



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MIRLES MELO DOS SANTOS

PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA UM COMPONENTE
CRÍTICO DE UMA SECADORA EM UMA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS
PLÁSTICAS

Caruaru
2025

MIRLES MELO DOS SANTOS

PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA UM COMPONENTE
CRÍTICO DE UMA SECADORA EM UMA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS
PLÁSTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Produção do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharelado em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Augusto José da Silva Rodrigues

Caruaru

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Mirles Melo dos.

Planejamento de ações de manutenção para um componente crítico de uma secadora em uma indústria de embalagens plásticas / Mirles Melo dos Santos.
- Caruaru, 2025.

71 : il., tab.

Orientador(a): Augusto José da Silva Rodrigues

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Engenharia de Produção, 2025.

Inclui referências.

1. Política de manutenção. 2. Confiabilidade . 3. Rolamento. 4. Taxa de custo.
I. Rodrigues, Augusto José da Silva . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MIRLES MELO DOS SANTOS

PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA UM COMPONENTE
CRÍTICO DE UMA SECADORA EM UMA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS
PLÁSTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Produção do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharelado em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 10/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto José da Silva Rodrigues (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ramon Swell Gomes Rodrigues Casado (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Amanda Carvalho Miranda (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, cuja força, amor incondicional e exemplo de vida me deram não apenas motivos para sonhar, mas também a coragem para transformar esses sonhos em realidade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste grande sonho. Em especial, agradeço aos meus pais, Maria Mirtes e Cícero Carlos (*in memoriam*) que foram os pilares dessa conquista. Minha mãe, com sua dedicação incansável, enfrentou inúmeros plantões no hospital para garantir que eu tivesse uma vida digna e uma educação de qualidade. Se hoje ambas temos ensino superior, é graças à sua força e à sua determinação. Meu pai, embora analfabeto, possuía uma inteligência admirável e uma coragem que segue me inspirando todos os dias. A eles, dedico não apenas este trabalho, mas todas as minhas vitórias.

Também expresso minha eterna gratidão à minha avó, Marluce Barbosa (*in memoriam*), que sempre me incentivou nos estudos e celebrava com alegria cada uma das minhas conquistas acadêmicas. Embora desta vez eu não possa sentir o seu abraço, tenho certeza de que está orgulhosa e feliz por mim.

Agradeço à equipe da Ecobag por terem me acolhido de braços abertos e por criarem um ambiente de aprendizado tão rico e inspirador. Minha gratidão também vai para os colegas que o trabalho me proporcionou, Bryan Marcos, Adilson Souza e Iramir Barros, por compartilharem seus conhecimentos comigo e por me mostrarem, com entusiasmo, a beleza e a importância da engenharia. Vocês foram peças fundamentais na minha jornada.

Agradeço também a todos os amigos que a universidade me presenteou. À Beatriz Marinho, que esteve ao meu lado desde o primeiro dia de aula e foi minha amiga em todas as etapas dessa jornada e fora dela. A Ewerton Felipe, por sempre nos motivar a alcançar a excelência em cada apresentação. À Larissa Layana, cuja serenidade foi a calma que tanto precisávamos. E a Mayara Stéphaney, por transformar os momentos de dificuldade em pura diversão. Vocês tornaram essa caminhada inesquecível.

Destaco, com gratidão, o meu orientador, Augusto José, pela orientação, paciência e apoio ao longo desta jornada. Sua ajuda foi essencial para a realização deste trabalho. Por fim e de forma especial, agradeço à minha família e aos amigos, em especial Pedro, Ewerton e Thaís, pelo incentivo e apoio emocional ao longo deste processo. Suas palavras de encorajamento me deram a coragem necessária para enfrentar todos os obstáculos.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo planejar ações de manutenção para um componente crítico de um sistema principal em uma fábrica de sacolas plásticas, visando reduzir falhas operacionais e, como consequência, melhorar a eficiência do processo produtivo. A pesquisa foi conduzida por meio de um estudo de caso, no qual foram analisadas falhas recorrentes na linha de produção, identificando-se a secadora como o equipamento mais relevante. Dentro desse sistema, o rolamento foi classificado como o componente mais crítico, sendo o principal responsável por comprometer seu funcionamento. Com base nessa identificação, foi proposta uma estratégia de manutenção pautada em inspeções periódicas e substituição preventiva. Para avaliar a eficácia dessa política, desenvolveu-se um modelo matemático com o objetivo de minimizar a taxa de custo (métrica que representa o custo médio de longo prazo por unidade de tempo). A performance do modelo foi testada com parâmetros realistas, complementada por uma análise de sensibilidade para verificar a robustez da estratégia. Os resultados indicam que a adoção de uma política de manutenção planejada é significativamente mais vantajosa do que uma abordagem puramente corretiva. Além disso, observou-se que, mesmo com a integração de sensores em estratégias de manutenção, é necessário garantir um nível mínimo de qualidade desses dispositivos para que a política seja efetiva.

Palavras-chave: Política de manutenção; Confiabilidade; Rolamento; Taxa de custo.

ABSTRACT

This study aimed to plan maintenance actions for a critical component of a main system in a plastic bag manufacturing plant, with the goal of reducing operational failures and, as a consequence, improving the efficiency of the production process. The research was conducted through a case study, in which recurring failures in the production line were analyzed, identifying the dryer as the most relevant piece of equipment. Within this system, the bearing was classified as the most critical component, being the main factor compromising its operation. Based on this analysis, a maintenance strategy was proposed, involving periodic inspections and preventive replacement. To evaluate the effectiveness of this policy, a mathematical model was developed to minimize the cost rate (a metric that represents the long-term average cost per unit of time). The model's performance was tested using realistic parameters, complemented by a sensitivity analysis to assess the robustness of the strategy. The results indicate that implementing a planned maintenance policy is significantly more advantageous than relying solely on corrective actions. Moreover, it was observed that even when sensors are integrated into maintenance strategies, a minimum quality level must be ensured for these devices to be effective.

Keywords: Maintenance policy; Reliability; Bearing; Cost-rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Árvore de decisão de tipos de manutenção	25
Figura 2 –	Conceito Delay Time	34
Figura 3 –	Tamanhos das sacolas recicladas	36
Figura 4 –	Fluxograma do processo de reciclagem	38
Figura 5 –	Fluxograma do processo de produção	39
Figura 6 –	Secadora em processo de fabricação	40
Figura 7 –	Secadoras em uso	41
Figura 8 –	Equipe de manutenção realizando serviço na secadora	42
Figura 9 –	Rolamento utilizado na secadora	43
Figura 10 –	Rolamento 6314-2RS1	46
Figura 11 –	Componentes do rolamento	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação da Pesquisa	17
Tabela 2 –	Tabela comparativa dos tipos de manutenção	30
Tabela 3 –	Escopo das máquinas por setor	37
Tabela 4 –	Classificação ISO do dano no rolamento e dos modos de falha	48
Tabela 5 –	Notação	52
Tabela 6 –	Parâmetros de entrada para o Caso Base (CB)	58
Tabela 7 –	Análise de Sensibilidade	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBM	Manutenção Baseada em Condição
DTM	Delay Time Model
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet das Coisas
ISO	Organização Internacional de Normalização
MC	Manutenção Corretiva
MP	Manutenção Preventiva
RCM	Manutenção Centrada em Confiabilidade
SLSQP	Programação de Mínimos Quadrados Sequenciais
TBM	Manutenção Baseada no Tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	17
1.4	METODOLOGIA.....	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1	HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO.....	22
2.1.1	Definição da manutenção.....	23
2.2	CLASSIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	24
2.2.1	Manutenção preventiva.....	27
2.2.2	Manutenção preditiva.....	28
2.2.3	Manutenção corretiva.....	29
2.3	POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO.....	30
2.3.1	Ações de manutenção baseadas no tempo.....	31
2.3.2	Ações de manutenção baseadas na condição.....	32
2.4	DELAY TIME.....	33
3	DESENVOLVIMENTO.....	35
3.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	35
3.2	IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA CRÍTICO.....	39
3.3	COMPONENTE CRÍTICO.....	43
3.4	ROLAMENTO.....	45
3.5	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA.....	48
3.6	CRITÉRIO DE DECISÃO E MODELAGEM.....	50
3.7	ANÁLISE DA PERFORMANCE DA POLÍTICA PROPOSTA.....	56
3.7.1	Análise de sensibilidade.....	58
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e a globalização, as antigas barreiras entre as organizações foram rompidas. Nesse cenário de expansão, tornou-se evidente o aumento das responsabilidades das empresas perante a sociedade, assim como o crescimento da concorrência entre negócios do mesmo segmento. No que diz respeito às manutenções de equipamentos, é possível perceber que, ao longo dos anos, ela passou por uma evolução marcante, tanto nos conceitos quanto nas práticas adotadas pelas organizações. Essa mudança de paradigma, impulsionada pela crescente complexidade dos sistemas e pela busca por otimização e redução de custos, tem levado as empresas a adotarem modelos de manutenção mais eficientes e estratégicos (Machado *et al.*, 2023).

