

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS, ENGENHARIA
DE PRODUÇÃO E SERVIÇO SOCIAL

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE CONFIABILIDADE E ANÁLISE
DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS DE INDÚSTRIA DO
RAMO TABAGISTA

ARTHUR RAMALHO VIEIRA MARTINS
GIOVANNI AMARAL FAIFER

UBERLÂNDIA

2025

ARTHUR RAMALHO VIEIRA MARTINS

GIOVANNI AMARAL FAIFER

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE
FALHAS EM EQUIPAMENTOS DE INDÚSTRIA DO RAMO
TABAGISTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Administração, Ciências
Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço
Social da Universidade Federal de Uberlândia,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientadora: Gabriela Lima Menegaz

ITUIUTABA

2025

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE
FALHAS EM EQUIPAMENTOS DE INDÚSTRIA DO RAMO
TABAGISTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Administração, Ciências
Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço
Social da Universidade Federal de Uberlândia,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia de Produção.

Ituiutaba, 06 de maio de 2025.

Banca Examinadora:

Gabriela Lima Menegaz, Universidade Federal de Uberlândia

Jefferson Gomes do Nascimento, Universidade Federal de Uberlândia

Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa, Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Ao concluirmos esta etapa tão significativa de nossa formação, a graduação em Engenharia de Produção, desejamos expressar nossa mais sincera gratidão a todos que nos apoiaram e incentivaram ao longo desta jornada.

Primeiramente, agradecemos às nossas famílias. Pelo amor incondicional, pela paciência nos momentos de ausência, pelo suporte financeiro e, acima de tudo, pelo apoio emocional e confiança depositada em nós. Vocês foram nosso alicerce fundamental e a principal motivação para chegarmos até aqui. Sem o incentivo e a compreensão de vocês, esta conquista não seria possível.

Aos nossos amigos e colegas de curso, que compartilharam conosco os desafios, as longas noites de estudo, as alegrias e as dificuldades desta caminhada. Agradecemos pela parceria, pelo companheirismo, pelas palavras de incentivo e pelos momentos de descontração que tornaram todo o processo mais leve e prazeroso. Levaremos conosco as amizades construídas aqui.

Expressamos nossa profunda gratidão a todos os professores do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Uberlândia, campus de Ituiutaba. Pelos ensinamentos transmitidos com dedicação, pela paciência em compartilhar seus conhecimentos, pelos conselhos e pela inspiração. Vocês foram essenciais para nossa formação acadêmica, crítica e profissional, preparando-nos para os desafios que encontraremos.

Um agradecimento especial e indispensável à nossa orientadora, Professora Dra. Gabriela Lima Menegaz. Sua orientação precisa, disponibilidade, paciência, confiança em nosso potencial e direcionamentos técnicos foram cruciais para a concepção, desenvolvimento e conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso. Somos imensamente gratos por todo o apoio e aprendizado proporcionado.

RESUMO

O setor industrial enfrenta desafios constantes para melhorar eficiência, qualidade e competitividade. Empresas que não adotam estratégias eficazes de manutenção acabam lidando com altos custos, desperdícios e perdas na produção. No ramo tabagista, onde o volume de fabricação é alto e a confiabilidade dos equipamentos é essencial, falhas frequentes podem comprometer diretamente a produtividade e os resultados financeiros. Este trabalho buscou aumentar a disponibilidade dos equipamentos e reduzir as falhas em uma linha de produção desse setor, focando na lona de retorno do tabaco, um componente que apresentava um alto índice de quebras. A solução adotada foi a análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA), uma ferramenta que permite identificar problemas potenciais e definir ações para preveni-los. Além disso, foram aplicados cálculos de confiabilidade e análises operacionais para embasar as decisões e medir os impactos das melhorias. Com a implementação das ações propostas. Além disso, foram aplicados cálculos de confiabilidade e análises operacionais para embasar as decisões e medir os impactos das melhorias. Com a implementação das ações propostas, observou-se uma redução de aproximadamente 58% na frequência das quebras do componente analisado e um aumento na confiabilidade estimada (para 11 dias de operação) de aproximadamente 32% para 77%. Consequentemente, a linha de produção passou a operar por períodos mais longos sem interrupções, reduzindo a necessidade de reparos emergenciais e tornando a produção mais previsível, o que resultou em um ganho produtivo relativo de 15,2 milhões de cigarros no semestre pós-implementação, devido à menor indisponibilidade. Outro ponto importante foi a mudança na forma como a equipe enxergava a manutenção. No dia a dia, os operadores começaram a perceber os benefícios de um planejamento mais estruturado, o que ajudou a evitar problemas antes que se tornassem críticos. Esse engajamento foi essencial para garantir que as melhorias implementadas se mantivessem ao longo do tempo e se tornassem parte da rotina da fábrica. Este estudo mostra que investir em manutenção estratégica não só evita prejuízos, mas também impulsiona a produtividade e fortalece a competitividade da empresa no mercado.

Palavras-chave: Confiabilidade industrial, Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA), Redução de falhas, Disponibilidade de equipamentos.

ABSTRACT

The industrial sector constantly faces challenges to improve efficiency, quality, and competitiveness. Companies that do not adopt effective maintenance strategies end up dealing with high costs, waste, and production losses. In the tobacco industry, where production volumes are high and equipment reliability is essential, frequent failures can directly compromise productivity and financial results. This study aimed to increase equipment availability and reduce failures in a production line within this sector, focusing on the tobacco return conveyor belt, a component that exhibited a high failure rate. The adopted solution was the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), a tool that allows the identification of potential issues and the definition of preventive actions. Additionally, reliability calculations and operational analyses were applied to support decision-making and measure the impact of improvements. With the implementation of the proposed actions, there was an observed reduction of approximately 58% in the frequency of component failures and an increase in estimated reliability (for 11 days of operation) from approximately 32% to 77%. Consequently, the production line began to operate for longer periods without interruptions, reducing the need for emergency repairs and making production more predictable, which resulted in a relative productivity gain of 15.2 million cigarettes in the post-implementation semester due to reduced downtime. Another important point was the shift in how the team perceived maintenance. In daily operations, operators began to notice the benefits of more structured planning, which helped prevent problems before they became critical. This engagement was essential to ensure that the implemented improvements were sustained over time and became part of the factory's routine. This study demonstrates that investing in strategic maintenance not only prevents losses but also boosts productivity and strengthens the company's competitiveness in the market.

Keywords: Industrial reliability, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), failure reduction, equipment availability, continuous improvement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	<i>Curva da banheira</i>	Página 14
Figura 2	Ranking de severidade	Página 24
Figura 3	Escala de ocorrência	Página 25
Figura 4	Escala Detecção	Página 26
Figura 5	Composição dos módulos	Página 29
Figura 6	Quebras por linha de produção que possuem o componente “lona de retorno de tabaco”	Página 30
Figura 7	Componente mecânico de rolagem, “Lona de retorno do tabaco”.	Página 32
Figura 8	Gráfico de probabilidade de falha x tempo	Página 34
Figura 9	Gráfico de confiabilidade x tempo	Página 35
Figura 10	<i>FMEA Construído</i>	Página 39
Figura 11	Gráfico de probabilidade de falha x tempo após aplicação do FMEA	Página 41
Figura 12	Gráfico de confiabilidade x tempo após a aplicação do FMEA	Página 42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FMEA	Análise de Modo e Efeitos de Falha
RPN	Número de Prioridade de Risco
FTA	Análise de Árvore de Falhas
MTTF	Média de tempo até a ocorrência de falha
FDP	Função densidade de probabilidade
FRC	Função de risco crescente
FRD	Função de risco decrescente
FRE	Função de risco estacionária
TPM	Manutenção Produtiva Total
DFMEA	FMEA de Projeto
PFMEA	FMEA de Processo
SFMEA	FMEA de Sistema
SOD	Ocorrência e Detecção
RCA	Análise de causa raiz
NPR	Número de Prioridade de Risco
MTBF	Mean Time Between Failures

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS	11
1.1.1. Objetivos específicos	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. CONCEITOS DE CONFIABILIDADE	12
2.2. A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL E O PARÂMETRO DE FORMA (B)	16
2.3. TIPOS DE MANUTENÇÃO	19
2.4. ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA (FMEA): ABORDAGEM E IMPORTÂNCIA	21
3. METODOLOGIA	27
4. RESULTADOS	28
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA	28
4.2. MAPEAMENTO DA REALIDADE EMPRESARIAL	28
4.3. ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DA LONA DE RETORNO DO TABACO	32
4.4. ANÁLISE FMEA DO COMPONENTE "LONA DE RETORNO DO TABACO"	36
4.5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS PÓS-IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DO FMEA	40
5. CONCLUSÕES	43
6. REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade é um conceito fundamental na indústria moderna, exercendo um papel crítico na garantia de qualidade, eficiência e segurança de processos e produtos. Organizações que almejam desempenho excepcional e satisfação do cliente investem continuamente em aprimorar sua confiabilidade (Juran; Gryna, 1999).

No atual ambiente econômico global, as empresas enfrentam intensa competitividade, onde barreiras geográficas têm pouca relevância. Nesse contexto, a confiabilidade é um fator decisivo para a competitividade global. A capacidade de entregar produtos e serviços confiáveis não é apenas um diferencial estratégico, mas muitas vezes é a base que sustenta a posição das empresas no mercado internacional (Slack et al., 2009). A confiança de clientes, sejam eles consumidores finais ou integrantes de cadeias de suprimentos, é um recurso valioso, mas frágil, que pode ser rapidamente comprometido. Empresas que priorizam a confiabilidade ganham vantagens expressivas, como lealdade de clientes, reforço da reputação e novas oportunidades comerciais (Juran; Gryna, 1999).

A confiabilidade não se limita ao produto final, mas permeia toda a cadeia de valor, desde a concepção até o pós-venda. Negligenciar a confiabilidade pode resultar em custos inesperados, como *recalls*, processos judiciais e danos à reputação (os custos da não qualidade), comprometendo a sustentabilidade financeira e a competitividade das empresas (Montgomery, 2009). A busca por excelência em qualidade e satisfação do cliente está intrinsicamente ligada à confiabilidade. Produtos e serviços que não atendem consistentemente às expectativas comprometem a experiência do cliente e a percepção de qualidade (Juran; Gryna, 1999).

A construção de uma cultura organizacional que valorize a confiabilidade é um aspecto estratégico. Essa cultura deve ser incorporada em todos os níveis da organização, promovendo responsabilidade compartilhada, comunicação eficaz e aprendizado contínuo (Deming, 1986). Empresas que adotam essa abordagem se destacam por suas decisões informadas, maior conscientização sobre riscos e comprometimento com a excelência.

No setor tabagista, a confiabilidade desempenha um papel essencial para garantir qualidade, eficiência dos equipamentos de produção e satisfação do cliente. Antes de implementar melhorias, é necessário realizar uma análise abrangente da confiabilidade existente, identificando vulnerabilidades e pontos críticos. Métodos como a Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) e a Análise de Árvore de Falhas (FTA) são utilizados para mapear falhas potenciais e suas causas (Aiag; Vda, 2019). Essas análises guiam a formulação de

medidas corretivas, como manutenção preventiva aprimorada, melhorias no design de equipamentos, treinamento de pessoal e otimização de processos.

Finalmente, a eficácia das medidas propostas é avaliada considerando impactos na disponibilidade de equipamentos, redução de custos e eficiência operacional. A confiabilidade, portanto, se estabelece como um pilar estratégico para a gestão industrial contemporânea (Ebeling, 1997).

1.1. Objetivos

Aplicar a metodologia FMEA e conceitos de engenharia de confiabilidade para analisar as falhas e propor ações de melhoria para componente mecânico crítico de uma linha de produção da indústria tabagista, visando aumentar sua confiabilidade e disponibilidade operacional.

