verde: indica que o equipamento está em condições normais de uso;
- Cor amarela: indica níveis aceitáveis, mas requer cuidados com longos períodos de trabalho;
- Cor laranja: indica níveis especiais de atenção, não exigindo intervenção imediata, mas com falha já existe;
- Cor vermelha: indica nível de criticidade total, exigindo parada assim que possível, pois já apresenta um potencial de falha.

É importante destacar que a implantação das análises preditivas e ações tomadas após as inspeções trouxeram melhorias significativas no equipamento piloto, conforme demonstrado na Figura 20, influenciando na melhoria da disponibilidade do ativo e possivelmente em um aumento na capacidade produtiva, atendendo assim ao segundo objetivo específico do trabalho.

Figura 20 - Histórico do preditivo do equipamento piloto

<b>Acionamentos Extrusora M2/3</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Jun-22</b>	<b>Jul-22</b>	<b>Aug-22</b>	<b>Sep-22</b>	<b>Oct-22</b>	<b>Nov-22</b>
Principal M2	Motor	Red	Red	Red	Red	Verde	Verde
Principal M2	Redutor	Amarelo	Amarelo	Red	Red	Amarelo	Amarelo
Forçador M2	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Forçador M2	Redutor	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde
Alimentador M2	Motor	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
Alimentador M2	Redutor	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde
Principal M3	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Principal M3	Redutor	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde
Forçador M3	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Forçador M3	Redutor	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde
Alimentador M3	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Alimentador M3	Redutor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Calandra M2	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Calandra M2	Redutor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Calandra M3	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Calandra M3	Redutor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Puxador M2	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Puxador M3	Redutor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Unidade hidráulica M2	Motor	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde
Unidade hidráulica M3	Motor	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Fonte: adaptado pelo autor do relatório de análise preditiva (BUENO, 2022)

#### 4.3 Comentários finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os direcionamentos para definir os equipamentos críticos da Unidade Fabril, utilizando a matriz de priorização, uma ferramenta essencial para mapear quais conjuntos de um equipamento podem afetar sua disponibilidade e definir ações e prevenções para evitar falhas.

Após essa definição, foi realizado um desenho detalhado do equipamento, representando cada um de seus componentes com cores de acordo com sua criticidade. Isso facilitou a visualização para diversas áreas envolvidas no trabalho.

A ferramenta FMECA foi utilizada para prevenir falhas e riscos envolvidos no ativo, resultando em maior estabilidade nos equipamentos por meio de manutenção corretiva (planejada ou não planejada), manutenção preditiva, manutenção preventiva e inspeções. Importante enfatizar nesta implantação da ferramenta FMECA, foi o apoio apresentado pelos envolvidos desde a direção, coordenadores, líderes e operadores, mas principalmente pela equipe de manutenção que mesmo com a modificação da sistemática de trabalho e atuação, engajaram nesta nova metodologia de forma positiva e sem resistência alguma a mudança.

Um dos diferenciais deste trabalho foi a implantação de análises preditivas nos equipamentos críticos da Unidade. Isso resultou em melhorias expressivas, principalmente no equipamento utilizado como teste (piloto), como demonstrado na Figura 20. Os acionamentos principais que estavam em estado crítico em diversos meses melhoraram após a continuidade do trabalho, resultando no equipamento em boas condições.

Na continuidade da pesquisa, serão apresentados os resultados do ativo piloto, da produção total e o resultado para o meio ambiente, que é um dos maiores beneficiados deste trabalho.

## 5 RESULTADOS

Nesta etapa do trabalho, está centrado em atender o terceiro objetivo específico da pesquisa, que é realizar a análise dos resultados. Na sequência, será apresentado como foi desenvolvido a devida análise dos dados, seguido dos cálculos estatísticos da produção do ativo piloto e da produção geral, o resultado ambiental, também os resultados dos clientes internos (especialistas) em relação a atuação da área da manutenção.

Para estas análises, foram utilizadas as ferramentas estatísticas como: Análise de Variância (Anova), teste T de student, o teste não-paramétrico U de Mann-Whitney e a regressão linear.

### 5.1 Desenvolvimento

Nesta pesquisa, o estudo de caso é do tipo controlável, o que permite repetir o ensaio em diferentes momentos. Por exemplo, as unidades de medida de produtividade variam diariamente devido às variáveis de processo e produto fabricado. Esses dados mensais foram analisados, e os principais problemas do mês anterior foram utilizados para direcionar as ações através de planos de ação. A eficácia dessas ações foi verificada após três meses da sua implantação. Caso o mesmo problema não ocorra nesse período, foi concluído que a ação definida no plano de ação foi eficaz.

Durante a coleta de dados, verificou-se a necessidade de aplicar metodologias estatísticas para responder de forma coerente e assertiva à questão de pesquisa e seus objetivos. Para isso, foram utilizadas a Análise de Variância (ANOVA) e a comparação entre duas médias. Esses instrumentos são de fácil compreensão e confiáveis, pois analisam a variância, ou seja, quanto a variável independente influencia a variável dependente e como o resultado determina a importância de um fenômeno.

Sellitto (1999) descreve a ANOVA como uma ferramenta que simula cenários e identifica as divergências quando um dos elementos sofre uma modificação, por meio da significância pelas diferenças naturais e ou entre grupos envolvidos, por meio probabilístico, bem como, se a variação do fator interfere ou não no resultado, avaliando a significância dos diferentes motivos e correlações.

Com base nesses métodos, foi incorporado o item da produção do ativo piloto, antes e após a aplicação do FMECA.

Optou-se pela utilização da ferramenta FMECA, pois com o desenvolvimento da pesquisa e conforme: Herpich e Fogliato (2013), Mohanty, Dash e Pradhan (2020), a FMECA fornece mecanismos para direcionar de forma assertiva as ações e estratégias de manutenção, com ponderações conforme métricas, criando assim, um ciclo efetivo e contínuo de melhorias, motivando a sua utilização de modo efetivo.

Foi necessária uma análise estatística (teste T de Student, teste não-paramétrico U de Mann-Whitney e análise de variância) dos resultados de algumas implantações, demonstrando o atendimento dos 2º e 3º objetivos específicos. O corpo diretivo solicitou a implantação nos demais ativos, e os resultados dessas implantações foram analisados na continuidade da pesquisa.

Os resultados demonstraram uma redução significativa do impacto ambiental, convertidos em reduções na emissão de gases, consumo de água e petróleo, aumentando assim a Simbiose Industrial. Concluída essa etapa, a pesquisa foi realizada para fornecer *feedback* sobre os resultados da manutenção na visão dos especialistas.

Com esses resultados, foi possível verificar o atendimento dos objetivos específicos de mensurar a variação do indicador de capacidade produtiva após a implantação da metodologia e analisar os resultados dessa implementação.

#### 5.1.1 Produção ativo piloto

Os resultados obtidos através da aplicação da ferramenta FMECA no ativo piloto foram analisados estatisticamente por meio do teste T de Student e análise de variância. Para isso, foram utilizados os dados coletados diariamente durante os meses de maio a junho, antes da implantação das melhorias, e de julho a outubro, após as ações realizadas. O resultado da análise pode ser observado na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação de médias diárias por fase

(continua)

	<b>Antes (mai a jun)</b>		<b>Após (jul a out)</b>		p
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
Produtividade – kg/h	37 amostras		110 Amostras		

Tabela 20 – Comparação de médias diárias por fase

(conclusão)

	<b>Antes (mai a jun)</b>		<b>Após (jul a out)</b>		
	37 amostras		110 Amostras		
Produtividade – kg/h	369,39	73,02	422,53	68,92	<0,001
Produção - kg	7.534,51	2.984,24	9.345,77	2.452	<0,001
Disponibilidade - %	89	16	100	13	<0,001

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

O valor- $p$  é uma probabilidade que indica se há diferença detectada entre os grupos estudados ter ocorrido ao acaso ou não, neste item pode-se definir que:

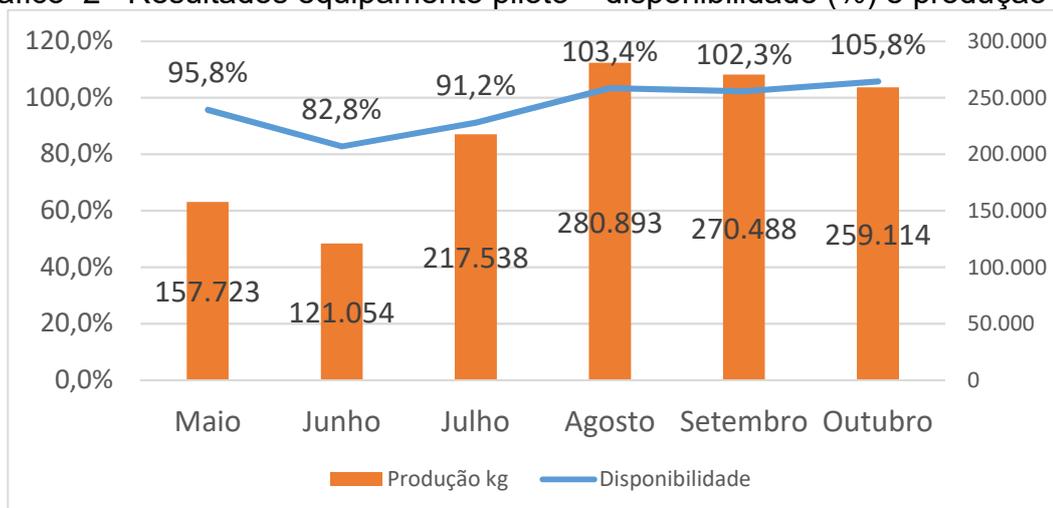
- Se valor- $p \leq 0,05$ , ou seja, a probabilidade menor ou igual a 5%, a diferença entre os grupos é considerada significativa;
- Se valor- $p > 0,05$ , ou seja, a probabilidade maior que 5%, a diferença entre os grupos não é considerada significativa.

Na Tabela 19, é possível observar uma diferença significativa nas variáveis de produtividade (kg/h), produção (kg) e disponibilidade dos equipamentos (%), que representam um aumento nas seguintes proporções:

- Produtividade = > 12,57%;
- Produção = 19,38%;
- Disponibilidade = 11%

O Gráfico 2 apresenta os resultados da produtividade (kg/h) e disponibilidade dos ativos (%) após a aplicação da ferramenta FMECA no equipamento piloto. É possível notar que a disponibilidade ultrapassou 100%, o que pode parecer incoerente à primeira vista. No entanto, a empresa utiliza tempos-padrão e esses tempos foram superdimensionados após as melhorias. Para manter o referencial criado até então, foi necessário admitir disponibilidades acima de 100%.

Gráfico 2– Resultados equipamento piloto – disponibilidade (%) e produção (kg)

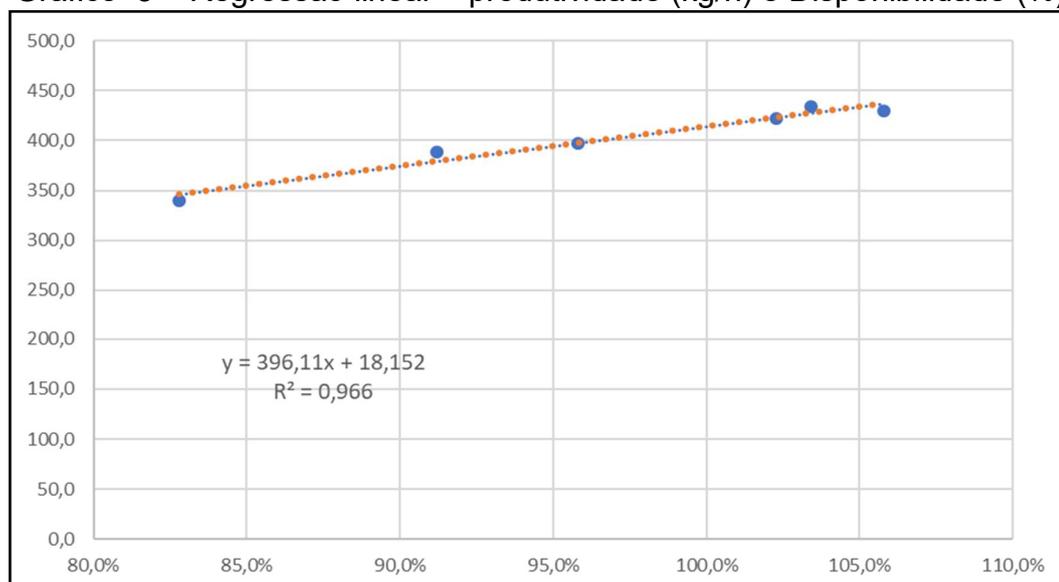


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Com base nos dados de disponibilidade de máquina, produtividade e produção, foi realizada uma análise de regressão linear. A disponibilidade dos ativos foi utilizada como variável independente, enquanto as outras duas variáveis foram consideradas dependentes. Os Gráficos 3 e 4 apresentam os resultados desta análise.

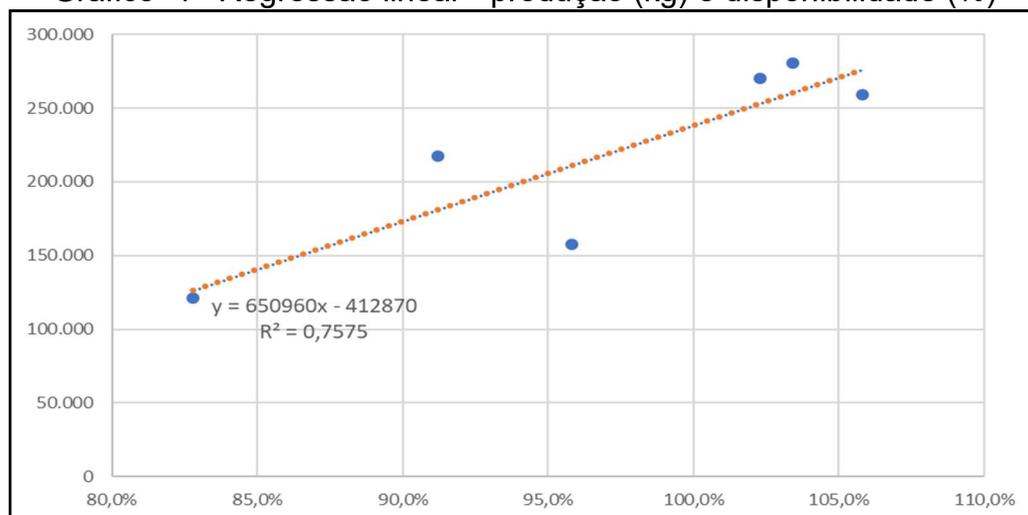
A regressão linear é uma técnica estatística que permite extrapolar os resultados obtidos e prever o comportamento futuro das variáveis dependentes em função da variável independente. Para isso, é utilizada uma equação de primeiro grau do tipo  $y=ax+b$ , em que  $y$  representa a variável dependente,  $x$  representa a variável independente,  $a$  é o fator e  $b$  é a constante (LISBÔA *et al.*, 2020).

Gráfico 3 – Regressão linear – produtividade (kg/h) e Disponibilidade (%)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Gráfico 4– Regressão linear - produção (kg) e disponibilidade (%)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### 5.1.2 Produção diária geral

Uma outra decisão gerencial importante foi a aplicação do FMECA nas demais máquinas da empresa, uma vez que estes equipamentos apresentavam sistemas de funcionamento e manutenção semelhantes. Essa decisão resultou em alguns resultados expressivos. Os dados coletados foram separados em dois grupos: antes da intervenção (março a junho) e após a intervenção (julho a outubro), sendo coletados diariamente. Os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 21, que mostra o desempenho da área fabril como um todo após a implantação da ferramenta.