No passado, a manutenção não recebia a devida atenção e era frequentemente encarada como uma atividade secundária ou até como um incômodo nas rotinas produtivas das empresas. Essa percepção existia, em grande parte, por conta de um conflito entre os departamentos de operações e manutenção. Enquanto a operação priorizava maximizar a produção e os lucros, a manutenção era muitas vezes vista como um entrave, especialmente quando demandava paradas inesperadas no processo produtivo. Essa visão distorcida da manutenção, como um custo desnecessário em vez de um investimento estratégico, era comum em muitas organizações (Pintelon; Parodi-Herz, 2008).

Parar uma máquina ou uma linha de produção para realizar a manutenção era muitas vezes visto como um obstáculo à eficiência, algo desnecessário ou até um equívoco. No entanto, essas interrupções podem ser essenciais para prevenir falhas e garantir a segurança nas operações. Com a crescente complexidade dos sistemas produtivos e as demandas cada vez maiores por confiabilidade e qualidade, tornou-se indispensável mudar essa visão. A manutenção, quando bem planejada e bem executada, deixa de ser um "custo" e passa a ser vista como um investimento estratégico na disponibilidade e no desempenho dos ativos, contribuindo para a competitividade e o sucesso das empresas na era da Indústria 4.0 (Mello *et al.*, 2022).

A manutenção, em diversos setores, não se limita à mera conservação de equipamentos. Ela abrange um conjunto de ações estratégicas que visam assegurar a longevidade dos ativos, garantir sua disponibilidade para operação, deixá-los

prontos para situações de emergência e, primordialmente, preservar a integridade física dos usuários das instalações (Dhillon, 2017). A negligência em relação à manutenção pode levar a consequências graves, como falhas catastróficas, acidentes e desastres naturais, com impactos não apenas para as empresas, mas também para a sociedade geral (Rodrigues; Cavalcante; Lee, 2023). Casos como o desastre de Chernobyl, em 1986, e o acidente nuclear de Fukushima, em 2011, ilustram os riscos associados à falta de manutenção adequada em equipamentos críticos, mostrando que falhas nesse campo não afetam apenas a produção, mas também colocam vidas em perigo e causam sérios danos ao meio ambiente.

Nesse cenário, implementar políticas de manutenção eficazes é fundamental para assegurar a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos. O uso de políticas bem estruturadas, que incluam tanto a manutenção preventiva que é vista como um elemento fundamental para garantir a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos (Blanchard, 2017) quanto a preditiva (Mello *et al.*, 2022), que propõe ajudar a reduzir falhas e aumentar a eficiência dos equipamentos. Essas políticas devem estar alinhadas aos objetivos estratégicos da organização e levar em conta as particularidades de cada setor industrial. Uma gestão de manutenção eficiente exige, além da definição clara de responsabilidades, a adoção de práticas de monitoramento constante e análise contínua do desempenho dos ativos.

Dessa forma, setores que dependem de máquinas especializadas, como as de corte, extrusão e recuperação de materiais, enfrentam desafios adicionais, pois falhas inesperadas podem causar atrasos, desperdícios e prejuízos financeiros. Nesses casos, o monitoramento contínuo torna-se indispensável. Como destaca Dhillon (2017), a manutenção moderna deve ir além da simples correção de problemas, incorporando práticas preventivas e preditivas para reduzir riscos operacionais e aumentar a eficiência dos sistemas produtivos.

Esse cenário é particularmente relevante na indústria de sacolas plásticas, por exemplo, onde a complexidade dos equipamentos e a natureza dos materiais, em questão o plástico, exigem um cuidado ainda maior. Máquinas como extrusoras e sistemas de recuperação de material precisam de uma gestão de manutenção bem planejada para evitar paradas inesperadas e garantir a qualidade dos produtos. Além disso, é necessário monitorar problemas como superaquecimento e falhas no

controle de qualidade, que podem gerar desperdício, riscos ambientais e prejuízos financeiros (ABIPLAST, 2025).

Dada a competitividade industrial global e a necessidade de manter os ativos disponíveis em indústrias de sacolas plásticas recicladas, surge a seguinte questão de pesquisa: uma vez que é possível identificar o sistema mais crítico de uma organização, como modelar uma política de manutenção que promova a eficiência operacional desse ativo, considerando as limitações financeiras? Parte-se da hipótese de que é possível desenvolver uma modelagem matemática que integre de forma equilibrada os aspectos econômicos e operacionais, desde que sejam adequadamente considerados fatores como tempo de vida útil, custo das ações de manutenção e probabilidade de falhas.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A indústria de sacolas plásticas desempenha um papel essencial no setor de embalagens, atendendo a diversas demandas do comércio e da indústria. Sua importância está na praticidade, resistência e baixo custo das embalagens plásticas, que facilitam o transporte e armazenamento de mercadorias. Segundo Santos, Agnelli e Manrich (2002), o mercado de embalagens plásticas tem crescido significativamente devido à sua versatilidade e ampla aplicação em diferentes setores. No entanto, apesar de sua relevância, esse segmento enfrenta desafios operacionais que impactam diretamente a produtividade e a competitividade das empresas.

A empresa estudada, localizada no agreste de Pernambuco, enfrenta falhas recorrentes na linha de produção, resultando em paradas frequentes, muitas vezes diárias. Essas interrupções ocorrem devido a problemas operacionais nos equipamentos, especialmente nas secadoras utilizadas no processo produtivo. A falta de padronização dos equipamentos e as diferenças estruturais entre eles contribuem para a instabilidade do processo, tornando a operação suscetível a falhas inesperadas.

Essas interrupções impactam significativamente a produtividade, causando atrasos na entrega dos pedidos, desperdício de matéria-prima e aumento dos custos operacionais. Nakajima (1988) destaca que falhas frequentes nos equipamentos

afetam diretamente a eficiência produtiva, tornando a implementação de políticas de manutenção uma estratégia essencial para minimizar paradas não programadas. A necessidade constante de ajustes e manutenções corretivas compromete a eficiência da produção, reduzindo a capacidade da empresa de atender à demanda do mercado de forma ágil e competitiva. Além disso, o tempo de inatividade dos equipamentos afeta diretamente a lucratividade, tornando essencial a busca por soluções para minimizar essas falhas e otimizar a operação da linha de produção.

A manutenção inadequada também pode comprometer a qualidade do produto final. Segundo Silva e Souza (2020), falhas nos equipamentos podem gerar variações no processo produtivo, resultando em produtos com defeitos que não atendem aos padrões exigidos pelo mercado. Na indústria de sacolas plásticas, qualquer falha na secagem do material pode comprometer a resistência e durabilidade das embalagens, aumentando as taxas de refugo e retrabalho.