1.1.1. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar o componente crítico e a linha de produção prioritária com base na análise do histórico de falhas e paradas não planejadas.
- Realizar a análise da confiabilidade inicial do componente selecionado, estimando seus parâmetros (β e λ) através da modelagem por Processo de Weibull-Poisson e interpretando seu estágio no ciclo de vida (curva da banheira).
- Aplicar a metodologia FMEA de forma sistemática para mapear os modos de falha potenciais do componente mecânico crítico, identificar suas causas raízes e avaliar seus efeitos no processo produtivo.
- Priorizar os modos de falha identificados por meio do cálculo e análise do Número de Prioridade de Risco (RPN).
- Propor um plano de ações corretivas e preventivas com base nos resultados da FMEA, visando mitigar ou eliminar as causas dos modos de falha mais críticos. Avaliar a efetividade das ações implementadas através da comparação dos indicadores de desempenho (número de quebras, confiabilidade, impacto na produção) antes e depois da intervenção.

2. Fundamentação teórica

2.1. Conceitos de confiabilidade

Com o advento da economia global, houve um aumento significativo na demanda por sistemas e produtos que combinem alta eficiência com preços competitivos. Nesse contexto, tornou-se essencial reduzir ao máximo as chances de falhas e defeitos. Assim, a confiabilidade passou a ser associada diretamente ao desempenho consistente e bem-sucedido de um sistema ou produto, garantindo sua operação sem interrupções ou problemas (Ribeiro e Fogliatto, 2011).

De acordo com Leemis (1995), a confiabilidade é conceituada como "a probabilidade de um item desempenhar sua função esperada de maneira adequada durante um período determinado, sob condições ambientais previamente definidas". De forma similar, a norma NBR 5462-1994 define confiabilidade como "a capacidade de um item realizar uma tarefa específica dentro de condições estabelecidas e por um período estipulado".

Para implementar um programa eficaz de gestão da confiabilidade, é fundamental contar com uma equipe engajada e alinhada com esse objetivo. Cada membro deve possuir conhecimentos específicos, incluindo técnicas de desenvolvimento de produtos, liderança de equipes e análise de custos. Além disso, é indispensável estabelecer um método robusto para a coleta e avaliação de dados, visando construir um histórico confiável de informações de confiabilidade dentro da organização (Ribeiro e Fogliatto, 2011).

Considerando as definições de confiabilidade discutidas anteriormente, é essencial estabelecer métricas para unidades que não podem ser consertadas. Segundo Ribeiro e Fogliatto (2011), as três métricas de confiabilidade frequentemente adotadas para essas unidades são: i. Função de Confiabilidade $R(t)$; ii. Taxa de Risco $h(t)$; iii. Média de tempo até a ocorrência de falha (MTTF).

De Ribeiro e Fogliatto, sabe-se que a função de confiabilidade é dada pela Equação (1), que indica a probabilidade de a unidade apresentar sucesso na operação, isto é, não falhar no intervalo de tempo definido. Esta função também pode ser chamada de função de risco.

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(u)du \quad (1)$$

Onde, $f(u)$ representa a função densidade de probabilidade (f.d.p.) do tempo até a falha.

A função de risco $h(t)$, amplamente utilizada como uma das principais métricas de confiabilidade quantifica o nível de risco associado a uma unidade em um determinado momento (t). Seu cálculo pode ser feito pela Equação (2). Em essência, $h(t)$ representa a taxa de falha ou taxa de risco, desempenhando um papel crucial na análise do risco ao qual uma unidade está exposta em diferentes instantes, sendo, portanto, uma ferramenta indispensável para a avaliação e gerenciamento da confiabilidade. Um valor baixo dessa função indica menor exposição ao risco, refletindo maior confiabilidade da unidade naquele instante (Ribeiro e Fogliatto, 2011).

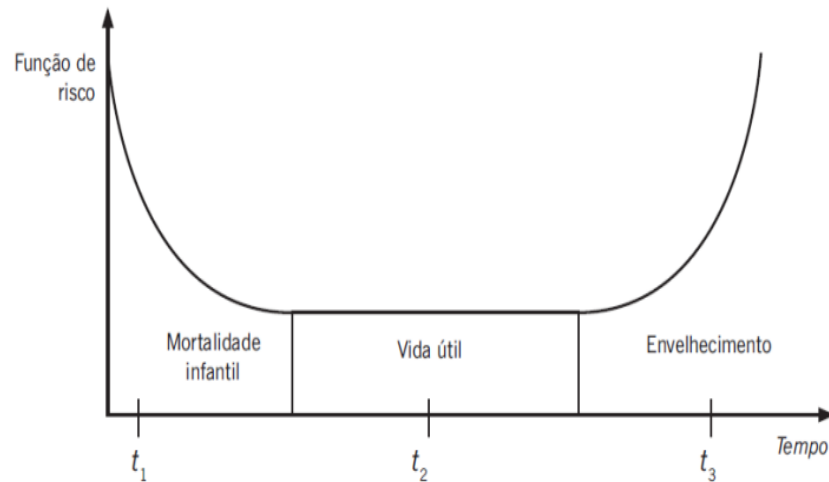
$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

Onde, $f(t)$ representa a função densidade de probabilidade (f.d.p.) do tempo até a falha, avaliada no instante t e $R(t)$ indica a função de confiabilidade (ou função de sobrevivência) no instante t , ou seja, a probabilidade do item sobreviver além do tempo t (Ribeiro e Fogliatto, 2011).

Essa função pode ser classificada conforme o padrão de variação do risco ao longo do tempo. A função de risco crescente (FRC) caracteriza-se pelo aumento do risco à medida que o tempo avança, comum em componentes sujeitos a desgaste ou envelhecimento. A função de risco decrescente (FRD), por outro lado, reflete uma redução do risco com o tempo, frequentemente associada a fases iniciais de operação, como o período de queima inicial. Já a função de risco estacionária (FRE) apresenta um risco constante ao longo do tempo, típico de componentes que operam em condições de equilíbrio (Ribeiro e Fogliatto, 2011).

Para exemplificar a evolução da função de risco $h(t)$, é utilizada a "curva da banheira", ilustrada na Figura 1. Essa curva é amplamente reconhecida e demonstra a variação do risco ao longo do tempo, integrando as três fases principais: risco decrescente, estacionário e crescente, refletindo os diferentes padrões de comportamento que uma unidade pode apresentar durante sua vida útil (Ribeiro e Fogliatto, 2011).

Figura 1 – Curva da banheira



Fonte: Ribeiro e Fogliatto, 2011.

Ao observar a Figura 1, nota-se que a função de risco apresenta valores elevados no início da vida útil do produto. Esse aumento inicial é atribuído a deficiências nos processos de fabricação, o que provoca falhas precoces, uma fase conhecida como "mortalidade infantil". Na segunda fase, chamada de "vida útil", as falhas que afetam o produto são, principalmente, causadas por condições ambientais extremas e tendem a ocorrer de forma mais uniforme ao longo do tempo. Durante esse estágio, a função de risco se mantém quase constante. Finalmente, na terceira fase, denominada "envelhecimento", as falhas surgem devido ao desgaste natural do produto, e seu número começa a crescer significativamente conforme o produto se aproxima do fim de sua vida útil. Nesse ponto, a função de risco aumenta de maneira exponencial, refletindo o aumento da probabilidade de falhas conforme o tempo avança (Ribeiro e Fogliatto, 2011). O tempo médio até uma unidade falhar, representado pela sigla MTTF (*Mean Time To Failure*), pode ser definido pela Equação (3). O MTTF envolve a integração da função de confiabilidade ao longo do tempo (Ribeiro e Fogliatto, 2011).

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (3)$$

De maneira geral a confiabilidade é um indicador essencial do desempenho de sistemas e componentes, refletindo a probabilidade de que eles realizem suas funções conforme esperado, sob condições específicas, durante um período estipulado Larry H. Crow (1974), uma figura destacada na engenharia de confiabilidade, desenvolveu metodologias avançadas para analisar e aprimorar essa métrica, especialmente em contextos industriais, como linhas de produção.

Entre as contribuições mais notáveis de Crow está o desenvolvimento de modelos que consideram falhas e reparos em sistemas dinâmicos. Ao contrário de abordagens que analisam apenas o tempo até a primeira falha, os modelos de Crow (1974) capturam o comportamento ao longo do tempo, incluindo múltiplas ocorrências de falhas e intervenções de reparo, tornando-os extremamente úteis para ambientes industriais complexos Larry H. Crow (1974).

A confiabilidade de um sistema é frequentemente calculada a partir da função de sobrevivência, representada por $R(t)$, que indica a probabilidade de o sistema funcionar sem falhas até o tempo t . Em sistemas compostos por múltiplos componentes, a confiabilidade total pode ser estimada como o produto das confiabilidades individuais, assumindo independência entre falhas. Para obter resultados mais precisos, Crow (1974) introduziu o uso de técnicas de plotagem de probabilidade, que identificam a melhor distribuição estatística para os dados observados, como as distribuições exponencial, Weibull, entre outras.

A análise de Weibull, amplamente aplicada, é particularmente eficaz para caracterizar a taxa de falhas ao longo do tempo, dividindo o ciclo de vida de um sistema em três fases principais (Ribeiro e Fogliatto, 2011):

- Mortalidade Infantil: Alta taxa de falhas iniciais devido a defeitos de fabricação ou design.
- Vida Útil: Taxa de falhas constante, associada ao uso normal do sistema.
- Desgaste: Taxa crescente de falhas devido ao envelhecimento ou desgaste.

Ao compreender em qual fase o sistema se encontra, é possível ajustar as estratégias de manutenção e operação para maximizar a eficiência e minimizar interrupções.

Além disso, Crow (ano) destacou a importância de integrar dados de confiabilidade em programas de manutenção preditiva. Essa abordagem utiliza informações em tempo real, como vibração, temperatura e outros parâmetros, para prever falhas iminentes e programar intervenções preventivas. Isso reduz o tempo de inatividade não planejado, melhora a eficiência operacional e prolonga a vida útil dos componentes.

2.2. A Distribuição de Weibull e o Parâmetro de Forma (β)

A distribuição de Weibull é uma das distribuições de probabilidade mais versáteis e amplamente utilizadas na engenharia de confiabilidade e análise de tempos de vida. Sua popularidade deriva da capacidade de modelar uma grande variedade de comportamentos de falha, desde falhas precoces até falhas por desgaste, adaptando-se a diferentes conjuntos de dados empíricos (O'Connor, 2002).

O Processo de Weibull-Poisson (WPP), também conhecido como Power Law Process (PLP), conforme descrito por Fraga e Pinto (2013) é um modelo adequado para sistemas cuja taxa de ocorrência de falhas pode variar ao longo do tempo.

Os parâmetros do modelo WPP, β (parâmetro de forma) e λ (parâmetro de escala), são estimados através do método da Máxima Verossimilhança (MLE), cujos estimadores ($\hat{\beta}$ e $\hat{\lambda}$) são dados pelas Equações (4) e (5) (Fraga; Pinto, 2013):

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{kT^{\hat{\beta}}} \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{q=1}^k \sum_{i=L}^{N=q} \ln \frac{T}{x_1 \cdot q}} \quad (5)$$

Onde 'n' é o número total de falhas observadas até o tempo total de observação 'T' (expresso na unidade de tempo apropriada, como horas ou dias), e t_i são os instantes acumulados de ocorrência da falha desde o início da operação (na mesma unidade de tempo que T).