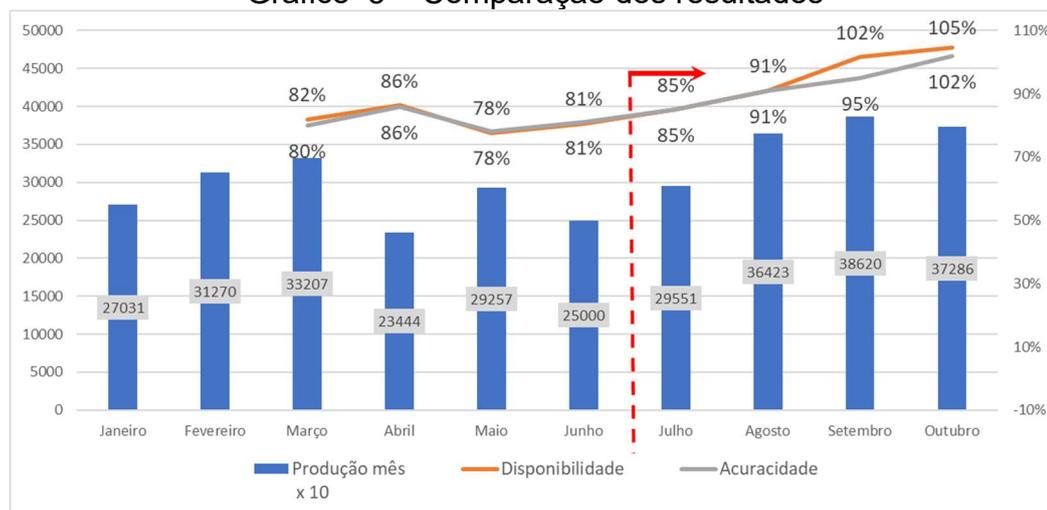
Tabela 21 - Comparação de média entre fases – Mensal.

	Antes (mar a jun) 4 amostras		Após (jul a out) 4 amostras	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Produção - m <sup>2</sup>	12.155	1.046	14.223	1.191
Disponibilidade - %	82	3	96	9
Acuracidade produção - %	81	3	93	7

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Para facilitar a compreensão dos resultados obtidos em relação à produção, disponibilidade e acuracidade mensal, o Gráfico 5 apresenta uma visualização gráfica dos dados da Tabela 20.

Gráfico 5 – Comparação dos resultados



Fonte: dados da empresa em estudo. Elaborado pelo autor (2022).

Esses resultados quantitativos validam as ações descritas anteriormente na pesquisa, que incluem:

- Um aumento na produção média de 12.155 m<sup>2</sup> para 14.222,75 m<sup>2</sup>, representando um aumento de 17,01% na produção.
- Um aumento na disponibilidade de 82% para 92,8%, o que representa um aumento de 10,8 pontos percentuais.
- Um aumento no atendimento dos prazos produtivos de 81% para 93%, o que representa um aumento de 12 pontos percentuais. É importante destacar que esse indicador está relacionado ao cumprimento dos prazos estabelecidos pelo setor de planejamento e controle de produção para a entrega dos pedidos.

Com o objetivo de complementar a análise e garantir que a diferença nas médias observadas não foi resultado do acaso, testes estatísticos tiveram que ser realizados. Devido ao restrito número de meses que foram avaliados, optou-se por utilizar dados dos levantamentos semanais, sendo disponíveis dados desde janeiro de 2022. Devido a distribuição não normal dos dados, optou-se por realizar o teste não-paramétrico U de Mann-Whitney, comparando a diferença das medianas entre as fases (pré-implantação até junho/22 e pós-implantação a partir de julho/22), como pode ser verificado na Tabela 21, onde H0 considera que não houve diferença na implantação do FMECA nas variáveis avaliadas, enquanto H1 afirma que houve diferença nas variáveis após a implantação do FMECA.

Tabela 22 - Comparação de medianas entre fases – Semanal

	Pré implantação n = 25		Pós Implantação n = 18		Mann-Whitney <sup>a</sup>		
	Mediana	IQR <sup>b</sup>	Mediana	IQR	U	r Effect Size <sup>c</sup>	p
Produção Diária – m <sup>2</sup>	10935,78	1956,73	14215,18	2790,36	38	0,70	<0,01
Produtividade e - kg/h	350,73	68,09	433,12	30,02	23	0,76	<0,01
Disponibilidade de dos Ativos - %	87,00	23,00	103,50	6,00	8,5	0,66	<0,01

<sup>a</sup> Teste U de Mann-Whitney; <sup>b</sup> IQR Intervalo Interquartil; <sup>c</sup> Tamanho de efeito: r > 0,5 Grande efeito.  
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela 21 revela que a hipótese H0 é rejeitada, pois a diferença entre o valor selecionado aleatoriamente das populações pré-implantação e pós-implantação é grande o suficiente para ser estatisticamente significativa, uma vez que o U-ratio é superior ao U-ratio esperado para uma análise entre dois grupos. Além disso, podemos ver o tamanho do efeito das variáveis sendo superior a 0,5, o que representa um forte efeito estatístico.

Cabe ressaltar que, quando avaliada as medianas, temos:

- Um aumento na mediana da produção de 10935,78 m<sup>2</sup> para 14.215,18 m<sup>2</sup>, representando um aumento de 23,07% na produção.
- Um aumento na mediana da produtividade de 350,73 kg/h para 433,12 kg/h, sendo um aumento de 19,02%.
- Um aumento na disponibilidade de 87% para 103,5%, o que representa um aumento de 16,5 pontos percentuais.

### 5.1.3 Redução do impacto ambiental

Destacado por Leitão (2015) o equilíbrio necessário da estratégia econômica em conjunto com estratégia ambiental, pode comprometer com a boa governança institucional, pois ambas estratégias são responsáveis pela harmonia das empresas. Devido estes impactos, no início da pesquisa, foi estabelecida uma meta de aumentar a produção em 10% a partir da produção média de 12.155 m<sup>2</sup> para cerca de 13.400 m<sup>2</sup>. No entanto, as ações implantadas superaram essa meta, alcançando um aumento de produção de 17,01%, ou seja, 14.222,75 m<sup>2</sup> de produção média dia. Esse resultado

positivo também contribuiu para uma redução significativa do impacto ambiental, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 23 - Redução do impacto ambiental possível

Impacto Ambiental	Redução/ano
Gás Efeito Estufa (GEE)	59,2 tons
Consumo de água	2942,7 m <sup>3</sup>
Consumo petróleo	392,9 m <sup>3</sup>

Fonte: elaborado pelo autor de *The Intergovernmental Panel On Climate Change* (2022)

Além disso, é importante destacar que o trabalho teve um impacto positivo na redução dos resíduos recicláveis que anteriormente eram destinados a aterros sanitários de classe II. Com o aumento da disponibilidade dos ativos em 10,8 pontos percentuais e o aumento da produtividade em 17,01%, a capacidade produtiva de termoplásticos foi melhorada em 2.067 m<sup>2</sup> por dia. Isso resultou em uma redução significativa dos impactos ambientais, conforme apresentado na Tabela 22. Este aumento na capacidade produtiva, também resultou no aumento do consumo de resíduos classe II, pode-se verificar estes valores descritos na Tabela 23.

Tabela 24 – Resultados ambientais

Resíduos	Segmento	Consumo/dia	Consumo /mês
Plásticos	Calçadista	1500 kg	33.000 kg
Plásticos	Coleta Seletiva	600 kg	13.200 kg
Óleo de cozinha	Coleta Seletiva	100 litros	2.200 litros

Fonte: elaborado pelo autor conforme dados da empresa.