Além dos impactos financeiros e produtivos, a falta de uma política de manutenção estruturada pode comprometer a segurança dos trabalhadores. Lee e Cha (2016) ressaltam que falhas inesperadas nos equipamentos representam riscos operacionais, podendo ocasionar acidentes de trabalho e prejudicar a integridade dos colaboradores. Dessa forma, a implementação de uma política de manutenção eficaz não apenas melhora a eficiência do processo produtivo, mas também contribui para um ambiente de trabalho mais seguro.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante das falhas recorrentes na linha de produção e das frequentes paradas dos equipamentos, torna-se essencial desenvolver um estudo para identificar a máquina crítica e, posteriormente, o componente mais suscetível a falhas. Segundo Moubrey (1997), a confiabilidade operacional depende diretamente da capacidade de identificar e mitigar os modos de falha que impactam o desempenho dos ativos. Essa análise permitirá compreender os principais pontos de vulnerabilidade do processo produtivo, possibilitando a implementação de uma política de manutenção mais eficiente e estratégica.

Com uma abordagem focada na prevenção, é possível reduzir significativamente o número de paradas não programadas, aumentando a

disponibilidade dos equipamentos e garantindo um fluxo produtivo mais estável (Nakajima, 1988). Além disso, a otimização da manutenção impacta diretamente nos custos operacionais, minimizando desperdícios de matéria-prima e reduzindo as despesas com reparos corretivos. Segundo Silva *et al.* (2023), a manutenção preventiva bem estruturada pode reduzir em até 30% os custos com manutenção corretiva, além de estender a vida útil dos componentes.

A longo prazo, essas melhorias contribuem para um aumento na produtividade e na eficiência dos processos, fortalecendo a competitividade da empresa no setor de embalagens plásticas. De acordo com Pinto e Xavier (2018), a implementação de metodologias como a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) e a Manutenção Preditiva permite não apenas reduzir falhas, mas também otimizar a gestão de ativos, tornando a indústria mais eficiente e sustentável. Dessa maneira, o estudo proposto não apenas endereça um problema operacional crítico, mas também agrega valor estratégico ao negócio.

Além disso, a manutenção eficaz impacta diretamente a segurança do trabalho e a qualidade dos produtos fabricados. Falhas inesperadas podem resultar em condições inseguras para os operadores e afetar a conformidade dos produtos com padrões de qualidade exigidos pelo mercado (Moura e Andrade, 2019). Dessa forma, o estudo contribuirá não apenas para a confiabilidade dos equipamentos, mas também para a integridade dos trabalhadores e a reputação da empresa.

1.3 OBJETIVOS

Neste tópico são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e aplicar um modelo de política de manutenção para um componente crítico de um sistema principal em uma fábrica de sacolas plásticas.

1.3.2 Objetivos específicos

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

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre conceitos fundamentais de manutenção e políticas de manutenção;
- Diagnosticar, por meio de um estudo de caso, o sistema crítico e principal de uma indústria de sacolas plásticas;
- Identificar o componente mais crítico do sistema previamente analisado;
- Propor uma política de manutenção voltada para esse componente;
- Modelar a política de manutenção proposta;
- Realizar uma aplicação numérica do modelo desenvolvido;
- Sugerir recomendações para a organização estudada no caso.

1.4 METODOLOGIA

Este tópico do trabalho apresenta a classificação da pesquisa adotada, detalhando suas características e justificativas. A Tabela 1 sintetiza essa classificação, que será detalhada nos próximos parágrafos.

Tabela 1 – Classificação da Pesquisa

QUANTO À ABORDAGEM	PESQUISA QUALITATIVA PESQUISA QUANTITATIVA
QUANTO À NATUREZA	PESQUISA APLICADA
QUANTOS AOS OBJETIVOS	PESQUISA EXPLICATIVA
QUANTOS AOS PROCEDIMENTOS	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA ESTUDO DE CASO

Fonte: Autoria própria (2025).

A pesquisa adota uma abordagem qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa é empregada para compreender profundamente as falhas operacionais em secadoras na indústria de sacolas plásticas, considerando fatores subjetivos e contextuais. Por outro lado, a abordagem quantitativa permite analisar dados numéricos, como taxas de falhas e indicadores de desempenho, possibilitando uma

avaliação estatística das ocorrências. Conforme Silva (2024), a pesquisa quantitativa é caracterizada pelo uso de técnicas estatísticas para analisar dados numéricos.

Quanto à sua natureza, a pesquisa é classificada como aplicada, pois busca gerar conhecimento voltado para a solução de um problema específico no contexto industrial, visando não apenas compreender as falhas, mas também propor medidas para melhorar a eficiência do processo produtivo. De acordo com Gil (2002), a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

Em relação aos objetivos, este estudo é uma pesquisa explicativa, pois pretende identificar as causas das falhas operacionais e entender as relações entre diferentes variáveis que impactam o desempenho das secadoras, contribuindo assim para o aprimoramento da manutenção e gestão de equipamentos no setor. Gil (2002) afirma que a pesquisa explicativa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos.

Quanto aos procedimentos metodológicos, foram utilizados a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso. A pesquisa bibliográfica fundamentou teoricamente o estudo por meio da revisão de literatura especializada em manutenção industrial. Segundo Lakatos e Marconi (1991), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. Já o estudo de caso permitiu uma análise detalhada de um ambiente real, coletando dados práticos que reforçam a aplicação dos conceitos estudados. Yin (2015) destaca que o estudo de caso é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto real

A seleção da empresa para este estudo seguiu critérios estratégicos que asseguram sua relevância para o setor de sacolas plásticas. Buscou-se um ambiente industrial onde as falhas operacionais em secadoras tivessem um impacto significativo, viabilizando uma análise detalhada do problema. A escolha recaiu sobre uma empresa com histórico de dificuldades na manutenção desses equipamentos, permitindo um estudo aprofundado das causas das falhas. Além disso, a disponibilidade de acesso a dados operacionais e a disposição da empresa em colaborar foram fatores decisivos.

Para a obtenção de informações, foram realizadas visitas técnicas à empresa, possibilitando a observação direta do desempenho das secadoras e de seus componentes em operação. Essas visitas permitiram identificar falhas recorrentes e

compreender o contexto produtivo e as estratégias de manutenção aplicadas. Também foram conduzidas entrevistas com operadores, técnicos e gestores, visando aprofundar o entendimento sobre os desafios enfrentados e as práticas adotadas. A integração dessas informações foi essencial para embasar a análise e garantir a confiabilidade dos dados coletados.

A modelagem do sistema foi fundamentada no Teorema da Recompensa da Renovação, uma abordagem amplamente utilizada para representar sistemas estocásticos sujeitos a ciclos de falha e substituição. Essa teoria permite estimar a recompensa média por unidade de tempo, sendo especialmente útil para avaliar políticas de manutenção com diferentes combinações de ações preventivas. A partir dessa estrutura, definiu-se o critério de decisão (taxa de custo).

Em sequência, o modelo matemático foi implementado em linguagem Python, e as soluções foram geradas mediante o método de Programação de Mínimos Quadrados Sequenciais (SLSQP), adequado para problemas com restrições não lineares e contínuas. Essa abordagem permitiu identificar as combinações que minimizam a taxa de custo, respeitando as condições impostas pelos parâmetros operacionais do sistema. Cabe ressaltar que, o código-fonte desenvolvido não será incluído neste trabalho, por razões de confidencialidade. Contudo, uma vez que todas as equações utilizadas estão detalhadas ao longo do texto, é possível que a modelagem seja reproduzida por qualquer leitor com familiaridade na programação.