A função de intensidade de falha estimada, $v(t)$, que descreve a taxa esperada de ocorrência de falhas no instante t com base nos dados observados, pode então ser escrita como:

$$v(t) = \hat{\lambda} \hat{\beta} t^{\hat{\beta}-1} \quad (6)$$

Além da taxa de falhas, um indicador importante para o planejamento de manutenção e operação de sistemas reparáveis é o número esperado de falhas em um intervalo de tempo futuro. O valor esperado (ou médio) de falhas que ocorrerão no intervalo $(t, t+\Delta t]$, dado o

histórico até t , pode ser estimado pela integral da função de intensidade nesse intervalo (Fraga; Pinto, 2013):

$$E[N(t + \Delta t|_t)] = \int_t^{t+\Delta t} \hat{v}(u) du = \hat{\lambda}[(t + \Delta)^{\hat{\beta}} - t^{\hat{\beta}}] \quad (7)$$

$$\hat{R}(t + \Delta t, t) = \exp[-\hat{\lambda}((t + \Delta t)^{\hat{\beta}} - t^{\hat{\beta}})] \quad (8)$$

Estes parâmetros e funções $(\hat{\beta}, \hat{\lambda}, \hat{v}(t), E[N], \hat{R})$ derivados do modelo WPP/PLP permitem caracterizar o comportamento de falhas de sistemas reparáveis, diagnosticar tendências de melhoria ou degradação, prever o desempenho futuro e embasar decisões sobre estratégias de manutenção, operação e substituição de equipamentos.

A interpretação do parâmetro de forma β fornece *insights* valiosos sobre os mecanismos de falha predominantes e o estágio do ciclo de vida em que o componente ou sistema se encontra, relacionando-se diretamente às fases da clássica "Curva da Banheira" (Ribeiro e Fogliatto, 2011):

- Se $\beta < 1$: A taxa de falhas $h(t)$ é decrescente com o tempo. Este comportamento é típico da fase de mortalidade infantil (início da curva da banheira). Falhas nesta fase são geralmente atribuídas a defeitos latentes de fabricação, problemas de montagem, qualidade inadequada de componentes ou erros de instalação, que tendem a se manifestar e ser eliminados no início da operação.
- Se $\beta = 1$: A taxa de falhas $h(t)$ é constante ao longo do tempo. Neste caso, a distribuição de Weibull se reduz à distribuição Exponencial. Isso caracteriza a fase de vida útil ou de falhas aleatórias (base da curva da banheira), onde as falhas ocorrem devido a eventos estocásticos ou estresses externos constantes, e a probabilidade de falha não depende do tempo que o item já operou.
- Se $\beta > 1$: A taxa de falhas $h(t)$ é crescente com o tempo. Este comportamento é associado à fase de desgaste ou envelhecimento (final da curva da banheira). À medida que o tempo de operação aumenta, o item se degrada devido a mecanismos como fadiga, corrosão, desgaste mecânico acumulado, aumentando a probabilidade de falha.

Portanto, estimar o parâmetro β a partir dos dados de tempo de falha é um passo crucial na análise de confiabilidade. O valor de β não apenas indica a tendência da taxa de falhas, mas também orienta a seleção das estratégias de manutenção mais eficazes: ações corretivas e de garantia de qualidade para $\beta < 1$, manutenção baseada em condição ou tempo para $\beta > 1$, ou foco em prevenção de falhas aleatórias para $\beta = 1$ (Moubray, 2000).

A identificação do estágio de mortalidade infantil ($\beta < 1$) é fundamental para orientar estratégias corretivas e preventivas focadas nas causas típicas dessa fase (e.g., Ebeling, 1997). Algumas medidas práticas incluem:

1. **Inspeções Rigorosas:** Realizar uma revisão minuciosa de todos os componentes e sistemas antes da entrada em operação é essencial para identificar defeitos potenciais. Isso pode incluir: Testes de qualidade detalhados dos componentes; Simulações de carga operacional para prever comportamentos adversos; Inspeção visual e funcional de partes críticas.
2. **Melhoria Contínua:** A análise sistemática das falhas iniciais permite identificar padrões e corrigir problemas de projeto ou processos. Isso pode ser implementado por meio de: Uso de ferramentas de análise de causa raiz (RCA) para mapear o motivo das falhas; Revisão de processos de fabricação ou montagem para eliminar inconsistências.
3. **Treinamento e Educação:** Garantir que os operadores e a equipe de manutenção compreendam perfeitamente as especificidades dos equipamentos e como mantê-los em condições ideais. Ações incluem: Capacitações técnicas periódicas para os operadores; Workshops sobre práticas de manutenção preventiva e preditiva.
4. **Qualidade de Fornecedores e Materiais:** Revisitar a qualidade dos componentes utilizados e avaliar a confiabilidade dos fornecedores pode ser decisivo. Isso pode envolver: Auditorias regulares nos fornecedores; Substituição de componentes críticos por versões de maior durabilidade; Análise de materiais para garantir compatibilidade e resistência adequadas.

Ao implementar essas ações durante a fase de mortalidade infantil, espera-se alcançar diversos benefícios, como: Aumento da confiabilidade geral da linha de produção; Redução significativa nos custos associados a paradas não planejadas e manutenção corretiva; Elevação da consistência e qualidade dos produtos finais; e Maior satisfação do cliente, fruto de entregas confiáveis e produtos de alta qualidade (Palady, 1997). Esse foco na resolução das falhas iniciais contribui para a criação de um ambiente de produção mais estável e eficiente,

pavimentando o caminho para melhorias contínuas e uma operação de alta performance a longo prazo.

2.3. Tipos de manutenção

A manutenção desempenha um papel fundamental na gestão eficiente de equipamentos, maquinários e infraestruturas. Quando planejada e executada adequadamente, ela pode prolongar a vida útil dos ativos, aprimorar o desempenho, garantir a segurança e otimizar os custos operacionais. Existem diversos tipos de manutenção, cada um com suas características, vantagens e desvantagens, os quais serão abordados a seguir, conforme suas particularidades e a aplicação em diferentes contextos (Mobley; 2011).

A manutenção preventiva é realizada de forma programada, com o objetivo de evitar falhas e assegurar o funcionamento adequado dos equipamentos. Essa programação pode ser baseada no tempo, com intervenções em intervalos regulares (manutenção sistemática), ou na condição, quando se monitoram variáveis operacionais dos equipamentos para identificar sinais de desgaste (manutenção sob condição ou preditiva em um sentido mais amplo). A principal vantagem da manutenção preventiva é a possibilidade de planejamento, permitindo uma gestão eficiente dos recursos e reduzindo o tempo de inatividade dos equipamentos. No entanto, uma desvantagem, especialmente da manutenção sistemática baseada apenas no tempo, é que ela pode gerar intervenções desnecessárias, como a substituição de peças antes de seu final de vida útil (Kardec; Nascif, 2001).

A manutenção preditiva, muitas vezes vista como uma forma avançada de manutenção sob condição, utiliza tecnologias e ferramentas de diagnóstico (como análise de vibração, termografia, ultrassom, análise de óleo, etc.) para monitorar em tempo real ou periodicamente o estado dos equipamentos e prever falhas iminentes com base na extrapolação da condição atual. A principal vantagem dessa abordagem é a realização de intervenções somente quando necessário, de forma planejada antes da falha funcional, o que otimiza a vida útil dos componentes e reduz custos operacionais e de manutenção. No entanto, ela exige investimentos em tecnologia e capacitação da equipe para coletar, interpretar os dados corretamente e tomar decisões informadas (Pinto; Xavier, 2001).

A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha ou defeito, ou seja, quando o item já não desempenha sua função requerida. Ela pode ser planejada, quando a falha é detectada (por inspeção ou monitoramento) e permite o agendamento da intervenção sem

interromper imediatamente a produção, ou não planejada (emergencial), quando a falha provoca uma interrupção repentina e inesperada. A manutenção corretiva não planejada é geralmente a mais indesejável, pois implica custos mais altos devido à urgência, possíveis danos secundários e maior tempo de inatividade do equipamento. Já a manutenção corretiva planejada permite um gerenciamento mais eficiente dos recursos e ajuda a minimizar o tempo de parada (Kardec; Nascif, 2001).

A manutenção detectiva (ou detecção de falhas) é uma estratégia aplicada especificamente a sistemas ou funções ocultas, como sistemas de proteção, segurança, intertravamento e alarmes, para identificar falhas que não são evidentes durante a operação normal do equipamento principal. Ela é realizada por meio de testes e verificações funcionais periódicas para garantir que esses sistemas de proteção estejam aptos a funcionar corretamente quando forem necessários. Esse tipo de manutenção é essencial para assegurar a segurança e a integridade dos processos e das pessoas, prevenindo falhas cujas consequências poderiam ser graves (Moubray, 2000).

Outra abordagem relevante no campo da manutenção é a Manutenção Produtiva Total (TPM - Total Productive Maintenance), que se configura como uma filosofia de gestão focada na maximização da eficácia dos equipamentos e na eliminação de perdas, com a participação ativa de todos os colaboradores, desde a alta gerência até os operadores. O TPM integra a manutenção à produção, promovendo a manutenção autônoma (realizada pelos operadores), a manutenção planejada, a melhoria focada, o controle inicial (para novos equipamentos), a manutenção da qualidade e atividades em áreas administrativas e de segurança, visando zero acidentes, zero defeitos e zero quebras (Nakajim, 1988).

A escolha do tipo ou da combinação de estratégias de manutenção (preventiva, preditiva, detectiva, corretiva) a ser adotada para cada equipamento ou modo de falha depende de uma análise criteriosa de fatores como: a criticidade do equipamento para o processo, as consequências da falha (operacionais, segurança, ambientais, financeiras), a viabilidade técnica e econômica de cada estratégia, e os recursos disponíveis. Uma gestão eficaz da manutenção requer um planejamento baseado em análises técnicas (como FMEA ou RCM), a seleção da estratégia mais apropriada para gerenciar cada modo de falha e o engajamento de toda a organização na execução e melhoria contínua. Isso contribui para a melhoria da eficiência operacional, garante a segurança dos processos e otimiza os custos do ciclo de vida dos ativos, resultando em uma operação mais confiável e econômica (Kardec; Nascif, 2001).

2.4. Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA): Abordagem e Importância

A Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA) é uma metodologia sistemática e proativa, amplamente utilizada em diversos setores industriais e campos, que visa identificar, avaliar e mitigar potenciais falhas em processos, produtos e sistemas, antes que estas ocorram (Aiag, 2008). A FMEA é considerada uma ferramenta crucial para a gestão da qualidade, aprimoramento de produtos, aumento da segurança, redução de custos e elevação da satisfação do cliente (Stamatis, 2003). Ao aplicar a FMEA, as organizações conseguem antecipar falhas e implementar soluções preventivas para reduzir riscos, aumentar a confiabilidade e melhorar a eficiência geral (Palady, 1997).

A FMEA, como técnica, avalia a confiabilidade e a robustez de um processo ou produto, identificando os modos de falha potenciais (como um item pode falhar em cumprir sua função), determinando suas causas raízes e avaliando os efeitos dessas falhas no sistema ou no cliente final (Aiag, 2008). O objetivo central é fornecer uma compreensão clara dos riscos envolvidos, geralmente quantificados por índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), e auxiliar as equipes multidisciplinares a tomar decisões informadas sobre onde concentrar esforços de melhoria para mitigar as falhas prioritárias (Stamatis, 2003). A metodologia da FMEA envolve uma abordagem passo a passo, onde cada componente ou etapa do processo é analisada para detectar potenciais problemas e suas consequências (Dyal, 1995).