## **5.2 Pesquisa com especialistas**

Nesta pesquisa foi utilizada a análise descritiva, devido a facilidade de interpretar as informações oriundas dos dados coletados, neste contexto, foram conduzidas duas pesquisas: uma em junho, referente de março a junho, antes da aplicação da ferramenta FMECA, e outra a partir de julho a outubro, ou seja, quatro meses após a sua implementação no ativo piloto. Nesta verificação, foram avaliadas as respostas dos clientes internos diretos da área de manutenção, ou seja, Engenharia e Produção. O objetivo foi avaliar a percepção desses clientes em relação

à manutenção em dois momentos distintos. Para isso, foi aplicado um questionário composto por 8 perguntas com escala Likert de 5 pontos, conforme apresentado no Anexo B. Os resultados dessa comparação de médias estão apresentados no Tabela 25, com as seguintes questões:

Tabela 25 - Análise do Questionário com Especialistas através do Teste t de Student

PERGUNTAS	Março a junho		Julho a outubro		P
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
1 - Qual seu nível de satisfação quanto a área de manutenção?	2,0	1,45	4,75	0,5	< 0,01
2 - Qual a influência da manutenção dos ativos no fluxo produtivo?	4,0	0,82	4,75	0,5	> 0,05
3 - Na sua visão, qual o índice de confiabilidade dos ativos na unidade fabril?	2,0	0,82	4,75	0,5	< 0,01
4 - Na sua opinião como está o desempenho da área manutenção?	2,0	0,82	4,0	0	< 0,01
5 - Qual a sua percepção quanto a assertividade dos trabalhos realizados pela manutenção?	2,75	1,5	4,5	0,58	> 0,05
6 - Para realização das manutenções, investimento, tempo de reparo e assertividade atendem a necessidade da empresa?	1,75	0,5	4,0	0,0	< 0,01
7 - Existe momentos que a disponibilidade dos ativos afeta o cliente final?	2,5	1,75	3,25	1,5	> 0,05
8 - A manutenção corretiva afeta a capacidade produtiva?	2,25	1,89	3,0	1,41	> 0,05

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Os resultados da pesquisa revelaram o seguinte sobre a área de manutenção de ativos, de acordo com os entrevistados:

- Com relação à pergunta 1, sobre o nível de satisfação com a equipe de manutenção, houve uma melhora significativa na satisfação média dos entrevistados em relação à área de manutenção. A satisfação passou de

regular para próximo de muito satisfeito, atingindo uma taxa de satisfação de 95%.

- A pergunta 2, sobre a influência da manutenção no fluxo produtivo, não apresentou diferença significativa. Isso se deve ao fato de que o grupo já considerava a manutenção como tendo uma grande influência na produtividade fabril, mesmo antes da implementação do FMECA.
- Com relação à pergunta 3, sobre a confiabilidade dos ativos antes e depois da implementação da ferramenta FMECA, verificou-se um aumento significativo na percepção da confiabilidade dos ativos. Houve uma melhoria final próxima de 95%.
- A pergunta 4 evidencia que, antes do trabalho, o desempenho da manutenção era considerado baixo, tendo havido uma melhora significativa na avaliação após junho. Agora, o desempenho é considerado alto.
- A pergunta 5 quanto à assertividade dos trabalhos de manutenção, denota que houve uma tendência de melhora na percepção, apesar de não ser estatisticamente significativa.
- A pergunta 6 abordou a percepção de investimento e tempo de reparo das manutenções. Antes, eles ocasionalmente atendiam às necessidades da empresa, mas agora, após as ações realizadas, atendem a tais necessidades na visão dos especialistas.
- As perguntas 7 e 8 não apresentaram diferenças significativas entre as aplicações do questionário. Isso se deve ao fato de que a empresa em estudo trabalha com estoque, o que apresenta pouca influência para os clientes.

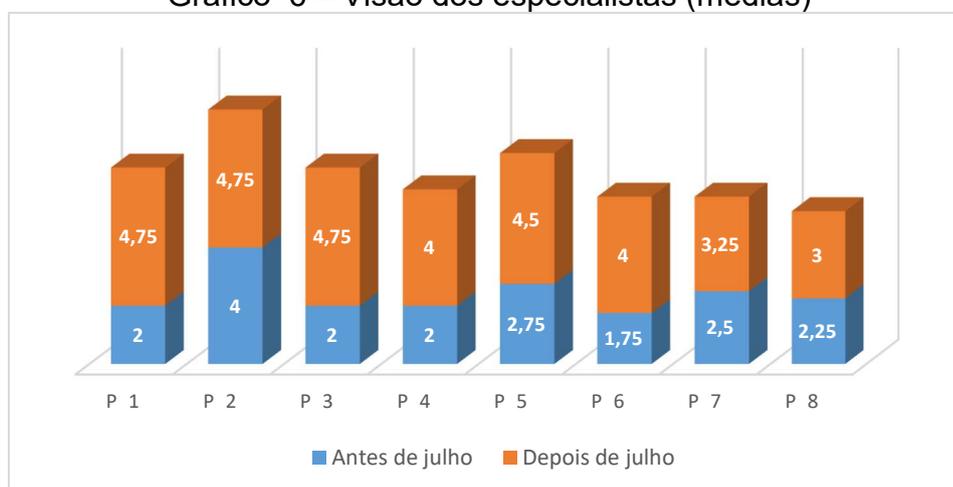
Foi destacado em diversos momentos pelos entrevistados, que além da melhoria da produtividade e a satisfação relacionada ao atendimento da equipe da manutenção, também o aumento de consumo de matéria prima, ou seja, de resíduos classe II, assim contribuindo com o Meio Ambiente.

### 5.2.1 Resultados da pesquisa com os especialistas

Nesta etapa do projeto, foi essencial avaliar a satisfação dos clientes internos em relação aos resultados e atendimentos da nova abordagem de manutenção, que agora desempenha um papel de destaque nos objetivos da empresa em estudo. Para isso, foram realizadas pesquisas antes e depois da implementação dos eventos relacionados ao FMECA. As questões do questionário estão disponíveis no Anexo B.

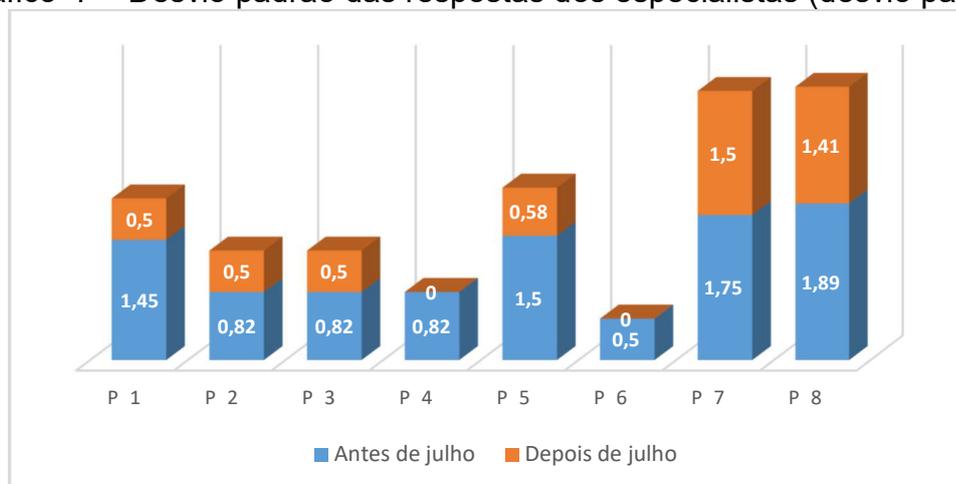
A seguir, serão apresentados os resultados em formato gráfico 6, de acordo com as respostas dos entrevistados.