Para a aplicação do modelo desenvolvido, alguns parâmetros foram obtidos diretamente com o gestor da companhia por meio de uma abordagem chamada julgamento de especialistas. Essa técnica é válida, pois permite que especialistas com experiência prática forneçam estimativas baseadas em seu conhecimento do sistema, mesmo quando não há dados históricos disponíveis (Lad; Kulkarni, 2010; Dehsoukhteh; Razmkhah; Castanier, 2024). No entanto, para alguns dos parâmetros relacionados ao processo de falha do rolamento, que exigem uma maior precisão na estimativa, não foi possível obtê-los diretamente devido à falta de dados suficientes para empregar técnicas como máxima verossimilhança ou métodos bayesianos. Para esses parâmetros, foram adotados valores da literatura, uma vez que são amplamente utilizados em contextos semelhantes e oferecem boa representatividade para o componente em questão, permitindo que o modelo seja aplicado de forma robusta e consistente.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é estruturado em 4 capítulos, os quais abordam diversos aspectos relevantes sobre o tema, sendo eles: introdução, referencial teórico, desenvolvimento e considerações finais.

Conforme foi visto, o capítulo introdutório teve como objetivo apresentar o contexto que motivou o estudo, abordando as transformações ocorridas na área de manutenção nas organizações e o papel fundamental da manutenção na eficiência operacional das empresas. Além disso, foi definido o problema a ser investigado, a justificativa para a pesquisa e os objetivos gerais e específicos deste estudo. Por fim, foi detalhada a metodologia adotada para alcançar os resultados esperados.

O segundo capítulo deste trabalho fornece uma base teórica sólida para o desenvolvimento da pesquisa, abordando os principais conceitos e práticas relacionadas à manutenção industrial. Será explorada a evolução histórica da manutenção, desde suas origens até os avanços mais recentes, com destaque para as práticas modernas, como a manutenção preditiva e baseada em condição. Além disso, o capítulo discutirá as diferentes classificações de manutenção (preventiva, preditiva e corretiva) e suas respectivas vantagens e desafios, além de apresentar as principais políticas de manutenção utilizadas nas indústrias, como as ações baseadas no tempo e na condição. Este referencial teórico é essencial para compreender a importância da manutenção eficiente e sua aplicação no contexto da indústria de produção de sacolas plásticas recicladas, que será o foco do estudo.

O terceiro capítulo expõe o cenário atual da empresa, incluindo sua trajetória histórica, estrutura e processos produtivos. O foco será dado ao ambiente empresarial e às práticas de manutenção, com ênfase na análise das políticas de manutenção adotadas pela organização, a fim de identificar as necessidades específicas da empresa e como essas práticas influenciam a eficiência operacional. Além disso, neste capítulo, serão apresentados o sistema crítico envolvido no processo de produção e o componente crítico que impacta diretamente a continuidade da operação: a secadora e seus rolamentos. O mesmo capítulo irá abordar o critério de decisão adotado para a escolha das melhores estratégias de manutenção, além de apresentar a modelagem utilizada para a análise do problema. Será discutido também o processo de análise de sensibilidade, que visa avaliar a

robustez das decisões frente a variações nos parâmetros e condições do sistema, garantindo maior confiabilidade nos resultados obtidos.

O capítulo final reforça os objetivos do trabalho, destacando sua relevância e contribuição para a manutenção industrial na indústria de sacolas plásticas, com foco na identificação e solução das falhas operacionais das secadoras. A inovação do estudo reside na aplicação de uma abordagem combinada de análise quantitativa e qualitativa, aliando teoria e prática para otimizar a eficiência dos processos. Além disso, são sugeridas futuras pesquisas, como a adaptação das metodologias para outras indústrias e o uso de tecnologias emergentes para aprimorar ainda mais as estratégias de manutenção e melhorar a gestão de falhas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão explorados os conceitos essenciais que ajudam a entender de maneira clara o desenvolvimento deste trabalho. A ideia é apresentar uma base teórica que, além de ser bem estruturada, proporciona uma visão ampla dos aspectos centrais do estudo.

2.1 HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

A manutenção, enquanto prática organizada, está diretamente ligada ao avanço industrial e ao aumento da complexidade dos equipamentos utilizados nas atividades produtivas. Entretanto, a ideia de manter ferramentas e dispositivos em condições adequadas é tão antiga quanto a própria humanidade. Desde a pré-história, já existia a necessidade de consertar e ajustar instrumentos rudimentares para garantir a continuidade de suas funções (Moubray, 2015).

Com a chegada da Revolução Industrial, no século XVIII, essa prática passou a assumir uma forma mais estruturada. O crescimento da mecanização nas fábricas trouxe uma dependência cada vez maior de máquinas para sustentar a produção em larga escala. Nesse contexto, a manutenção começou a ser percebida como um componente essencial para evitar falhas inesperadas e garantir a continuidade dos processos produtivos (Almeida, 2005).

No início, a manutenção era predominantemente reativa, concentrando-se em corrigir problemas somente após a ocorrência de falhas. Esse modelo corretivo era amplamente adotado, reflexo das limitações tecnológicas da época e do conhecimento ainda restrito sobre os efeitos negativos das interrupções inesperadas. Conforme apontado por Gonçalves (2010), a ausência de uma abordagem estratégica nos processos industriais levava as empresas a enxergar a manutenção como um mero gasto inevitável, em vez de reconhecê-la como um investimento essencial para melhorar a eficiência operacional e reduzir custos no longo prazo.

Após a Segunda Guerra Mundial, a manutenção passou por uma transformação significativa, impulsionada pela modernização industrial e pela

crescente automação das fábricas. Nesse período, novos desafios surgiram devido à complexidade crescente dos equipamentos, demandando abordagens mais sofisticadas. Nos anos 1960, a manutenção preditiva emergiu como uma resposta inovadora, alavancada pelos avanços tecnológicos.

De acordo com Pereira (2003), essa abordagem marcou um ponto de inflexão na história da manutenção. Pela primeira vez, as decisões podiam ser baseadas em dados objetivos, o que aumentou consideravelmente a confiabilidade dos sistemas e a eficiência dos processos produtivos. Além disso, o uso de tecnologias preditivas reduziu custos associados a paradas inesperadas e melhorou a segurança operacional, consolidando a manutenção como um pilar estratégico nas indústrias modernas.

A manutenção, hoje, é uma função estratégica essencial para as organizações. Com a Indústria 4.0, tecnologias como inteligência artificial e big data transformaram os modelos tradicionais. Moura e Andrade (2019) destacam que práticas como a Manutenção Baseada em Condição (CBM) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) mostram a evolução da área, agora voltada para sustentabilidade, redução de custos e maior competitividade.

2.2 DEFINIÇÃO DA MANUTENÇÃO

Segundo Moubrey (2015), a manutenção, composta por um conjunto de ações técnicas e administrativas, visa preservar ou restabelecer o funcionamento de equipamentos, sistemas ou instalações, assegurando que desempenhem suas funções conforme o esperado. Essa ação também busca lidar com processos de natureza imprevisível que podem comprometer o desempenho do sistema, resultando em um estado de falha. Esse estado é caracterizado pela incapacidade do sistema de operar de acordo com os requisitos previamente definidos, conforme destacado por Leveson (2012), que discute como sistemas complexos podem ser afetados por falhas inesperadas em ambientes dinâmicos.

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a manutenção desempenha um papel fundamental ao assegurar a disponibilidade operacional de equipamentos e instalações. Sua finalidade é atender às demandas do processo produtivo enquanto promove a preservação ambiental, sempre pautada em critérios de confiabilidade,

segurança e custos adequados. De acordo com esses autores, a função da manutenção atualmente deve ir além de ser apenas eficiente, ou seja, realizar reparos rápidos em equipamentos e instalações. É essencial que também seja eficaz, garantindo a disponibilidade contínua dos equipamentos e prevenindo interrupções no funcionamento.