Originária da indústria aeroespacial e militar (Nasa, 2000), a FMEA foi amplamente disseminada e adaptada por outros setores, notadamente o automotivo através dos manuais da AIAG, mas também eletrônico, farmacêutico, de saúde, energia, entre outros, devido aos seus comprovados benefícios no aumento da confiabilidade e segurança (Stamatis, 2003). A FMEA pode ser aplicada em várias fases do ciclo de vida, desde a concepção e projeto (DFMEA) até a fabricação, montagem (PFMEA) e operação contínua do produto ou processo.

Existem diferentes tipos de FMEA, focados em distintos aspectos do ciclo de vida. A FMEA de Projeto (DFMEA - Design FMEA) concentra-se nas falhas potenciais associadas ao projeto do produto, buscando identificar problemas de concepção que poderiam comprometer a funcionalidade, desempenho, durabilidade ou segurança (Stamatis, 2003). Já a FMEA de Processo (PFMEA - Process FMEA) avalia os modos de falha que podem ocorrer durante os processos de fabricação, montagem ou logística, visando garantir que estes sejam robustos, capazes e seguros para entregar um produto conforme as especificações (Aiag, 2019). Adicionalmente, a FMEA de Sistema (SFMEA - System FMEA) aborda falhas em sistemas

complexos e suas interações, analisando como falhas em subsistemas ou interfaces podem afetar o desempenho geral do sistema (Stamatis, 2003).

A utilização da FMEA proporciona diversos benefícios. Além de identificar sistematicamente as falhas potenciais, a metodologia auxilia na priorização das ações de mitigação através do cálculo do Número de Prioridade de Risco ($RPN = S \times O \times D$), permitindo que os recursos sejam alocados de maneira mais eficiente nos problemas de maior impacto (Palady, 1997). A FMEA é reconhecida como uma ferramenta eficaz para aprimorar a qualidade e a segurança em diversos setores (Ghobkhloo; FATHI, 2019). Sua aplicação requer, tipicamente, uma equipe multidisciplinar e o uso de uma matriz ou formulário padrão para documentar a análise e as ações (Aiag, 2008). A FMEA também pode ser fundamental na otimização de estratégias de manutenção, como a Manutenção Baseada em Condição (CBM), ao identificar modos de falha críticos em sistemas complexos, contribuindo para reduzir custos com manutenção e aumentar a confiabilidade operacional.

A aplicação prática da FMEA geralmente segue um processo estruturado, cujas etapas principais são detalhadas a seguir, com base em referências como o manual da AIAG e Stamatis (Stamatis, 2003):

1. Planejamento e Preparação:

- Seleção da Equipe: Formar uma equipe multidisciplinar com conhecimento sobre o produto/processo (incluindo design, engenharia, manutenção, qualidade, produção, etc.).
- Definição do Escopo: Delimitar claramente o sistema, subsistema, componente ou processo que será analisado.
- Coleta de Informações: Reunir documentos relevantes como desenhos, especificações, fluxogramas de processo, histórico de falhas, reclamações de clientes, FMEAs anteriores, etc.

2. Análise da Estrutura (Opcional, enfatizado no AIAG & VDA FMEA):

Visualizar a estrutura do sistema ou processo, identificando elementos e interfaces.

3. Análise da Função:

Descrever as funções pretendidas para cada item dentro do escopo definido, sob condições operacionais esperadas.

4. Análise da Falha

Modo de Falha Potencial: Para cada função, identificar como o item pode falhar em cumpri-la.

Efeito Potencial da Falha: Descrever as consequências de cada modo de falha (no próprio item, no sistema, no processo seguinte, no cliente final, na segurança ou no ambiente).

Causa Potencial da Falha: Identificar as causas raízes ou mecanismos que podem levar à ocorrência de cada modo de falha.

5. Análise de Risco (Avaliação):

Controles Atuais (Prevenção e Detecção): Listar os métodos ou controles já existentes que previnem a ocorrência da causa ou detectam a causa/modo de falha. Realizar a avaliação dos fatores de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D) relacionados a falha a ser analisada e a partir destes valores definidos calcular o RPN (Número de Prioridade de Risco). O RPN é dado pela multiplicação dos fatores S, O e D, sendo utilizado como um dos critérios para priorizar ações (frequentemente combinado com análise de Severidade isolada ou $S \times O$). A seguir estão descritos os valores atribuídos a cada um dos fatores.

Severidade (S): Avalia o impacto potencial da falha no cliente (interno ou externo) ou nos requisitos de segurança/legais, em uma escala de 1 (sem efeito) a 10 (falha em atender requisitos de segurança/legais), como detalha a Figura 2.

Figura 2: Ranking de severidade

Ranking de SEVERIDADE			
Pontuação	Descrição	Definição da Severidade do Efeito	
		(Efeito no Cliente)	(Efeito na Manufatura ou na montagem)
		Este ranqueamento resulta quando uma falha em potencia afeta o cliente e/ou manufatura/montagem gerando um defeito. O cliente final também pode ser considerado em primeiro lugar na análise , e se ambos forem afetados utilize a maior das duas severidades.	
10	Falha em atender requisitos de segurança e/ou Requisitos Legais	Modo de falha potencial afeta operação segura do veículo e / ou envolve não-conformidade com a regulamentação do governo, sem aviso prévio.	Pode pôr em perigo operador (máquina ou montagem) sem aviso
9		Modo de falha potencial afeta operação segura do veículo e / ou envolve não-conformidade com a regulamentação do governo com aviso.	Pode pôr em perigo operador (máquina ou montagem) com aviso
8	Perda ou degradação da função primária.	A perda da função primária (veículo inoperável, não afeta operação segura do veículo)	100% do produto pode ter de ser sucata.Linha parada ou suspensão das entregas.
7		Degradação da função primária (veículo operável, mas pelo nível reduzido de desempenho).	Uma parte da produção vira scrap. Desvio de processo primário com a redução velocidade linha de produção e/ou uso de mão de obra adicional
6	Perda ou degradação de função secundária	A perda da função secundária (veículo operável, mas as funções de conforto / conveniência inoperáveis).	100% da produção precisa ser retrabalhada offline para tornar-se aceitável.
5		Degradação da função secundária (veículo operável, mas as funções de conforto / conveniência no reduzido nível de desempenho).	Uma parte da produção precisa ser retrabalhada para tornar-se aceitável.
4	Aborrecimentos que irão Importunar o cliente / manufatura.	Aspecto ou ruído audível, veículo operável, item de não conformidade e notado pela maioria dos clientes (> 75%).	100% da produção corrente precisa ser retrabalhada em um processo produtivo subsequente antes de ser processado.
3		Aspecto ou ruído audível, veículo operável, inciso não se conforma e notado por muitos clientes (50%).	uma parte da produção corrente precisa ser retrabalhada em um processo produtivo subsequente antes de ser processado.
2		Aspecto ou ruído audível, veículo operável, inciso não se conforma e notado por discriminar clientes (<25%)	Singela inconveniência para operador, processo ou operação.
1	Sem efeito	Defeito não discernível	Defeito não discernível

Fonte: Chrysler LLC (2008)

- Ocorrência (O): Estima a frequência ou probabilidade da causa da falha ocorrer, baseada no histórico e conhecimento da equipe, em uma escala de 1 (muito baixa/eliminada) a 10 (muito alta/inevitável) (Murakami et al., 2015). A escala de ocorrência pode ser vista na Figura 3.

Figura 3: Escala de ocorrência.

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

Fonte: Chrysler LLC (2008)

- Detecção (D): Avalia a probabilidade de o controle atual (se existente) detectar a causa ou o modo de falha antes que ele gere o efeito final, em uma escala de 1 (detecção quase certa/prevenção ao erro) a 10 (sem controle/detecção quase impossível), como descrito na Figura 4 (Murakami et al., 2015).

Figura 4: Escala Detecção

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

Fonte: Chrysler LLC (2008)

6. Otimização (Plano de Ação) - O plano de ação deve ser composto pelas seguintes etapas:

Definir Ações Recomendadas: Para os modos de falha prioritários (alto RPN, alta Severidade, etc.), definir ações para reduzir a Ocorrência (preferencialmente) ou melhorar a Detecção.

Atribuir Responsabilidades e Prazos: Designar responsáveis e datas limite para cada ação.

Implementar e Documentar Ações: Executar as ações planejadas e registrar o que foi feito.

Reavaliar o Risco: Após a implementação, recalcular S, O, D e RPN para verificar a eficácia das ações.

7. Documentação dos Resultados:

Registrar todo o processo FMEA, as análises, as ações tomadas e os resultados da reavaliação. O FMEA é um documento dinâmico, sujeito a revisões contínuas sempre que ocorrerem mudanças ou novas informações surgirem.

3. METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para a aplicação prática na solução de um problema específico caracterizado pela redução de falhas em equipamentos de uma linha de produção industrial (GIL, 2017).

Quanto à abordagem do problema, a pesquisa classifica-se como quali-quantitativa, pois combina a coleta e análise de dados quantitativos (como frequência de quebras, tempos de parada, MTBF, cálculos de confiabilidade) com métodos qualitativos (como a descrição do processo, análise de causa raiz e aplicação da ferramenta FMEA), buscando uma compreensão mais aprofundada do fenômeno (CRESWELL, 2010).

Em relação aos seus objetivos, a pesquisa é definida como descritiva, uma vez que visa descrever as características de um fenômeno (as falhas do componente), analisar o processo e avaliar os resultados da intervenção proposta (MARCONI; LAKATOS, 2010). Do ponto de vista dos procedimentos técnicos para coleta e análise de dados, utiliza-se o estudo de caso, que permite investigar um fenômeno contemporâneo (a questão da confiabilidade do componente) em profundidade dentro do seu contexto real (a linha de produção na indústria tabagista) (YIN, 2001).

Na execução do estudo, a primeira etapa realizada foi a escolha da linha de produção e do componente para avaliação, fundamentada na análise do histórico de paradas não planejadas do primeiro semestre de 2024. Em seguida, procedeu-se ao cálculo da confiabilidade inicial do componente selecionado utilizando as equações (4) e (5). Com base nesse diagnóstico, foi definido e implementado um plano de ação estruturado na ferramenta FMEA. Por fim, avaliou-se a efetividade do plano de ação implementado, comparando os indicadores de desempenho antes e depois das melhorias.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização da empresa

A empresa onde este estudo de caso foi realizado é uma organização de grande porte e longa trajetória, fundada no início do século XX, que ocupa uma posição de liderança no mercado brasileiro de produtos de tabaco. Possui uma ampla rede de distribuição, com produtos presentes em aproximadamente cinco mil municípios e cerca de 250 mil pontos de venda, suportada por mais de quatro mil colaboradores diretos no país, sendo reconhecida por suas práticas de gestão de pessoas.

A companhia integra um dos maiores grupos multinacionais do setor, com presença e colaboradores em dezenas de países globalmente. A unidade brasileira atua como um centro estratégico para as operações do grupo na América Latina. Alinhada à estratégia global do grupo, a empresa passa por um processo de transformação com foco na redução dos impactos de seu negócio, incluindo o desenvolvimento e oferta de produtos de risco potencialmente reduzido para consumidores adultos.

A inovação é um pilar importante, evidenciado pelo investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento, incluindo um significativo centro de pesquisa e inovação localizado no Rio Grande do Sul. Historicamente, a empresa mantém forte vínculo com a agricultura familiar, tendo sido pioneira no desenvolvimento de um sistema integrado de produção agrícola, modelo que busca modernização contínua para o desenvolvimento da cadeia produtiva e a redução do impacto ambiental do cultivo.

Práticas de sustentabilidade são parte da estratégia corporativa, com suas unidades produtivas no Brasil utilizando fontes de energia renováveis e contando com sistemas para tratamento e reutilização de resíduos líquidos. A atuação social é realizada por meio de um instituto próprio focado em educação empreendedora.