Gráfico 6 – Visão dos especialistas (médias)



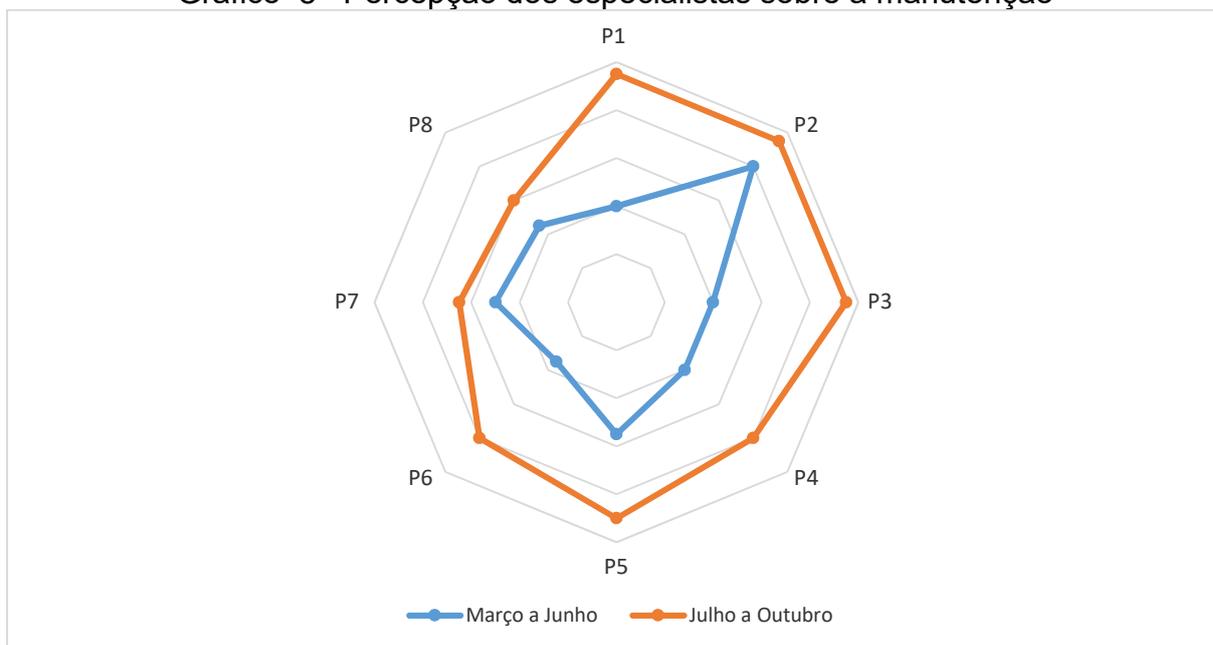
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Gráfico 7 – Desvio padrão das respostas dos especialistas (desvio padrão)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Gráfico 8– Percepção dos especialistas sobre a manutenção



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### 5.3 Comentários finais do capítulo

Neste capítulo, foram exibidos o desenvolvimento e a forma como foi demonstrada a eficácia das ações no equipamento piloto e nos demais equipamentos, oriundo das aplicações das ferramentas estatísticas de Análise de Variância (ANOVA), o teste não-paramétrico U de Mann-Whitney e o Teste t de Student, com as devidas comparações das médias, sendo desenvolvido os resultados graficamente para melhor entendimento.

Na continuidade do trabalho, observou-se a necessidade de analisar também este aumento de produção, resultando no maior consumo de resíduos, com isso, reduzindo os impactos ambientais relacionados aos resíduos classe II.

Finalizando o capítulo foi realizado uma pesquisa com os clientes internos, no total cinco (5) com conhecimentos e vivências com a área de manutenção, do antes e depois da implantação das ferramentas estratégicas da área de manutenção, para que não somente atender a necessidade produtiva, mas também direcionando a manutenção a ser protagonista para estratégia do negócio. Fato este, que pode-se notar tanto na pesquisa com os entrevistados bem como, através dos expressivos resultados obtidos ambientalmente. Constata-se que o propósito da pesquisa houve relevância para a Empresa, Sociedade e ao Meio Ambiente.

## 6 CONCLUSÃO

Em resposta à questão de pesquisa sobre a influência de avanços baseados na manutenção estratégica dos ativos e na capacidade produtiva de uma empresa que emprega técnicas de simbiose industrial, os resultados obtidos neste estudo demonstraram conclusivamente a importância desses avanços. A implementação de um sistema de gerenciamento preventivo de falhas dos ativos mostrou-se fundamental para melhorar a disponibilidade dos equipamentos, resultando em um aumento significativo na capacidade produtiva da empresa simbiótica estudada. Esses resultados confirmam o objetivo específico de propor um sistema de gerenciamento preventivo de falhas dos ativos, destacando a relevância dessa abordagem para o sucesso da simbiose industrial.

Os resultados indicaram que a manutenção tem influência significativa na Simbiose Industrial, como pode ser observado pelos seguintes resultados:

- A disponibilidade dos ativos aumentou de 82% para 92,8%, o que representa um aumento de 10,8 pontos percentuais.
- Aumento no atendimento dos prazos definidos pelo setor de planejamento de produção de 12 pontos percentuais.

A produção média aumentou de 12.155 m<sup>2</sup> para 14.222,75 m<sup>2</sup>, ou seja, um aumento de 17,01%, neste caso, este índice está relacionado ao aumento de tempo disponível do equipamento, resultando em maior quantidade de fabricação de Kg de material produzido por dia.

Os resultados estão descritos nas seções 5.1.2 e 5.1.3 e atendem os objetivos específicos segundo e terceiro da pesquisa. Esses resultados validam o objetivo específico de mensurar as variações nos indicadores da capacidade produtiva e o aumento de consumo de resíduos, demonstrando os benefícios ambientais e econômicos da simbiose industrial.

É relevante destacar a redução no impacto ambiental através do aumento do consumo dos resíduos classe II, principalmente de plásticos em torno de 2.100 kg/dia e também de óleo reciclado (cozinha) por volta de 100 l/dia. Este resultado significa uma redução de recursos naturais não renováveis, tais como o petróleo (185 l/dia), uma redução de emissão de gases de efeito estufa (9,19 m<sup>3</sup>/ dia) e uma economia de 1,22 m<sup>3</sup>/ dia de água. Esse resultado mostra o potencial de impacto ambiental quando as empresas inseridas na Economia Circular otimizam seus processos produtivos.

Para atender o primeiro objetivo específico, foi realizado o item 4 da pesquisa, que discute toda a implantação do sistema preventivo e a metodologia de Análise dos modos, efeitos de falha e criticidade, empregada para atingir esse objetivo. Além dos resultados atingidos após a aplicação da pesquisa, é importante destacar:

- Melhoria no ambiente fabril entre os departamentos de manutenção, engenharia, desenvolvimento de processos e produção, conectando todos com as metas e obrigações para que o resultado do todo seja atingido;
- Um rearranjo na cadeia produtiva por meio das tomadas de decisão oriundas das verificações das variáveis produtivas com a visualização das não conformidades de produção horária.
- Houve um aumento significativo dos fatores de produtividade, produção e disponibilidade dos equipamentos. Isso sugere que a ferramenta FMECA pode ter um grande impacto nos resultados das indústrias se aplicada de forma objetiva, utilizando um time multifuncional com foco principal na troca de ideias e visões.

Esta pesquisa proporcionou uma compreensão mais aprofundada da influência da manutenção estratégica dos ativos na Simbiose Industrial. No entanto, algumas reflexões e limitações devem ser consideradas. Primeiramente, o estudo foi baseado em um único estudo de caso em uma empresa simbiótica específica, o que pode limitar a generalização dos resultados para outras organizações. Portanto, é recomendável realizar estudos adicionais em diferentes contextos industriais para confirmar a validade e a aplicabilidade das conclusões alcançadas. Além disso, a pesquisa se concentrou na análise quantitativa dos resultados, considerando a disponibilidade dos ativos e o aumento da capacidade produtiva e na análise qualitativas, visando compreender melhor os impactos subjetivos e as percepções dos colaboradores em relação às práticas de manutenção e à Simbiose Industrial.

Este estudo reforça a importância da manutenção estratégica dos ativos e da capacidade produtiva na simbiose industrial. Os avanços propostos, como o sistema de gerenciamento preventivo de falhas dos ativos, mostraram-se eficazes em melhorar a disponibilidade dos equipamentos e aumentar a eficiência produtiva da empresa. Os resultados alcançados evidenciam o potencial de impacto ambiental positivo quando as práticas de economia circular são implementadas, resultando em redução de recursos naturais não renováveis e emissões de gases de efeito estufa. Essas descobertas contribuem para o corpo de conhecimento na área da ecologia

industrial e fornecem insights valiosos para gestores e profissionais que buscam aprimorar a sustentabilidade e a eficiência dos processos produtivos em empresas que adotam a simbiose industrial.