Nepomuceno (1999) destaca que todos os equipamentos e máquinas, independentemente de sua complexidade, simples ou altamente sofisticados, demandam reparos e manutenções em intervalos que variam de acordo com fatores como o tipo de equipamento, a frequência de uso e as características do material processado. Esses reparos são essenciais para garantir que a produção não seja impactada negativamente, preservando tanto a eficiência do processo quanto a qualidade dos produtos finais.

Branco Filho (2008) relaciona a presença da manutenção nas empresas ao desenvolvimento de serviços de reparo que devem ser realizados de maneira organizada, eficiente, eficaz e produtiva. O autor também enfatiza que cabe à Gerência de Manutenção definir metas, normas e procedimentos de trabalho, com o objetivo de melhorar o desempenho das máquinas, materiais e da mão de obra dentro da organização.

A partir das definições apresentadas, é possível entender a manutenção como a função responsável por garantir que os equipamentos produtivos estejam sempre disponíveis, buscando otimizar os custos. Nesse contexto, é fundamental distinguir entre manutenção como função e como processo. Cardoso e Quelhas (2016) fazem essa diferenciação ao definir a manutenção como função como a área da organização que oferece os serviços necessários para assegurar o funcionamento contínuo dos equipamentos. Já a manutenção como processo é vista como a utilização de recursos para assegurar que a disponibilidade seja alcançada para o cliente interno, que é a área de produção. Em outras palavras, refere-se às ações práticas de manutenção realizadas para garantir o desempenho dos sistemas.

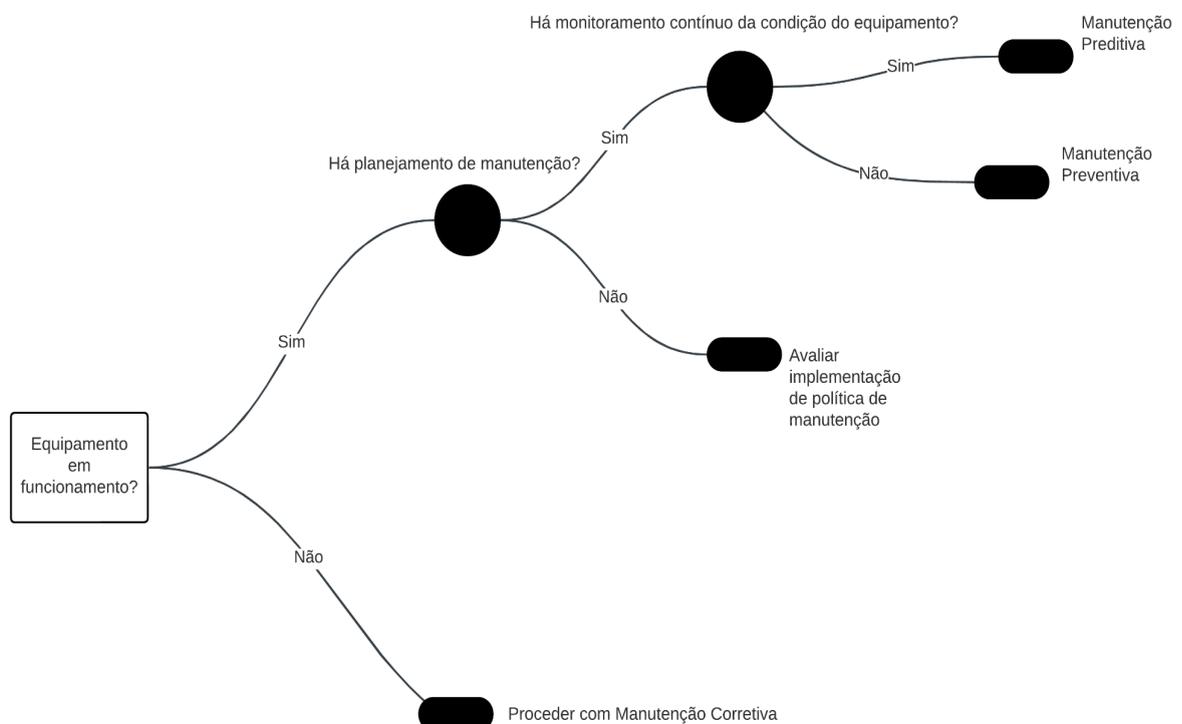
2.2 CLASSIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO

A manutenção é fundamental para assegurar que os sistemas produtivos operem de forma eficiente e sem interrupções, desempenhando um papel

indispensável no sucesso das operações industriais. Conforme destacado por Pinto e Xavier (2018), a manutenção pode ser organizada em categorias de acordo com o momento em que é realizada, a metodologia aplicada e o propósito que se deseja alcançar. Essa classificação não é apenas uma forma de organização, mas também um recurso estratégico para a gestão de ativos, ajudando a maximizar a eficiência e a longevidade dos equipamentos. Entre os principais tipos de manutenção, destacam-se a preventiva, a preditiva e a corretiva, que, apesar de terem abordagens distintas, trabalham em conjunto para garantir a confiabilidade e a sustentabilidade das operações.

Para facilitar o entendimento sobre como os diferentes tipos de manutenção são aplicados na prática, o fluxograma da Figura 1 apresenta um esquema simplificado de decisão. Ele ilustra o processo de escolha entre manutenção preventiva, preditiva ou corretiva, com base no estado do equipamento e na existência ou não de um planejamento prévio.

Figura 1 - Árvore de decisão de tipos de manutenção



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 1 propõe uma árvore de decisão que auxilia na classificação do tipo de manutenção a ser adotado, considerando tanto o estado atual do equipamento quanto a existência e natureza do planejamento de manutenção. O ponto de partida da análise é verificar se o equipamento está funcionando. Caso o equipamento não esteja em funcionamento, aplica-se a manutenção corretiva, caracterizada por ações reativas frente à falha já ocorrida.

Por outro lado, se o equipamento está operando normalmente, avalia-se a existência de um plano de manutenção. Na ausência de planejamento, é recomendada a adoção de uma política de manutenção que antecipe falhas e reduza a dependência de intervenções corretivas.

Quando há manutenção planejada, o próximo passo é identificar como são tomadas as decisões de intervenção:

- Se a decisão é baseada em monitoramento contínuo de variáveis de condição (como vibração, temperatura, ruído, etc.), trata-se de manutenção preditiva. Essa abordagem depende da instalação de sensores e da análise de dados em tempo real, permitindo intervenções somente quando sinais de degradação são detectados;
- Se, por outro lado, a decisão de intervenção é tomada com base em critérios definidos previamente, como tempo de calendário (idade), uso acumulado (por exemplo, horas de operação ou ciclos de trabalho), número de inspeções realizadas, substituição programada após K inspeções, critérios baseados em risco, entre outros, trata-se de manutenção preventiva. Esse tipo de manutenção é planejado antecipadamente, com base em políticas que não exigem monitoramento contínuo do estado físico do equipamento, embora possam considerar informações históricas para sua definição.

Por fim, é importante destacar que um mesmo componente pode estar sujeito a uma estratégia híbrida de manutenção, combinando diferentes abordagens ao longo de seu ciclo de vida. Por exemplo, sensores podem ser utilizados para monitorar continuamente sinais de degradação e acionar intervenções preditivas quando determinados limites forem atingidos. Além disso, o componente pode ser submetido a inspeções periódicas, que permitem avaliar sua condição em momentos específicos, mesmo na ausência de monitoramento contínuo. Caso essas inspeções não indiquem necessidade de intervenção, ainda assim pode haver uma substituição

preventiva com base em idade, uso acumulado ou número de inspeções realizadas. E, se eventualmente ocorrer uma falha inesperada, aplica-se a manutenção corretiva. Essa combinação permite maior flexibilidade e confiabilidade na tomada de decisão.