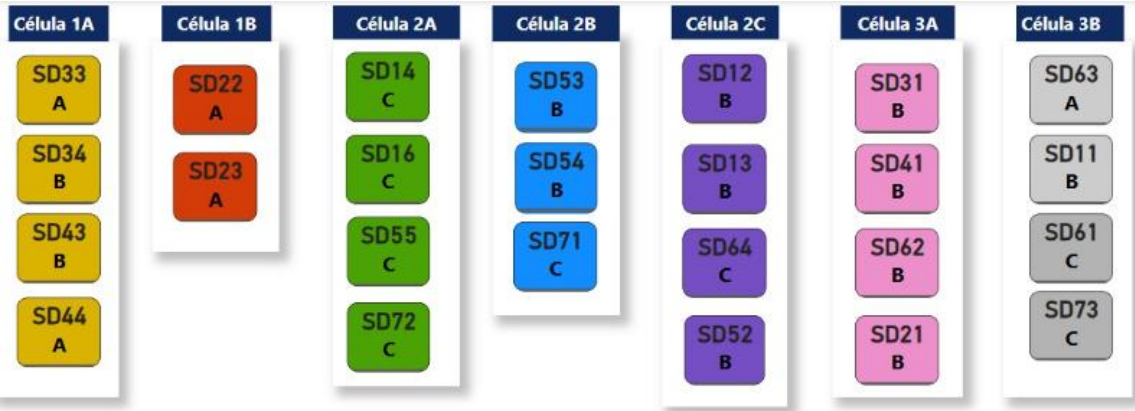
A unidade fabril específica onde a pesquisa em questão foi conduzida, localizada em Uberlândia-MG, conta com aproximadamente 1.500 funcionários.

4.2. Mapeamento da realidade empresarial

O presente estudo foi conduzido no Setor de Processamento Secundário (SMD) da empresa do ramo tabagista analisada. Este setor organiza-se em múltiplas linhas de produção

(designadas 1A, 1B, 2A, 2B, 2C, 3A e 3B), sendo cada linha composta por módulos produtivos. O mapeamento representado na Figura 5 mostra esta composição; na figura, a sigla 'SDXX' identifica cada módulo de produção, e as letras A, B e C indicam um nível de prioridade ou ranking atribuído a cada um. Cada módulo contém um conjunto de máquinas responsável pelo fluxo completo de fabricação naquela etapa: recebimento do tabaco, formação do cigarro, encarteiramento, empacotamento e envio para a logística, operando em um regime de alta capacidade produtiva, com cada linha sendo responsável por aproximadamente 30 milhões de cigarros por dia.

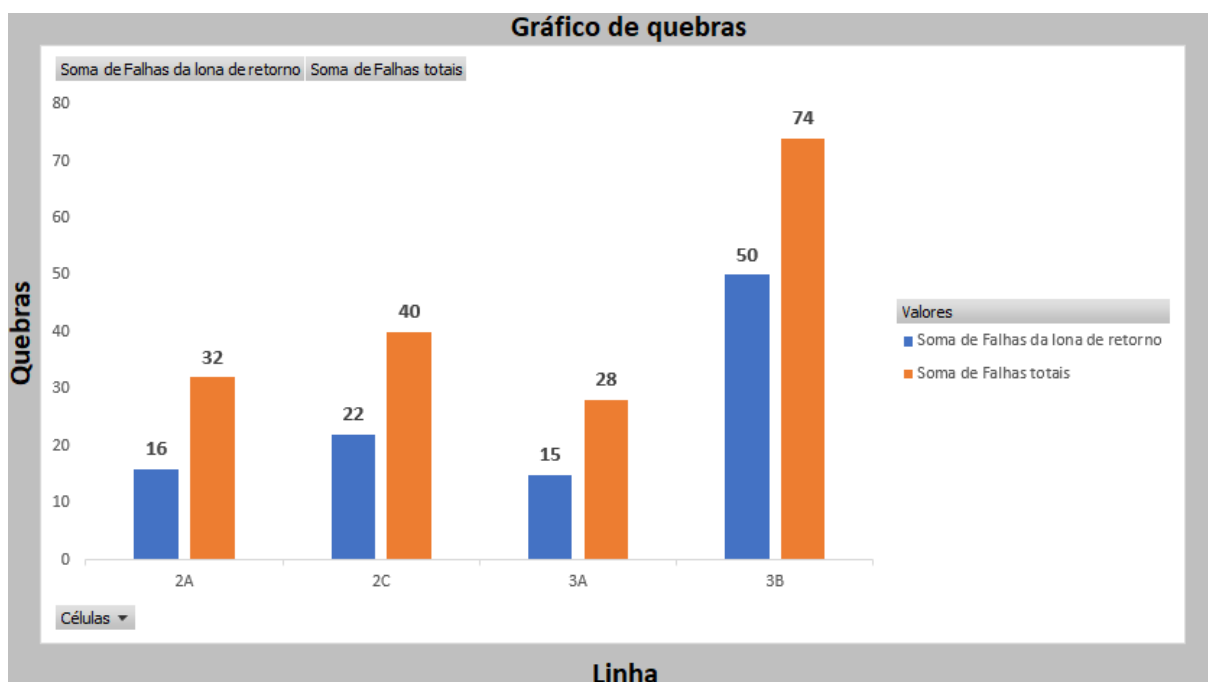
Figura 5: Composição dos módulos



Fonte: Autores (2025)

Dentro deste contexto produtivo, as linhas de produção denominadas 2C e 3B foram identificadas como prioritárias para análise de confiabilidade, conforme evidenciado na Figura 6 (Quebras por linha de produção), que apresenta o número de quebras observado no primeiro semestre de 2024. Especificamente, a linha 3B foi selecionada para este estudo de caso, pois os registros de manutenção e relatórios operacionais indicaram a maior frequência de falhas entre as linhas avaliadas, totalizando 50 falhas no componente no período analisado, comparativamente a 22 quebras na linha 2C, 16 na linha 2A e 15 na linha 3A (Figura 6). Essa maior incidência de falhas na linha 3B resultava em um tempo de inatividade considerável e, conseqüentemente, em perdas significativas de produção. Essa identificação quantitativa fundamenta os próximos passos na busca por um desempenho sustentável e de alta eficiência.

Figura 6: Quebras por linha de produção que possuem o componente “lona de retorno de tabaco”



Fonte: Autores (2025)

O foco nas máquinas com maior recorrência de quebras é, sem dúvida, uma abordagem estratégica e pragmática. Além de lidar diretamente com os custos elevados de reparos e a perda de eficiência, essa decisão possibilita uma análise aprofundada das causas raízes, que podem abranger desde problemas no maquinário até deficiências nos processos operacionais ou no treinamento da equipe. Resolver essas questões não só melhora a performance do equipamento específico, mas também proporciona insights valiosos que podem ser aplicados de forma mais ampla.

A melhoria direcionada à máquina mais crítica tem o potencial de aumentar proporcionalmente a produtividade geral e a confiabilidade de toda a linha de produção. Isso porque a eliminação das falhas recorrentes promove uma maior estabilidade nos processos, reduzindo o tempo de inatividade e otimizando o fluxo de trabalho. Além disso, ao focar em um equipamento problemático, cria-se um exemplo prático de excelência operacional que pode ser replicado em outras áreas, elevando o padrão da planta como um todo.

Ao adotar uma postura preventiva, essa decisão estratégica transcende a mera correção de falhas, passando a integrar ações de aprimoramento contínuo. Os custos ocultos das ineficiências, como desperdício de recursos, impactos no moral da equipe e perda de confiança

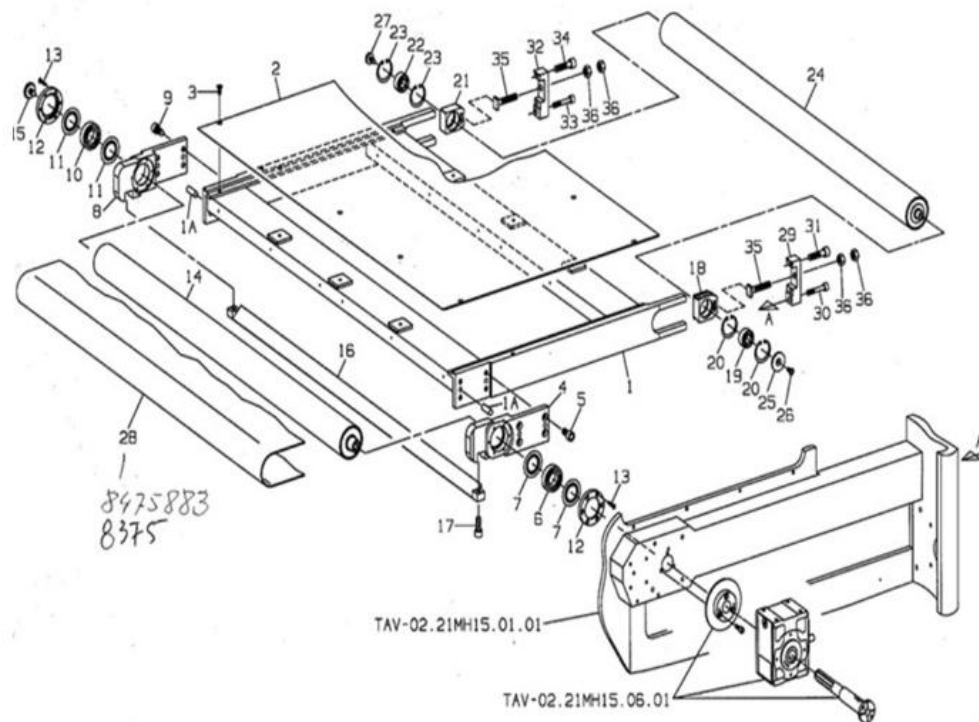
dos clientes devido a atrasos, são minimizados. Além disso, a máquina selecionada, que se destaca pelo número de quebras e seu impacto no fluxo de trabalho das linhas subsequentes, torna-se o alvo ideal para intervenções, gerando benefícios exponenciais na eficiência operacional e na qualidade do produto final.

Essa abordagem também abre espaço para inovações, como a implementação de tecnologias de manutenção preditiva e a aplicação de métodos de análise de causa raiz. Tais avanços podem ser posteriormente estendidos a outras áreas da planta, transformando a resolução de problemas em um processo de aprendizado organizacional. Esse aprendizado fomenta uma cultura de resiliência, inovação e melhoria contínua.

Portanto, a escolha de focar no componente e na máquina com maior índice de quebras não é apenas uma solução imediata, mas também um catalisador para transformações de longo prazo. Essa estratégia converte desafios operacionais em oportunidades de crescimento, fortalecendo a cadeia de valor da empresa como um todo.

Após a identificação da linha 3B como a mais crítica em termos de número total de quebras, foi realizada uma análise detalhada das ocorrências de falha dentro desta linha específica, referentes ao primeiro semestre de 2024, para selecionar o componente foco deste estudo. Verificou-se que, do total de 74 falhas registradas para a linha 3B no período, 50 falhas estavam diretamente associadas ao componente denominado "Lona de retorno do tabaco", (Figura 7). Isso representa aproximadamente 67,6 % de todas as falhas da linha, destacando este componente como o principal ponto de vulnerabilidade. Além da alta frequência, essas 50 quebras da lona foram responsáveis pela maior parte do tempo de parada da linha, correspondendo a uma perda de produção estimada em 17,15 milhões de unidades do produto final no semestre, evidenciando seu impacto significativo.

Figura 7: Componente mecânico de rolagem, “Lona de retorno do tabaco”.