Em trabalhos futuros, pretende-se estabelecer novas formas de análise do FMECA, considerar a inclusão da Análise de Impactos Ambientais no Índice de Risco Prioritário (RPN) para aprimorar a abordagem ambientalmente consciente da manutenção. Além disso, é importante desenvolver um mapeamento abrangente das práticas de descarte de materiais utilizados pela manutenção, garantindo que sejam realizados de maneira adequada e em conformidade com as regulamentações ambientais. Essas melhorias metodológicas podem fortalecer ainda mais a eficácia das estratégias de manutenção preventiva e contribuir para a preservação ambiental no âmbito da Simbiose Industrial.

Como resultado espera-se uma área de manutenção protagonista, com foco na redução de perdas produtivas e na preservação ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, Mônica Cavalcanti Sá de; CEGLIA, Domenico. On the implementation of a circular economy: the role of institutional capacity-building through industrial symbiosis. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 138, p. 99-109, nov. 2018.
- ALMEIDA, José Cândido de Júnior; PARRA, Rogerio Botelho. Predictive & detective maintenance: effective tools in the management of aeronautical products. *In*: Congress Of The International Council Of The Aeronautical Sciences, 31., 2018, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ICAS, 2018. p. 1-9.
- AMUI, Lara Bartocci Liboni *et al.* Sustainability as a dynamic organizational capability: a systematic review and a future agenda toward a sustainable transition. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 142, p. 308-322, jan. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CALÇADOS (ABICALÇADOS). Disponível em: <http://www.abicalcados.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AZEVEDO, Juliana Laboissiere de. A economia circular aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. *In*: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 11., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015. p. 2-16.
- BALDASSARRE, Brian *et al.* Industrial Symbiosis: towards a design process for eco-industrial clusters by integrating circular economy and industrial ecology perspectives. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 216, p. 446-460, abr. 2019.
- BARAN, Leandro Roberto; TROJAN, Flávio. Uma revisão e análise comparativa das técnicas para determinar a criticidade dos sistemas e equipamentos em plantas industriais. **Espacios**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 1-15, 2016.
- BARDIN, Laurence. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BIMBATI, Tainá Ângela Vedovello; RUTKOWSKI, Emília Wanda. - desenvolvimento industrial para a reciclagem de resíduos sólidos: estratégias e instrumentos. *In*: Congresso ABES / FENASAN, 1., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: [ABES], 2017. p. 1-9.

BOONS, Frank; SPEKKINK, Wouter; MOUZAKITIS, Yannis. The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 19, n. 9-10, p. 905-911, jun. 2011.

BUENO, Mateus (ed.). **Relatório Ambiente Verde**. Taquara: Vib Master, 2022.

CAMPBELL, John D.; JARDINE, Andrew K. S.; MCGLYNN, Joel. **Asset Management Excellence: optimizing equipment life-cycle decisions**. Flórida, EUA: CRC Press, 2011.

CAMPBELL, John D.; JARDINE, Andrew K.S. (ed.). **Maintenance Excellence: optimizing equipment life-cycle decisions**. Flórida, EUA: CRC Press, 2001.

CAUCHICK, Paulo Paulo (coord.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. [s.l.]: Gen LTC, 2018.

CHERTOW, Marian R.. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. **Annual Review Of Energy And The Environment**, [s.l.], v. 25, n. 1, p. 313-337, nov. 2000.

CORRÊA, Rodrigo Fernandes; DIAS, Acires. Modelagem matemática para otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva. **Gestão & Produção**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 267-278, jun. 2016.

COSENZA, José Paulo; ANDRADE, Eurídice Mamede de; ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes de. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da política nacional de resíduos sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 1-28, 6 maio 2020.

DIAS, Moises Fernandes; FERNANDES, Mara Rejane. **Manutenção Lean: construção de uma manutenção protagonista que gera valor e é valorizada**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2022.

DURAN, Orlando; CAPALDO, Andrea; ACEVEDO, Paulo Duran. Lean Maintenance Applied to Improve Maintenance Efficiency in Thermoelectric Power Plants. **Energies**, [s.l.], v. 10, n. 10, p. 1-21, 19 out. 2017.

FABRIS, Míriam Machado *et al.* Economia circular e engenharia de produção: inter-relação e oportunidades de pesquisa. In: Simpósio De Engenharia De Produção, 8., 2020, [s.l.]. **Anais [...]**. [s.l.]: SIMEP, 2020. p. 1-19.

FOLGLIATTO, Fláviosanson; DUARTE, José Luis Ribeiro. **Confabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. Recurso eletrônico.

FORD MOTOR COMPANY. **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): reference manual**. [s.l.]: [s.n.], 1998.

FRANCIOSI, Franciosi *et al.* Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 context: a scoping literature review. **Ifac-Papersonline**, [s.l.], v. 51, n. 11, p. 903-908, 2018.

GONÇALVES, Taynara Martins; BARROSO, Ana Flavia da Fonseca. A economia circular como alternativa à economia linear. *In: Simpósio De Engenharia De Produção De Sergipe*, 11., 2013, [São Cristóvão]. **Anais [...]**. [São Cristóvão]: Simprod, 2019. p. 265-272.

HAAS, Willi *et al.* How Circular is the Global Economy?: an assessment of material flows, waste production, and recycling in the european union and the world in 2005. **Journal Of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 19, n. 5, p. 765-777, 13 mar. 2015.

HERPICH, Cristiano; FOGLIATTO, Flávio Sanson. Aplicação de FMECA para definição de estratégias de manutenção em um sistema de controle e instrumentação de turbogeradores. **Iberoamerican Journal Of Industrial Engineering**, Florianópolis, v. 5, n. 9, p. 70-88, 2013.

HEYES, Graeme *et al.* Developing and implementing circular economy business models in service-oriented technology companies. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 177, p. 621-632, mar. 2018.

HU-CHEN LIU; LONG LIU; NAN LIU. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: a literature review. **Expert Systems With Applications**, [s.l.], v. 40, n. 2, p. 828-838, fev. 2013.

INGEMARSDOTTER, Emilia; JAMSIN, Ella; BALKENENDE, Ruud. Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – A case study. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 162, p. 01-26, nov. 2020.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60812**: Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). Switzerland: IEC, 2006.

INTERNATIONAL MARINE CONTRACTORS ASSOCIATION. **M 166**: Guidance on failure modes and effects analysis (FMEA). [s.l.]: IMCA, 2019.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 108163**: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating. [s.l.]: ISO, 1998.

JABBOUR, Charbel José Chiapetta *et al.* "Verdes e competitivas?": a influência da gestão ambiental no desempenho operacional de empresas brasileiras. **Ambiente & Sociedade**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 151-172, ago. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/g8XDrSVM6Dt8RNRGWTRDr9q/?lang=pt>. Acesso em: 24 out. 2021.

JASIULEWICZ-KACZMAREK, Małgorzata; GOLA, Arkadiusz. Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing - an Overview. **IFAC-Papersonline**, [s.l.], v. 52, n. 10, p. 91-96, 2019.

KARAULOVA, Tatjana; BASHKITE, Viktoria. Decision-making Framework for Used Industrial Equipment. **Engineering Economics**, [s.l.], v. 27, n. 1, p. 23-31, 1 mar. 2016.

KIM, Hyung Sik; CAMPBELL, John D.; REYES-PICKNELL, James V.. **Uptime: strategies for excellence in maintenance management**. [New York]: Productivity Press, 2015.

KIRCHHERR, Julian *et al.* **Breaking the Barriers to the Circular Economy**. [s./]: Deloitte, 2017.