2.2.1 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva (MP) é uma abordagem estratégica e planejada, que visa evitar falhas nos equipamentos antes que elas se tornem problemas significativos. Ela se baseia, por exemplo, na realização de atividades como inspeções regulares, ajustes e trocas de peças, tudo de acordo com um cronograma pré-estabelecido. O principal objetivo é garantir que os equipamentos estejam sempre em condições ideais de funcionamento, evitando paradas inesperadas e garantindo a continuidade da produção (Basri *et al.*, 2017). Segundo Cardoso e Quelhas (2016), a MP é fundamental para assegurar a disponibilidade e confiabilidade dos ativos, otimizando os custos e prolongando a vida útil dos equipamentos.

De acordo com Slack *et al.* (2015), a prática da manutenção preventiva surgiu no início do século XX, impulsionada pela crescente necessidade de manter os processos produtivos em constante operação, sem interrupções. Com o tempo, ela se consolidou como uma das principais estratégias de gestão de ativos industriais, promovendo a confiabilidade dos sistemas e reduzindo consideravelmente o tempo de inatividade não planejado.

Entre os principais benefícios da manutenção preventiva estão a redução dos custos operacionais a longo prazo e a diminuição do impacto ambiental, uma vez que os equipamentos têm uma vida útil mais longa e são utilizados de maneira mais eficiente ou até mesmo remanufaturados (Santos; Cavalcante, 2022). Todavia, é de extrema importância o cuidado para que a manutenção preventiva não seja realizada de forma excessiva, pois a execução de procedimentos desnecessários pode gerar custos adicionais sem trazer benefícios reais, tornando-se uma prática ineficiente e onerosa. Conforme apontado por Silva *et al.* (2023), a otimização da manutenção preventiva reside no equilíbrio entre os custos dos procedimentos e os benefícios gerados, buscando um ponto em que a disponibilidade e confiabilidade dos

equipamentos sejam maximizadas, sem comprometer a eficiência econômica da operação.

2.2.2 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva também conhecida como Manutenção Baseada em Condições (CBM) surge como uma evolução das práticas tradicionais de manutenção, especialmente a partir da década de 1980, quando o avanço das tecnologias de monitoramento abriu novas possibilidades. Seu objetivo principal é antecipar falhas antes que elas se tornem críticas, utilizando dados em tempo real coletados por sensores, análises vibracionais, termografia e outros métodos especializados (Zonta *et al.*, 2020; Achouch *et al.* 2022). De acordo com Moura (2017), essa abordagem permite identificar problemas potenciais com uma precisão muito maior, possibilitando intervenções mais assertivas e eficazes.

Essa estratégia de manutenção permite identificar falhas incipientes e agir de forma preventiva, proporcionando diversos benefícios, como a redução de paradas não programadas, o aumento da vida útil dos equipamentos, a otimização dos custos de manutenção e a melhoria da segurança operacional (Lopes, 2021). Como as intervenções são realizadas com base nas condições reais dos equipamentos, é possível agir de forma mais direcionada, minimizando custos e evitando a perda de produtividade (Mobley, 2018). Porém, sua implementação exige um investimento inicial considerável, não só em tecnologias avançadas, mas também na capacitação da equipe para operar e interpretar os dados de monitoramento. Apesar desse custo inicial, os ganhos a longo prazo podem superar amplamente o investimento, tornando a manutenção preditiva uma estratégia valiosa para empresas que buscam aumentar a confiabilidade e a vida útil dos seus ativos.

É importante destacar que, em diversas situações, a manutenção preditiva também é considerada uma forma de manutenção preventiva (Lee; Cha, 2016). Isso ocorre porque, ao monitorar a condição do equipamento, a manutenção preditiva acaba incorporando um caráter preventivo, uma vez que busca identificar falhas antes que elas ocorram, evitando paradas não planejadas. Assim, embora a manutenção preditiva se concentre em avaliar as condições do ativo, ela também visa prevenir falhas.

2.2.3 Manutenção corretiva

A Manutenção Corretiva (MC) é realizada após a ocorrência de uma falha em um equipamento, com o objetivo de restaurar o seu funcionamento normal e minimizar os impactos da interrupção na produção (Kardec, 2015). Apesar de ser o tipo de manutenção mais antigo, originando-se durante a Revolução Industrial, ela ainda é bastante utilizada, principalmente em casos onde a falha não afeta gravemente o processo produtivo ou quando os custos de outras estratégias de manutenção são considerados elevados demais. Segundo Ribeiro *et al.* (2022), a MC, embora reativa, continua sendo uma estratégia válida em cenários específicos, como em equipamentos não críticos ou em situações de falhas inesperadas, desde que sua execução seja rápida e eficiente para evitar maiores prejuízos.

Um dos principais atrativos da manutenção corretiva é o seu baixo custo inicial, já que não requer um planejamento prévio nem a aquisição de tecnologias complexas. No entanto, ela traz consigo alguns desafios. Devido à sua natureza reativa, a MC pode gerar custos mais elevados a longo prazo, principalmente em decorrência do tempo de inatividade dos equipamentos e das perdas de produção (Kardec, 2015). Além disso, o desgaste acelerado dos ativos pode diminuir sua vida útil, gerando a necessidade de reparos mais frequentes e onerosos. Como destacado por Oliveira (2019), a manutenção corretiva é, portanto, uma solução de curto prazo que, sem uma estratégia bem planejada, pode se tornar uma prática ineficiente e cara para as empresas.

A Tabela 2 oferece uma visão geral dos principais aspectos que distinguem os três tipos de manutenção: preventiva, preditiva e corretiva. Além de complementar os conceitos apresentados ao longo do texto, trazendo informações extras, como a complexidade de implementação e os efeitos sobre o ciclo de vida dos equipamentos. Com isso, proporciona uma análise mais completa e estratégica, ajudando a entender melhor as implicações de cada tipo de manutenção no contexto operacional e financeiro.

Tabela 2 – Tabela comparativa dos tipos de manutenção

ASPECTO	MANUTENÇÃO CORRETIVA	MANUTENÇÃO PREVENTIVA	MANUTENÇÃO PREDITIVA
Início Histórico (Consolidação)	Revolução Industrial (Final do século XVIII e início do século XIX)	Século XX	Década de 1980
Objetivo Principal	Restaurar após a falha	Prevenir falhas	Antecipar falhas com base em dados
Base de atuação	Ocorrência de falhas	Cronograma predefinido	Condições reais do equipamento
Complexidade de Implementação	Baixa: atuação reativa e simples	Média: requer planejamento e recursos moderados	Alta: demanda sensores, softwares e treinamento
Impacto no Ciclo de Vida	Pode reduzir significativamente devido a danos contínuos	Prolonga moderadamente a vida útil	Maximiza o ciclo de vida dos ativos
Custos Operacionais	Altos devido a paradas inesperadas	Moderados, se bem planejados	Altos inicialmente, mas reduzidos no longo prazo
Risco de Falhas Críticas	Alto	Baixo	Muito baixo

Fonte: Adaptado de Trojan e Marçal (2017).

2.3 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

Nesta seção, será apresentado duas importantes classes de políticas de manutenção amplamente utilizadas nas organizações: as "Ações de Manutenção Baseadas no Tempo" e as "Ações de Manutenção Baseadas na Condição". Cada uma dessas abordagens tem suas particularidades, que as tornam mais adequadas para diferentes situações, ajudando a melhorar a eficácia e a eficiência dos sistemas de produção.

2.3.1 Ações de manutenção baseadas no tempo

As ações de Manutenção Baseadas no Tempo (*Time-Based Maintenance* - TBM) envolvem a execução de tarefas de manutenção em intervalos fixos, independentemente do estado atual dos equipamentos (Ahmad; Kamaruddin, 2012). O conceito central dessa abordagem é realizar, por exemplo, ações de manutenções periódicas programadas com base em intervalos de tempo preestabelecidos, como dias, meses ou horas de operação. Isso visa evitar falhas inesperadas e garantir que os equipamentos operem de forma eficiente e segura ao longo do tempo (Kim; Ahn; Yeo, 2016). Conforme destacado por Andersen e Nielsen (2025), a TBM é uma estratégia amplamente utilizada em diversos setores industriais, especialmente em sistemas multi-componentes, onde a substituição preventiva de peças e componentes pode prevenir falhas em cascata e otimizar o desempenho geral do sistema.