Fonte: Autores (2025)

Funcionalmente, a "Lona de retorno do tabaco" desempenha um papel crucial no processo produtivo, pois ela é responsável por fazer o retorno do excesso de tabaco cortado nos discos de corte e transportá-lo para a etapa de formação do bastão de tabaco, que é essencial para a constituição do produto final. Dada a sua função vital na alimentação contínua de matéria-prima, qualquer parada neste componente leva à interrupção completa da linha de produção. Portanto, devido à sua altíssima frequência de falhas (respondendo por quase 68 % das falhas da linha 3B) e ao severo impacto produtivo de suas paradas, a "Lona de retorno do tabaco" foi selecionada como o objeto de estudo para a análise aprofundada de confiabilidade e aplicação da metodologia FMEA neste trabalho.

4.3. Análise da confiabilidade da lona de retorno do tabaco

Para quantificar o desempenho inicial do componente "Lona de retorno do tabaco" na linha 3B, foco deste estudo, foi realizada uma análise de confiabilidade com base nos dados históricos de falhas. Os dados referentes aos tempos de operação entre falhas (ou datas/horas

de início e término de cada quebra) foram coletados para a linha 3B durante o período de 01 de janeiro de 2024 a 30 de junho de 2024 (primeiro semestre). Dados das demais linhas (2A, 2C, 3C) foram coletados no mesmo período para fins comparativos na seleção da linha mais crítica.

Considerando que o componente opera em um sistema reparável, optou-se pela modelagem via Processo de Weibull-Poisson (WPP), também conhecido como Power Law Process (PLP), conforme detalhado na seção 2.2 distribuição de Weibull e o Parâmetro de Forma (β).

$$\beta \approx 0,89 \text{ (calculado conforme Equação 5)}$$

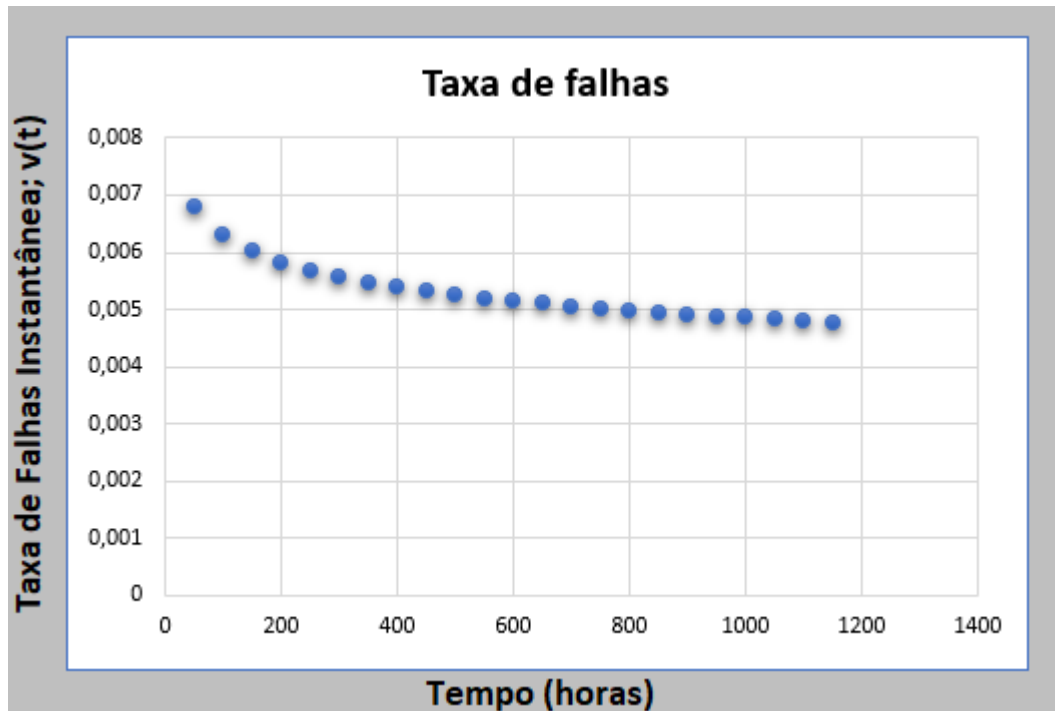
$$\lambda \approx 0,0119 \text{ (calculado conforme Equação 4)}$$

O parâmetro de forma $\beta \approx 0,89$, por ser menor que 1, indica que a taxa de intensidade de falhas do componente foi decrescente ao longo do período de análise. Este comportamento é característico da fase de mortalidade infantil da curva da banheira. Isso sugere que as falhas observadas estavam predominantemente relacionadas a causas que tendem a diminuir com o tempo de uso inicial, como defeitos de fabricação, problemas de instalação ou ajustes inadequados.

Com os parâmetros estimados, a função de intensidade de falha $v(t)$ (ou $\lambda(t)$), que descreve a taxa instantânea de ocorrência de falhas no tempo t , foi determinada pela Equação (6) (Fraga; Pinto, 2013).

A tendência de taxa de falhas decrescentes, também indicadas pelo parâmetro de forma β , foi visualmente confirmada pelo gráfico da Taxa de Falhas apresentado na Figura 8. Observa-se que a taxa de falhas instantâneas (eixo Y) inicia em um patamar mais elevado nas primeiras horas de operação e reduz gradativamente ao longo do tempo (eixo X, em horas), indicando que as falhas se tornavam menos frequentes à medida que o tempo passava dentro do período analisado.

Figura 8: Gráfico de probabilidade de falha x tempo.

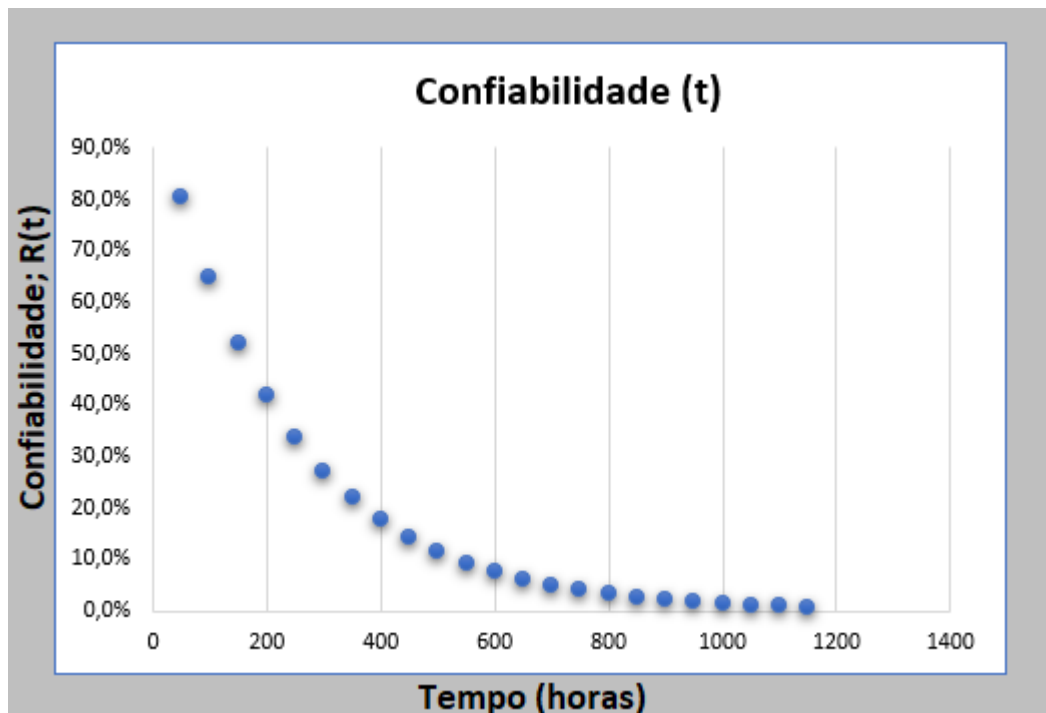


Fonte: Autores (2025)

A confiabilidade do sistema reparável para uma missão futura de duração Δt , iniciando no tempo t , $R(t + \Delta t | t)$, foi calculada utilizando a Equação 8: (Fraga; Pinto, 2013).,

Adicionalmente, foi gerado um gráfico da função de confiabilidade (Figura 9) que ilustra a probabilidade de o componente operar sem falhas por um determinado tempo ' t '. Nota-se uma queda acentuada na confiabilidade nas primeiras centenas de horas, refletindo a alta incidência de falhas iniciais (mortalidade infantil). O cálculo da confiabilidade para uma missão de 11 dias (equivalente a 264 horas), pois este corresponde ao ciclo entre paradas estratégicas programadas da linha, durante as quais há oportunidade para realizar intervenções planejadas no equipamento iniciando após o período de observação (t =final do 1º semestre), resultou em $\hat{R}(264h) \approx 31,8\%$. Este valor é considerado muito baixo para um componente crítico, indicando uma probabilidade de apenas cerca de 32 % de operar por 11 dias consecutivos sem apresentar falhas, mantidas as condições do primeiro semestre.

Figura 9: Gráfico de confiabilidade x tempo.



Fonte: Autores (2025)

Os principais resultados obtidos com esta análise inicial, utilizando a Equação (7) considerando a condição do componente ao final do período de observação (t = final do 1º semestre) e projetando para um intervalo futuro de 11 dias, foram:

Confiabilidade estimada ($\hat{R}$): 31,8 % (calculado conforme Equação 8)

Número esperado de falhas ($E[N(\Delta t)]$): $\approx 4,57$ falhas (calculado conforme Equação 7)

Parâmetro de forma (β): 0,89 (calculado conforme Equação 5)

Complementarmente, o número esperado de falhas para o mesmo período futuro de 11 dias foi estimado em aproximadamente 4,58 falhas. Isso significa que, sob as condições analisadas, esperava-se que o componente falhasse, em média, quase 5 vezes dentro de um período de apenas 11 dias de operação contínua.

Em síntese, o diagnóstico da análise de confiabilidade revelou um componente operando em regime de mortalidade infantil ($\beta < 1$), com baixíssima confiabilidade futura ($\approx 32\%$ para 11 dias) e uma expectativa de múltiplas falhas em um curto intervalo de tempo (≈ 4 -5 falhas em 11 dias). Estes resultados quantitativos não apenas confirmaram a percepção operacional de que a "Lona de retorno do tabaco" era um ponto crítico, mas também forneceram

uma base sólida para justificar a necessidade urgente de uma análise aprofundada de suas causas de falha, direcionando para a aplicação da metodologia FMEA detalhada na seção seguinte.

Com base no diagnóstico da análise de confiabilidade inicial, que indicou que o componente "Lona de retorno do tabaco" operava em fase de mortalidade infantil com baixa confiabilidade, procedeu-se à aplicação da metodologia FMEA para identificar sistematicamente os modos de falha potenciais, suas causas e efeitos, e priorizar ações de melhoria.

4.4. Análise FMEA do Componente "Lona de Retorno do Tabaco"

Para a condução da análise, foi formada uma equipe multidisciplinar composta por técnicos e mecânicos de manutenção da célula 3B (onde o componente crítico operava), engenheiros de confiabilidade e de projetos (design de máquina) da fábrica, além de especialistas do fabricante do equipamento, garantindo diversidade de perspectivas. A preparação envolveu o levantamento e estudo de manuais técnicos do equipamento, análise do histórico de modificações já realizadas no conjunto da lona de retorno e um estudo prévio da metodologia FMEA para nivelar o conhecimento da equipe sobre a ferramenta.

A equipe iniciou a análise detalhando os subcomponentes principais do conjunto da lona de retorno: rolamentos dos rolos de retorno, motoredutor, a própria lona e os raspadores. Para cada um, foram levantados, através de *brainstorming* e análise de dados, os potenciais modos de falha, seus efeitos no processo e suas causas raízes. Em seguida, foram definidas a pontuação S, O, D e calculado o RPN para cada subcomponente da análise. A Figura 9 apresenta a planilha FMEA resultante deste trabalho.