KRAVCHENKO, Grégory Adad; PASQUALETTO, Antônio; FERREIRA, Eva de Melo. Aplicação de princípios da ecologia industrial nas empresas moveleiras de Goiás. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s./], p. 238-294, 20 jun. 2016.

LEAL, Fabiano; PINHO, Alexandre Ferreira de; ALMEIDA, Dagoberto Alves de. Análise de falhas através da aplicação do fmea e da teoria Grey. **Revista Gestão Industrial**, [s./], v. 2, n. 1, p. 78-89, 1 jun. 2006.

LEITÃO, Alexandra. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **Portuguese Journal Of Finance, Management And Accounting**, [s./], v. 1, n. 2, p. 149-171, 2015.

LEITE, Janaína de Souza. **Ecologia industrial: o uso sustentável da madeira como coproduto**. 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Curso de Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional) - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2020.

LI, Zhe; WANG, Yi; WANG, Ke-Sheng. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: industry 4.0 scenario. **Advances In Manufacturing**, [s./], v. 5, n. 4, p. 377-387, dez. 2017.

LISBÔA, Educélio Gaspar *et al.* Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: uma análise quantitativa utilizando o modelo de regressão linear múltipla. **Brazilian Journal Of Development**, [s./], v. 6, n. 3, p. 15179-15195, 2020.

MACHADO, Claralucia Prates; MORANDI, Maria Isabel Wolf; SELLITTO, Miguel. System Dynamics and Learning Scenarios for Process Improvement and Regional Resilience: a study in the footwear industry of southern brazil. **Systemic Practice And Action Research**, [s./], v. 32, n. 6, p. 663-686, 23 fev. 2019.

MARINELLI, Simona *et al.* Estimating the Circularity Performance of an Emerging Industrial Symbiosis Network: the case of recycled plastic fibers in reinforced concrete. **Sustainability**, [s./], v. 13, n. 18, p. 1-12, 14 set. 2021.

MARTINS, Paulo Sérgio; ESCRIVÃO FILHO, Edmundo; NAGANO, Marcelo Seido. Gestão ambiental e estratégia empresarial em pequenas e médias empresas: um estudo comparativo de casos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s./], v. 20, n. 2, p. 225-234, jun. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000115365>. Acesso em: 24 out. 2021.

MELO, Fábio Teixeira; LOOS, Mauricio Johnny. Análise da metodologia da Manutenção Produtiva Total (TPM): estudo de caso. **Espacios**, [s./], v. 39, n. 3, p. 13-27, 2018.

- MENEZES, Carlos Augusto Gabriel. **FMEA de processo na indústria automotiva: uma análise sobre a aplicação do número de prioridade de risco (RPN)**. 2020. 107 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.
- MOHANTY, J K.; DASH, P. R.; PRADHAN, P. K.. FMECA analysis and condition monitoring of critical equipments in super thermal power plant. **International Journal Of System Assurance Engineering And Management**, [s.l.], v. 11, n. 3, p. 583-599, 21 jan. 2020.
- MONI, Sheikh Moniruzzaman *et al.* Life cycle assessment of emerging technologies: a review. **Journal Of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 52-63, 25 nov. 2019.
- MOUBRAY, John. **Reliability-centered Maintenance**. South Norwalk, Connecticut: Industrial Press, 1997.
- MOUZANI, Imane Al; BOUAMI, Driss. The integration of Lean Manufacturing and Lean Maintenance to improve production efficiency. **International Journal Of Mechanical And Production Engineering Research And Development**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 605-610, 2019.
- NOSRATABADI, Saeed *et al.* Sustainable Business Models: a review. **Sustainability**, [s.l.], v. 11, n. 6, p. 1663-1693, 19 mar. 2019.
- OECD/EUROSTAT. **Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation**. Luxembourg: Oecd Publishing, 2018.
- OLIVEIRA, Cláudia Regina Carvalho de *et al.* Metodologia para aplicação combinada de manutenção centrada na confiabilidade e na condição (RCM+CBM). **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, [s.l.], v. 14, n. 1, p. 94-107, 2020.
- PERDONÁ, Igor Idalgo *et al.* Associação entre Ferramentas da Qualidade e Tipos de Manutenção: análise e aplicabilidade em uma unidade militar. **Espacios**, [s.l.], v. 37, n. 14, p. 1-14, 2016.
- PORTER, Michael e; LINDE, Claas van Der. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. **Journal Of Economic Perspectives**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 97-118, 1 nov. 1995.
- POSCH, Alfred. Industrial Recycling Networks as Starting Points for Broader Sustainability-Oriented Cooperation? **Journal Of Industrial Ecology**, [s.l.], v. 14, n. 2, p. 242-257, 2010.
- RAMIYA, Sheerapthi; SURESH, M.. Factors influencing lean-sustainable maintenance using TISM approach. **International Journal Of System Assurance Engineering And Management**, [s.l.], v. 12, n. 6, p. 1117-1131, 4 set. 2021.
- SANTIAGO, Leila Santos; DIAS, Sandra Maria Furiam. Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 17, n. 2, p. 203-212, jun. 2012.

SCHMITT, José Claudemir; LIMA, Carlos Roberto Camello. Método de Análise de Falhas utilizando a Integração das Ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA. **Espacios**, [s.l.], v. 37, n. 8, p. 3-22, 2016.

SELLITTO, Miguel Afonso *et al.* Barriers, drivers, and relationships in industrial symbiosis of a network of Brazilian manufacturing companies. **Sustainable Production And Consumption**, [s.l.], v. 26, p. 443-454, abr. 2021.

SELLITTO, Miguel Afonso. Analysis of maintenance policies supported by simulation in a flexible manufacturing cell. **Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería**, [s.l.], v. 28, n. 2, p. 293-303, jun. 2020.

SELLITTO, Miguel Afonso. Expected utility of maintenance policies under different manufacturing competitive priorities: a case study in the process industry. **Cirp Journal Of Manufacturing Science And Technology**, [s.l.], v. 38, p. 717-723, ago. 2022.

SELLITTO, Miguel Afonso. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Production**, [s.l.], v. 15, n. 1, p. 44-59, abr. 2005.

SELLITTO, Miguel Afonso. **Sistema de produção sincronizado**: uma aplicação em processos produtivos de propriedade contínuos segundo a teoria das restrições. 1999. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SILVA, Adriana Hoenisch da. **Avaliação ambiental do setor calçadista sob a ótica da gestão de resíduos sólidos**. 2016. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

SILVA, Railma Rochele Medeiros da *et al.* Ecologia Industrial: análise de ferramentas e viabilidade. *In*: Encontros Nacionais de Engenharia e Desenvolvimento Social, 13., 2016, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2016. p. 1-19.

SILVA, Renan Favarão da *et al.* Defining Maintenance Significant Items Based on ISO 55000 and AHP: a hydropower plant case study. **Proceedings Of The 29Th European Safety And Reliability Conference (Esrel)**, [s.l.], p. 3437-3444, 2019.

SILVA, Renan Favarão da; SOUZA, Gilberto Francisco Martha de. Modeling a maintenance management framework for asset management based on ISO 55000 series guidelines. **Journal Of Quality In Maintenance Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 4, p. 915-937, 13 out. 2021.