Essa estratégia é frequentemente utilizada em ambientes onde o risco de falhas catastróficas é alto (Apeland; Aven, 2000) ou onde os equipamentos têm um histórico comprovado de desgaste regular (Zhao, 2003; Omshi; Shemehsavar; Grall, 2024). A principal vantagem da manutenção baseada no tempo é a previsibilidade. Por exemplo, se um fabricante de equipamentos determina que uma determinada máquina deve passar por uma inspeção ou troca de peças a cada 1000 horas de operação, esse intervalo é rigorosamente seguido, independentemente de o equipamento apresentar sinais de falha ou não. As ações de Manutenção Baseada na Condição (*Condition-Based Maintenance* - CBM) envolvem a execução de tarefas de manutenção com base no monitoramento contínuo das condições reais de operação dos equipamentos, permitindo identificar falhas incipientes e agir de forma preventiva (Lopes, 2021).

A importância da manutenção baseada no tempo é clara em contextos de produção que exigem alta disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, como em linhas de produção, transportes industriais e outras operações críticas. Segundo Santos e Silva (2022), essa abordagem é fundamental para garantir a continuidade da operação e prevenir paradas inesperadas que poderiam gerar grandes prejuízos.

2.3.2 Ações de manutenção baseadas na condição

Diferente da manutenção baseada no tempo, que segue intervalos pré-estabelecidos, essa abordagem adapta-se ao comportamento do equipamento, permitindo que a manutenção seja realizada apenas quando necessário, com base em dados de diagnóstico, como vibração, temperatura, pressão, entre outros parâmetros operacionais (Prajapati; Bechtel; Ganesan, 2012). Segundo Almeida *et al.* (2022), a CBM, impulsionada pelos avanços tecnológicos em sensores e análise de dados, tem se mostrado uma estratégia promissora para otimizar a gestão de ativos, reduzir custos e aumentar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos industriais.

O conceito central da manutenção baseada na condição é o monitoramento em tempo real das condições do equipamento, utilizando sensores e tecnologias de diagnóstico para detectar sinais precoces de falhas e agir de forma preventiva (Mobley, 2018). Quando os dados indicam que um componente ou sistema está se aproximando de uma falha iminente ou fora de suas condições normais de operação, a manutenção é acionada, evitando paradas inesperadas e aumentando a vida útil do equipamento (Smith, 2019). Essa abordagem é frequentemente usada em máquinas e sistemas críticos, como turbinas, compressores e motores, onde falhas podem resultar em danos significativos e custos elevados.

A principal vantagem da manutenção baseada na condição é a redução de custos com manutenções desnecessárias, já que a manutenção só ocorre quando o equipamento realmente necessita de intervenção. Além disso, ela aumenta a disponibilidade e a confiabilidade dos sistemas, uma vez que os problemas podem ser identificados e corrigidos antes que se tornem falhas catastróficas. Segundo Ferreira e Almeida (2020), a manutenção baseada na condição oferece um equilíbrio entre a manutenção preventiva (baseada no tempo) e a manutenção corretiva, proporcionando maior eficiência operacional e redução de custos.

Destaca-se que a CBM também pode ser aplicada em situações nas quais o equipamento não é monitorado de forma contínua. Nesses casos, a avaliação de sua condição ocorre em intervalos específicos, que podem ser regulares ou irregulares, como frequentemente observado nos modelos baseados no conceito de *delay-time* (Christer, 1999).

2.4 MODELO DELAY TIME

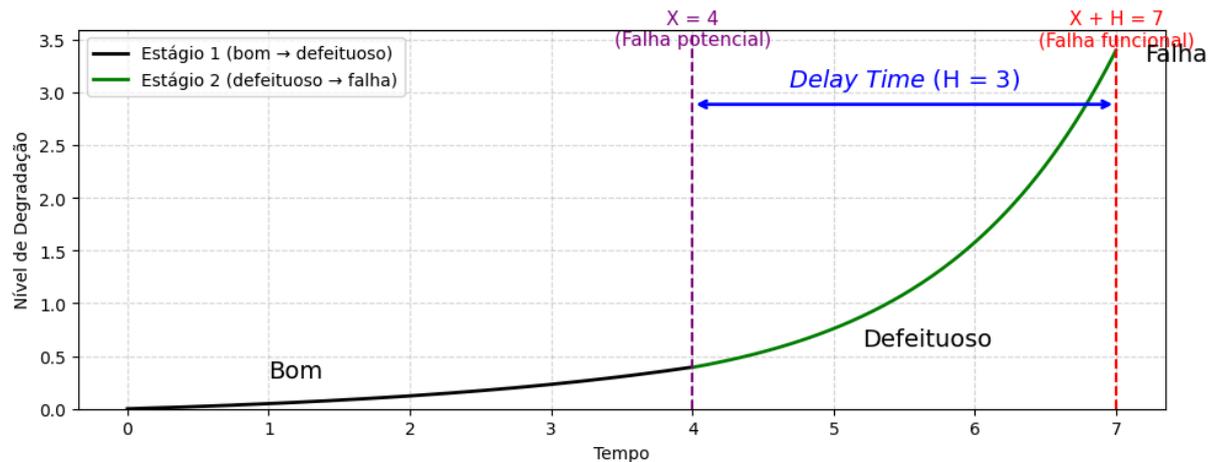
O *Delay Time Model* (DTM) refere-se ao intervalo entre o momento em que uma falha potencial se torna detectável e o instante em que essa falha efetivamente causa a parada do equipamento ou uma falha funcional significativa. Em outras palavras, trata-se do período compreendido entre o surgimento do defeito e a ocorrência da falha, considerando, na maioria das vezes, um processo de degradação em dois estágios (Christer, 1999). Compreender e monitorar esse intervalo é essencial para implementar estratégias de manutenção que previnam falhas inesperadas e otimizem a disponibilidade dos ativos.

Segundo Christer (1999), a análise de *Delay Time* tem sido fundamental para modelar problemas de decisão em manutenção, auxiliando na determinação da frequência ideal de inspeções e na alocação eficiente de recursos para evitar falhas críticas. Essa abordagem é amplamente utilizada para minimizar custos operacionais, melhorar a confiabilidade dos equipamentos e reduzir paradas não planejadas.

Além disso, a implementação eficaz do *Delay Time* na manutenção preditiva tem sido amplamente beneficiada pelo avanço das tecnologias de monitoramento, como sensores inteligentes, Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (IA). Segundo um estudo publicado pela Mecalux (2022), a manutenção preditiva pode reduzir o tempo de inatividade de uma máquina entre 30% e 50%, além de aumentar sua vida útil em até 40%. Essa abordagem permite que falhas potenciais sejam detectadas antecipadamente, garantindo que intervenções ocorram antes que o problema se torne crítico (MECALUX, 2022).

A Figura 2 ilustra o conceito de *Delay Time*.

Figura 2 - Conceito Delay Time



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 2 apresenta dois estágios distintos de degradação. No primeiro estágio, o componente encontra-se em bom estado, com uma degradação lenta e progressiva, até o tempo X , quando ocorre a chegada do defeito (falha potencial). A partir desse ponto, inicia-se o segundo estágio, em que a degradação se acelera até o tempo $X+H$, instante em que ocorre a falha funcional. O intervalo H , compreendido entre o defeito e a falha, é denominado *delay-time* e representa a janela de oportunidade para ações de manutenção preventiva.