Para avaliação e priorização dos riscos foram realizadas utilizando os índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), resultando no cálculo do Número de Prioridade de Risco ($RPN = S \times O \times D$). Os critérios para pontuação de S, O e D foram definidos com base nas tabelas de referência apresentadas nas figuras (6) (7) e (8) por Murakami et al. (2015)

- **Vazamento no Motoredutor (RPN = 1000)**

A análise identificou o 'Vazamento' no 'Motoredutor' como o ponto de maior risco (RPN = 1000). A causa principal, 'Retentor danificado / Desgaste da base do retentor', levava a efeitos críticos como 'Falha de lubrificação' e 'Quebra das engrenagens', culminando em parada total da produção e risco de contaminação do produto. Essa gravidade (impacto na produção, segurança do produto e atendimento a requisitos legais) resultou em Severidade máxima (S=10). A equipe avaliou a Ocorrência como extremamente alta (O=10), indicando que a falha era quase inevitável com os componentes e processos vigentes na época. A Detecção prévia também foi considerada praticamente impossível (D=10), dado o difícil acesso interno para inspeção do retentor ou da base antes da falha. Face a este risco crítico, as ações prioritárias recomendadas envolveram a revisão do componente ('Change Management' para avaliar alteração do tipo de retentor, garantir a vedação das tampas) e do processo de manutenção ('Medição da base do retentor' e 'recuperação com banho de cromo').

- **Travamento da Lona devido ao Fim de Vida Útil dos Raspadores (RPN = 100)**

Outro modo de falha priorizado devido à alta severidade foi o 'Travamento da lona', associado ao fim da vida útil dos 'Raspadores'. O efeito principal, o comprometimento do enchimento do cigarro (afetando requisitos legais do produto), justificou a Severidade máxima (S=10). A Ocorrência (O=10) foi avaliada como muito frequente, dada a falta de inspeção sistemática e a condição já degradada observada nos raspadores. A Detecção (D=1), por sua vez, foi classificada como 'quase certa' pois o efeito era imediato e visual, sendo de fácil inspeção durante as trocas de turno. A ação corretiva direta e essencial proposta foi 'Garantir plano de manutenção para inspeção e troca dos raspadores'.

- **Travamento dos Rolamentos por Contaminação (RPN = 100)**

O 'Travamento' nos 'Rolamentos dos rolos de retorno' foi igualmente identificado como um risco significativo (RPN=100), tendo como causa a 'Contaminação por pó de tabaco'. O efeito de 'Parada da esteira' impactava diretamente o enchimento do cigarro (requisitos legais), resultando em Severidade máxima (S=10). A Detecção (D=10) da contaminação antes do travamento foi considerada 'quase impossível' devido ao encapsulamento do rolamento e ausência de monitoramento, seja ele preventivo ou preditivo. A Ocorrência (O=1), no entanto, foi avaliada como muito baixa. A ação proposta focou na fonte da contaminação: 'Inspeção dos raspadores semanalmente (CIL)', visando reduzir o acúmulo de pó que poderia atingir os rolamentos.

A aplicação da metodologia FMEA, conforme detalhado nos exemplos críticos acima e de forma completa na Figura 10, permitiu à equipe identificar e priorizar os riscos associados às falhas do componente 'Lona de retorno do tabaco'. É importante ressaltar que, embora a descrição detalhada feita neste tópico tenha focado nos itens de maior impacto (RPN mais elevado ou alta severidade), o plano de ação desenvolvido contempla contramedidas para todos os modos de falha relevantes identificados. A implementação dessas ações, contudo, segue a priorização indicada pelo RPN e pela criticidade (Severidade), com foco inicial nos riscos mais elevados (como o vazamento do motoredutor e as falhas ligadas aos raspadores e rolamentos), visando obter os maiores ganhos de confiabilidade, segurança e eficiência operacional de forma mais rápida e direcionada. A efetividade dessas ações será avaliada posteriormente, conforme apresentado na seção de resultados pós-implementação.

Figura 10: FMEA Construído.

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade											
FMEA - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E EFEITOS										FMEA N° 16	
FMEA: PROJETO	Redução quebras lona de retorno de tabaco		ÁREAS ENVOLVIDAS: Subconjunto, produção.				APROVAÇÃO DO CLIENTE:			ETAPA:	PÁGINA:
PROCESSO	Alimentação de tabaco		PROJETO: Lona de retorno de tabaco				DATA DO FMEA: 13/06/2024			Observações	
RESPONSÁVEL PROJETO	Arthur Ramalho/Giovanni		EQUIPE: Luiz, Rogerio, Ariel,Roberto				DATA 1ª EMISSÃO:13/06/2024				
							DATA REVISÃO: 08/10/2024				
PONTO DA FALHA			ANÁLISE DA FALHA			AVALIAÇÃO DE RISCO			Ações/Contamedidas		
EQUIPAMENTO	FUNÇÃO DO EQUIPAMENTO	COMPONENTE	MODOS DE FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA	OCORRÊNCIA	SEVERIDADE	DETECÇÃO			RPN
Lona de retorno de tabaco	Retorno do excesso de tabaco cortado nos discos ecretores para a esteira ascedente do VE	Rolamentos dos rolos de retorno	Travamento	Parada da esteira	Montagem incorreta	5	10	1	50	Treinamento e instrução de trabalho para montagem do rolamento na recuperação em subconjuntos	
					Contaminação por pó de tabaco	10	10	1	100	Inspeção dos raspadores semanalmente (CIL)	
		Motoredutor	Travamento	Parada da esteira	Sobrecarga na esteira	5	5	1	25	Plano para troca do lubrificante	
					Falta de lubrificante	10	10	1	100	Change Management para alteração do tipo de retentor utilizado / Garantir vedação das tampas	
					Desgaste nos raspadores	10	10	1	100	Inspeção dos raspadores semanalmente (CIL estrategico)	
			Vazamento	Falta de lubrificação do motoredutor gerando travamentos, quebra das engrenagens	Retentor danificado / Desgaste da base do retentor	10	10	10	1000	Change Management para alteração do tipo de retentor utilizado / Medição da base e recuperação com banho de cromo	
			Temperatura excessiva	Degradação do lubrificante	Sobrecarga na esteira	5	5	1	25	Plano para troca do lubrificante	
				Desgaste prematuro dos componente do motoredutor	Nível do lubrificante incorreto	1	10	1	10	Instrução de trabalho para preenchimento correto do nível de óleo	
					Viscosidade do lubrificante	1	10	1	10	Garantir lubrificante correto/Inserir motor na preditiva	
		Lona	Desalinhamento	Desgaste das laterais da lona	Ajuste incorreto no posicionamento	1	10	1	10	Treinamento e instrução de trabalho para ajuste correto do alinhamento da lona	
					Falta de manutenção (Inspeção)	1	10	1	10	Criar MP&S para inspeção do alinhamento da lona	
		Raspadores	Acumulo de sujeira entre a lona e a base de transporte	Travamento da lona	Fim da vida útil dos raspadores devido ao atrito existente entre o raspador e a lona	10	10	1	100	Garantir plano de manutenção para inspeção e troca dos raspadores	

Fonte: Autores (2025)

4.5. Avaliação dos Resultados Pós-Implementação das Ações do FMEA

Após a implementação das ações prioritárias definidas na análise FMEA durante o segundo semestre de 2024 (período de 01 de julho a 31 de dezembro de 2024), foi realizado um novo ciclo de coleta e análise de dados para avaliar a efetividade das melhorias no componente "Lona de retorno do tabaco" na linha 3B. A mesma metodologia de coleta de dados do primeiro semestre foi empregada.

Observou-se uma redução significativa no número de falhas (quebras) do componente. Enquanto no primeiro semestre foram registradas 50 quebras, no segundo semestre ocorreram apenas 21 quebras. Isso representa uma redução de aproximadamente 58% na frequência de falhas.

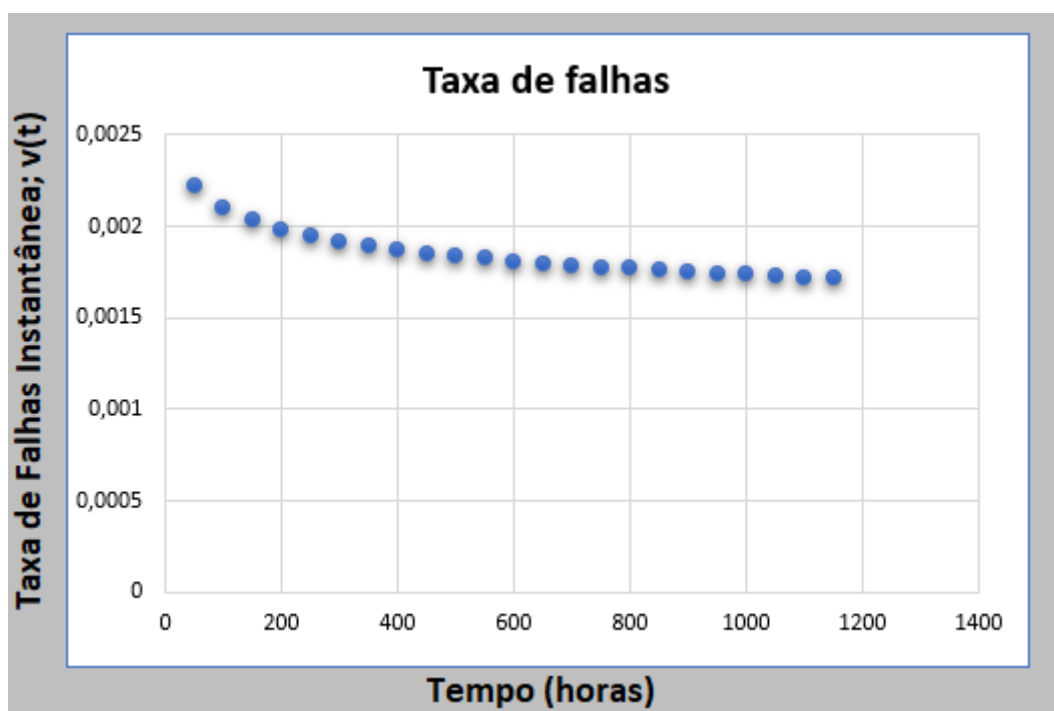
O impacto na produção também foi positivo e substancial. A perda de produção associada ao tempo de parada das 50 quebras no primeiro semestre havia sido estimada em 17,15 milhões de cigarros. Com a redução para 21 quebras no segundo semestre, a perda de produção equivalente foi de apenas 1,95 milhões de cigarros, resultando em um ganho relativo (redução de perdas) de 15,2 milhões de cigarros produzidos.

Para quantificar a melhoria na confiabilidade, a análise do Processo de Weibull-Poisson (WPP) foi refeita utilizando os dados de falha do segundo semestre de 2024, novamente com o auxílio do Microsoft Excel. Os novos parâmetros do modelo WPP estimados foram:

- $\beta \approx 0,92$
- $\lambda \approx 0,00335$

O novo parâmetro de forma $\beta \approx 0,92$, embora ainda menor que 1, mostra um leve aumento em relação ao valor inicial ($\beta \approx 0,89$ do primeiro semestre). Isso sugere que o componente, embora ainda tecnicamente em fase de mortalidade infantil (taxa de falhas decrescente), apresentou um comportamento mais estável após as ações de melhoria, com a taxa de falhas tornando-se menos acentuadamente decrescente e aproximando-se de uma taxa constante ($\beta=1$), como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Gráfico de probabilidade de falha x tempo após aplicação do FMEA.