SILVA, Tâmara Machado Fagundes da. **Um método de avaliação de fatores de risco na implementação da produção enxuta**. 2019. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

- SILVESTRI, Luca *et al.* Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: a systematic literature review. **Computers In Industry**, [s.l.], v. 123, p. 1-6, dez. 2020.
- SINGH, Sandeep; KHAMBA, Jaimal Singh; SINGH, Davinder. Analysis and directions of OEE and its integration with different strategic tools. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers: Journal of Process Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 235, n. 2, p. 594-605, 9 set. 2020.
- SUZAKI, Kiyoshi. **New Shop Floor Management**: empowering people for continuous improvement. New York: Free Press, 1993.
- TAKAHASHI, Yoshikazu; OSADA, Takahashi. **TPM/MPT**: manutenção produtiva total. São Paulo: Imam, 2015.
- THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **History of the IPCC**. 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/history/>. Acesso em: 01 nov. 2022.
- THIOLLENT, Michel. Construção do conhecimento e metodologia da extensão. **Cronos**, [s.l.], v. 3, n. 2, p. 65-71, 2002.
- TREVISAN, Marcelo *et al.* Ecologia Industrial, Simbiose Industrial e Ecoparque Industrial: conhecer para aplicar. **Sistemas & Gestão**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 204-215, 5 jul. 2016.
- VEIGA, José Eli da. O âmago da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, [s.l.], v. 28, n. 82, p. 7-23, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/88916>. Acesso em: 11 out. 2021.
- VIERO, Carlos Frederico; NUNES, Fabiano de Lima; STAHNKE, Maurício Álison. Análise do uso da manutenção preventiva em ambientes educacionais: um estudo de caso. **Espacios**, [s.l.], v. 36, n. 18, p. 14-35, 2015.
- VOSS, Chris; TSIKRIKTSIS, Nikos; FROHLICH, Mark. Case research in operations management. **International Journal Of Operations & Production Management**, [s.l.], v. 22, n. 2, p. 195-219, 1 fev. 2002.
- WATANABE, Edson *et al.* **Modelagem de Processos para Avaliação de Desempenho em Sistema Produtivo Sustentavel**. [s.l.]: [s.n.], 2014.
- YIN, Robert K. **Estudo de Caso**: planejamento e métodos. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- YU, Fei; HAN, Feng; CUI, Zhaojie. Evolution of industrial symbiosis in an eco-industrial park in China. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 87, p. 339-347, jan. 2015.
- ZHAO, Rui *et al.* Machine Health Monitoring Using Local Feature-Based Gated Recurrent Unit Networks. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, [s.l.], v. 65, n. 2, p. 1539-1548, fev. 2018.

ZHAO, Xinyue; BAI, Shunwen; ZHANG, Xuedong. Establishing a decision-support system for eco-design of biological wastewater treatment: a case study of bioaugmented constructed wetland. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 274, p. 425-429, fev. 2019.

ZONTA, Tiago *et al.* Predictive maintenance in the Industry 4.0: a systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, [s.l.], v. 150, p. 106889-106889, dez. 2020.

## ANEXO A - Aplicação prática da ferramenta FMECA

FMECA - Análise do Modo de Falha, Efeitos e Criticidade															
PONTO DA FALHA				ANÁLISE DA FALHA					CRITICIDADE						
Item	Função que executa	Conjunto	Componente	Modo da falha	Efeito da falha	Falhas	Causas da falha	Modo de detecção	Ação recomendada	S	O	D	NPR	Estratégia de manutenção	
Extrusoras	Produção do principal produto	Caixas de transmissão de força	Cabos e fiações	Baixa isolamento	Parada parcial ou total do sistema	Potencial	Degradação do material (vida útil)	Megagem dos condutores	Conserto ou substituição	8	4	8	256	Corretiva planejada	
				Partido	Parada total do sistema	Total	Ação de terceiros	Inspeção visual	Substituição	8	4	8	256	Corretiva planejada	
			Sistema hidráulico	Variação de espessura	Produto não conforme e parada de total	Total	Pressão da bomba ineficiente, falta de óleo hidráulico e obstrução na rede	Inspeção visual	Conserto ou substituição	6	8	3	144	Corretiva não planejada	
				Calandra não abre/fecha						8	7	3	168	Corretiva não planejada	
			Motorização	Sobrecarga de motores	Superaquecimento	Potencial	Exigência de torque excessivo	Possível ação corretiva	Redução de carga e analisar fiação	6	6	8	288	Corretiva planejada	
										Análise de temperatura, sensoramento	6	6	8	288	Corretiva planejada
										Inspeção preditiva e visual	6	6	8	288	Corretiva planejada
				Vibração com espectro em alta frequência	Ruído elevado e sobrecarga do motor	Potencial	Desalinhamentos	Análise de vibração	Inspeção preditiva	6	4	6	144	Corretiva não planejada	
										Treinamento operacional	6	4	6	144	Corretiva não planejada
				Desgaste de rolamentos	Desgaste prematuro, pode danificar isolamento	Potencial	Manuseio incorreto (montagem)	Análise de vibração	Inspeção preditiva	6	4	6	144	Corretiva não planejada	
										Ajustes errados	6	4	6	144	Corretiva não planejada
										Fadiga	6	4	6	144	Corretiva não planejada
			Vedação danificada	Visual	Substituição	6	7	7	294	Corretiva planejada					
						Excesso de carga	Inspeção visual	Trabalhar com carga nominal	6	7	7	294	Corretiva planejada		
			Lubrificação ineficiente (excesso ou falta)	Escala de lubrificação	6	7		8	336	Preventiva e Inspeções					
			Rolamentos	Vibração em alta frequência	Ruído elevado e sobrecarga do motor	Potencial	Desalinhamento	Inspeção preditiva (Análise de vibração)	Substituição do item danificado	6	4	8	192	Corretiva não planejada	
				Aquecimento	Temperatura elevada					6	4	6	144	Corretiva não planejada	
				Frequência de vibração 2 vezes rotação do acionamento	Movimento com o conjunto					6	4	6	144	Corretiva não planejada	
				Elevados níveis de bronze na análise de óleo	Desarme do motor elétrico					Falta de lubrificação nos rolamentos (Análise ferrografia)	8	6	9	432	Preditiva
				Vibração e temperaturas excessivas						Desalinhamento do conjunto motor/reductor	Inspeção preditiva (Análise de vibração)	Análise de vibração mensal	6	4	8
			Retentores	Vazamentos	Contaminação/ Perda de lubrificação	Potencial	Falha na montagem ou desalinhamento do conjunto	Inspeção visual	Treinamento de montagem e manutenção de reductores	6	7	8	336	Preventiva e Inspeções	
			Conexões e terminais	Mau contato	Parada parcial ou total do sistema	Funcional	Resíduos contaminantes (sujeira)	Medição com multímetro	Revisar isolamento e limpeza geral	8	5	9	360	Preventiva e Inspeções	
					Parada total do sistema	Total	Conexão mau apertada(solta)	Inspeção visual	Reaperto das conexões e Treinamento técnico	8	5	9	360	Preventiva e Inspeções	
Engrenamentos	Vibração excessiva	Desarme do motor Elétrico	Funcional	Falta de ajuste do backlash	Inspeção preditiva (Análise de vibração)	Inspeção de folgas a cada 6 meses	8	5	8	320	Preventiva e Inspeções				
			Potencial	Desalinhamento do eixo principal	Inspeção preditiva (Análise ferrografia)	Realizar análise de óleo a cada 6 meses	8	6	9	432	Preditiva				

**ANEXO B – Pesquisa aplicada (*feedback*)**

P1 - Qual seu nível de satisfação quanto à área de manutenção?

Crítico       Regular       Indiferente       Satisfeito       Muito satisfeito

P2 - Qual a influência da manutenção dos ativos no fluxo produtivo?

Sem influência       Baixa       Média       Alta       Muito alta

P3 - Na visão diretiva da empresa, qual o índice de confiabilidade dos ativos na unidade fabril?

Muito baixa       Baixa       Regular       Alta       Muito alta

P4 - Na sua opinião, como está o desempenho da área manutenção?

Muito baixa       Baixa       Regular       Alta       Muito alta

P5 - Qual a sua percepção quanto à assertividade dos trabalhos realizados pela equipe de manutenção

Muito ruim       ruim       Regular       boa       Muito boa

P6 - Para realização das manutenções, investimento, tempo de reparo e assertividade atendem às necessidades da empresa?

Nunca atende       Ocasionalmente       Parcialmente       Atende       Sempre atende

P7 - Existe momentos que a disponibilidade dos ativos afeta o cliente final?

Sempre afeta       Ocasionalmente       Indiferente       Afeta       Nunca afeta

P8 - A manutenção corretiva afeta a capacidade produtiva?

Sempre afeta       Ocasionalmente       Indiferente       Afeta       Nunca afeta