Fonte: Autores (2025)

Utilizando a Equação (8) e os novos parâmetros, a confiabilidade para uma missão futura de 11 dias (264 horas) foi recalculada:

- $\hat{R}(11 \text{ dias}) \approx 76,7\%$

E o número esperado de falhas utilizando a Equação (7) para o mesmo intervalo de 11 dias foi estimado em:

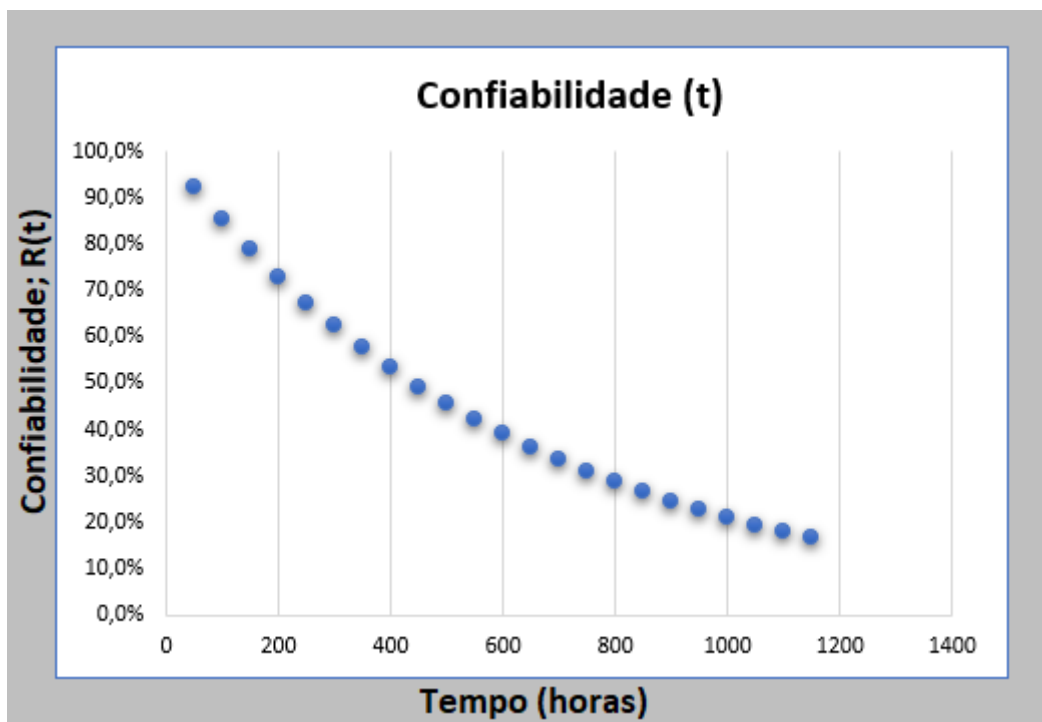
- $E[N(11 \text{ dias})] \approx 1,06 \text{ falhas}$

Estes valores representam uma melhoria expressiva em relação ao cenário inicial ($\hat{R} \approx 31,8 \%$ e $E[N] \approx 4,58$ falhas para 11 dias). A probabilidade de operar 11 dias sem falhas aumentou de cerca de 32 % para aproximadamente 77 %, e a expectativa de falhas nesse período reduziu de quase 5 para apenas 1, aproximadamente.

Estes valores $R(t) \approx 76,7\%$ e $E[N] \approx 1,06$ para 11 dias] representam uma melhoria expressiva em relação ao cenário inicial ($\hat{R} \approx 31,8 \%$ e $E[N] \approx 4,58$ falhas para 11 dias). A comparação visual entre as curvas de confiabilidade $R(t)$ antes (Figura 5) e depois (Figura 11) da implementação das ações do FMEA evidencia claramente essa evolução

positiva. Enquanto a curva inicial (Figura 11), referente ao primeiro semestre de 2024, mostrava uma queda acentuada da confiabilidade já nas primeiras centenas de horas, atingindo o baixo patamar de 31,8 % em 11 dias (264 horas), a curva pós-implementação (Figura 12), referente ao segundo semestre, apresenta um decaimento muito mais suave. A confiabilidade neste segundo período se mantém em níveis significativamente mais elevados por mais tempo, alcançando 76,7 % para a mesma missão de 11 dias. Essa diferença visual entre os gráficos demonstra o impacto substancial das ações de melhoria na estabilização do componente e no aumento de sua confiabilidade operacional.

Figura 12: Gráfico de confiabilidade x tempo após a aplicação do FMEA



Fonte: Autores (2025)

Os resultados obtidos após a implementação das ações definidas na construção do FMEA demonstram claramente o sucesso e a efetividade da abordagem adotada neste estudo de caso. O número de quebras da lona de retorno caiu de 50 para 21 entre os dois semestres analisados (uma queda de aproximadamente 58 %). Isso demonstra a eficácia das ações implementadas em mitigar as causas subjacentes das falhas prioritárias e reflete uma melhoria drástica na confiabilidade do componente.

A redução substancial no tempo de inatividade equivalente levou a uma diminuição da perda de produção estimada de 17,15 milhões para 1,95 milhões de unidades do produto final entre os semestres. O ganho relativo de 15,2 milhões de

unidades que deixaram de ser perdidas evidencia a eficácia das soluções na otimização do tempo de atividade e na manutenção de um fluxo de trabalho mais contínuo.

Além disso, o aumento da confiabilidade estimada para uma missão de 11 dias (período entre paradas estratégicas) de aproximadamente 32 % para cerca de 77 % representou um avanço expressivo, indicando que a probabilidade de falha do equipamento diminuiu consideravelmente como resultado direto das ações de melhoria.

Notou-se também que a redução drástica no número de falhas no mesmo período de operação implicou diretamente em um aumento substancial no Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), corroborando a maior confiabilidade operacional alcançada.

Em resumo, esses resultados mostram um caso claro de retorno sobre o investimento (ROI) positivo do projeto de melhoria, justificando a aplicação da análise FMEA e das metodologias de confiabilidade para a tomada de decisão em manutenção e a busca pela melhoria contínua. O impacto direto nas operações e na produção evidencia que iniciativas focadas na confiabilidade podem melhorar consideravelmente a eficiência operacional e os resultados financeiros.

Além dos ganhos quantitativos, todo o processo de levantamento de dados e elaboração do FMEA promoveu uma valiosa mudança de cultura e mentalidade na equipe técnica e operacional. Ao serem envolvidos na análise, os membros da equipe desenvolveram maior conhecimento sobre modos de falha, engajaram-se mais na detecção e solução de problemas e passaram a valorizar mais as ações proativas e os resultados da manutenção. Essa transformação cultural representa um retorno adicional importante para a empresa, fortalecendo seu capital humano.

5. Conclusões

Com o desenvolvimento deste projeto ficou evidente que a aplicação de metodologias de manutenção centrada na confiabilidade, especificamente a ferramenta FMEA (Análise dos Modos de Falha e Efeitos), mostrou-se altamente eficaz no estudo de caso apresentado para a "Lona de retorno do tabaco", destacando a relevância do tema abordado e alcançando os objetivos propostos.

Durante o estudo, o método FMEA permitiu identificar os diversos tipos de falhas que ocorrem durante a operação do maquinário, suas causas raízes e efeitos. A ferramenta possibilitou não apenas a identificação, mas também a definição da criticidade através dos índices S, O, D e do RPN, revelando-se uma solução ideal para análises sistêmicas

em ambientes fabris complexos. Com base nessa análise, foi possível criar e ajustar planos de manutenção voltados para os modos de falha de maior impacto, resultando em uma abordagem mais direcionada e orgânica para o componente crítico estudado.

Os resultados demonstrados foram expressivos. Após a aplicação das ações mapeadas no FMEA para os modos de falha do componente, o número de quebras foi reduzido em 58 %, diminuindo significativamente o tempo de inatividade das linhas, com maior impacto na linha “3B”, a mais crítica. Além disso a diminuição na quantidade de quebras resultou em um ganho produtivo de 15,2 milhões de cigarros. Esses resultados comprovam que a aplicação do método FMEA gerou um retorno sobre investimento extremamente positivo.

O impacto direto nas operações e na produção evidencia que iniciativas como manutenção preventiva, revisão de processos e a adoção de novas tecnologias ou práticas podem melhorar consideravelmente a eficiência operacional e os resultados financeiros.

Além disso, todo o processo de levantamento de dados e elaboração do FMEA promoveu uma mudança de cultura e mentalidade na equipe técnica e operacional. Ao serem envolvidos na construção de uma ferramenta robusta como o FMEA, os membros da equipe desenvolveram maior conhecimento sobre modos de falha, engajaram-se mais na detecção e solução de problemas, e passaram a se preocupar mais com os resultados. Essa transformação cultural também representa um retorno positivo para a empresa, fortalecendo seu capital humano e a qualidade de suas operações.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se: o monitoramento contínuo dos indicadores de confiabilidade para verificar a sustentabilidade das melhorias e a evolução do parâmetro β a longo prazo; a replicação da metodologia FMEA em outros componentes ou linhas de produção da planta; a investigação de técnicas complementares de manutenção preditiva para os modos de falha identificados; e a análise do custo do ciclo de vida considerando as novas estratégias de manutenção.

6. Referências

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG); VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA). **Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook**. 1. ed. Southfield, MI/Berlin: AIAG/VDA, 2019. *(Nota: Ou cite a AIAG FMEA 4ª ed., 2008, se foi a utilizada).*

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

CROW, L. H. Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems. *In*: BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. (ed.). **Reliability and biometry**: statistical analysis of lifelength. Philadelphia: SIAM - Society for Industrial and Applied Mathematics, 1974. p. 379-410.

DEMING, W. E. **Out of the crisis**. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, 1986.

EBELING, C. E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. Boston: McGraw-Hill, 1997.

FRAGA, L. G.; PINTO, E. R. O Processo de Weibull Poisson para Modelagem da Confiabilidade em Sistemas Reparáveis. **Revista Matemática e Estatística em Foco**, Uberlândia, v. 1, n. 1, p. [Inserir Páginas Corretas], 2013. *(Nota: É necessário encontrar e inserir o intervalo de páginas correto deste artigo).*

JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M. **Juran's quality handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KARDEC, A. P.; NASCIF, J. A. **Manutenção**: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. *(Nota: Verifique a edição utilizada).*

LEEMIS, L. M. **Reliability**: Probabilistic Models and Statistical Methods. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.

MOBLEY, R. K. **Maintenance engineering handbook**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2011. *(Nota: Verifique a edição utilizada, o texto original mencionava apenas 2011).*

MOUBRAY, J. **RCMII**: manutenção centrada em confiabilidade. 2. ed. Tradução de Reinaldo Miragaya Costa. Lutterworth, UK: Aladon, 2000.

MURAKAMI, E.; LOPES, G. M.; BAUER, L. F. **Aplicação de FMEA – Análise de Modos de Falhas e Efeitos em uma linha de produção SMT de placa-mãe**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. *(Referência do PDF que você forneceu).*

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM**: total productive maintenance. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Failure Modes and Effects Analysis (FMEA): A Bibliography**. Washington, DC: NASA, 2000. (NASA/SP-2000-6110).

O'CONNOR, P. D. T. **Practical reliability engineering**. 4. ed. Chichester: Wiley, 2002.

PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos: Provendo e prevenindo problemas antes que ocorram**. Tradução Outras Palavras. São Paulo: IMAM, 1997.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção: Indicadores e Índices**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

RIBEIRO, J. L. D.; FOGLIATTO, F. S. **Confiabilidade e análise de sobrevivência**. Porto Alegre: Bookman, 2011.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution**. 2. ed. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press, 2003.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.