No exemplo da Figura, tanto o tempo até o defeito (X) quanto o delay time (H) são representados por distribuições com comportamento exponencial, o que permite capturar a natureza aleatória e progressiva da degradação. No entanto, é importante destacar que outras distribuições também podem ser adotadas para representar esses intervalos, a depender das características do sistema analisado e dos dados empíricos disponíveis. O modelo *delay-time* é especialmente útil quando se tem acesso a inspeções periódicas ou sistemas de monitoramento que permitem identificar defeitos antes da ocorrência da falha funcional, viabilizando uma gestão mais eficiente da manutenção (Wang, 2012).

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, será realizado o estudo de caso focado no acompanhamento do cenário atual de uma indústria produtora de sacolas plásticas. Serão analisadas as características do ambiente empresarial para identificar e definir a política de manutenção mais adequada às necessidades específicas da organização.

3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Para garantir a confidencialidade e proteger a identidade da empresa estudada, informações sensíveis, como nome e alguns dados específicos, foram omitidas ou apresentadas de forma genérica. Apesar disso, os aspectos analisados e as conclusões obtidas permanecem fiéis à realidade observada, assegurando a integridade do estudo.

O grupo, de origem familiar, foi fundado há 40 anos na região agreste de Pernambuco. Sua trajetória começou com o visionário fundador que iniciou a produção de embalagens plásticas flexíveis. Atualmente, o grupo emprega mais de 240 colaboradores diretos e cerca de 50 indiretos, operando em duas plantas industriais.

No setor de embalagens plásticas, o grupo destaca-se por suas duas unidades produtivas. A primeira planta é especializada na fabricação de sacolas, filmes e embalagens destinadas a diversos setores, como alimentício, construção civil e automotivo, entre outros.

A segunda planta do grupo é dedicada à produção de sacolas plásticas para uso geral, utilizando material 100% derivado de plástico reciclado. Atualmente, o grupo tem uma presença consolidada nos nove estados do Nordeste, além do Amazonas e Pará, atendendo clientes de renome como Baterias Moura, Grupo ASA, Bom Leite, Parex Group, entre outros.

Entre os princípios e valores que norteiam o grupo, destacam-se a autorresponsabilidade, a honestidade e o respeito. Com uma cartilha de valores alinhada às suas diretrizes, o grupo almeja se tornar uma referência no Nordeste na produção de embalagens flexíveis. Internamente, a empresa valoriza a colaboração

e mantém uma forte sinergia entre seus colaboradores, promovendo um ambiente harmonioso e comprometido com o crescimento coletivo.

A unidade escolhida para a realização deste trabalho está há mais de 22 anos no mercado, atendendo de forma ampla à demanda por embalagens plásticas recicladas. Sua produção inclui sacolas, sacolões e sacos para silagem, disponíveis em diversos tamanhos e nas cores azul e preto. A fábrica conta com mais de 60 colaboradores diretos e opera ininterruptamente, funcionando 24 horas por dia, 7 dias por semana. Os operadores seguem uma escala de turnos 12x36, enquanto os funcionários administrativos e a equipe de manutenção elétrica e mecânica trabalham em horário comercial. Na figura 3 é possível visualizar a sacola reciclada nos 3 tamanhos mais comercializados.

Figura 3 – Tamanhos das sacolas recicladas



Fonte: Autoria própria (2025).

A unidade conta com um total de 17 máquinas de grande porte, além de 3 equipamentos complementares, que estão detalhados na tabela 3.

Tabela 3 – Escopo das máquinas por setor

SETOR	QUANTIDADE	MÁQUINA
LAVAGEM	1	ESTEIRA
	1	MOINHO
	1	LAVADORA
	3	SECADORA
AGLUTINAÇÃO	2	AGLUTINADOR
RECUPERAÇÃO	2	RECUPERADORA
	2	PICOTADOR (COMPLEMENTO)
EXTRUSÃO	4	EXTRUSORA
	1	AGLUTINADOR (COMPLEMENTO)
CORTE E SOLDA	3	SACOLEIRA

Fonte: Autoria própria (2025).

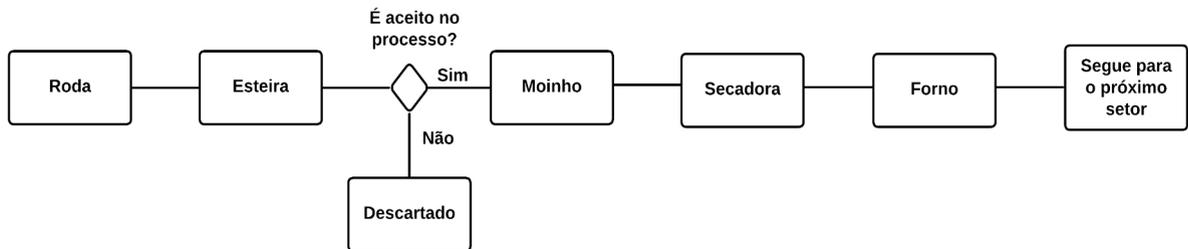
O processo de reciclagem começa com o recebimento da matéria-prima, composta por sacolas plásticas usadas adquiridas de diversos fornecedores. Essas sacolas são classificadas em diferentes categorias: branca, colorida, azul, mista e apara (resíduos gerados pela própria fábrica). O material é recebido em bags, fardos ou de forma avulsa. Após a triagem inicial no pátio, o empilhador transporta o material para a primeira etapa do processo.

Na etapa inicial, um operador alimenta o material na roda, onde ele gira, permitindo que terra, pedras e pequenos objetos indesejados sejam eliminados. A roda também é equipada com ímãs para remover pregos e fragmentos de metal. Em seguida, o material é transferido para uma esteira, onde quatro operadores realizam a catação, separando os itens que podem prosseguir no processo daqueles que devem ser descartados.

Após a catação, o material é conduzido por uma esteira diagonal até o moinho, onde é triturado e lavado, resultando em pequenos pedaços. Esses fragmentos passam então pela secadora e pelo forno, que têm a função de garantir

que o material esteja completamente seco antes de seguir para a próxima etapa do processo, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do processo de reciclagem



Fonte: Autoria própria (2025).

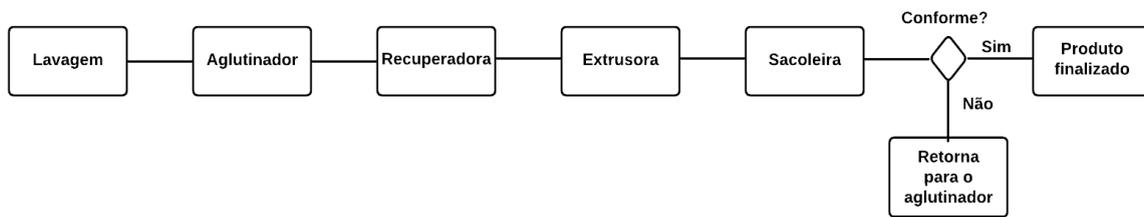
No processo de produção, o material reciclado é direcionado para o setor seguinte, o aglutinador. A fábrica dispõe de dois aglutinadores, um manual e outro automático, que podem operar simultaneamente. O aglutinador funciona como um grande "liquidificador", reduzindo o material a pedaços ainda menores, deixando-o aglutinado.

A etapa seguinte ocorre na recuperadora, onde o material é aquecido até derreter, assumindo uma consistência semelhante a "macarrão". Esse material é então cortado em pequenos grânulos ao final desse setor.

Na próxima etapa, os grânulos seguem para a extrusora. Nesse setor, recebem pigmentos e essência antes de serem inseridos na máquina. O processo envolve um aquecimento em alta temperatura, que derrete o material. Ele é transportado pela rosca sem fim até o cabeçote, onde é inflado e moldado em forma de balão ao passar pela matriz com a aplicação de ar. Esse processo culmina na formação de bobinas.

Finalmente, no último setor, conhecido como sacoleira, as bobinas passam pelo corte e solda, realizados por facas quentes na máquina. Esse processo simultaneamente corta e solda o material, definindo o formato e o tamanho da sacola conforme a programação da máquina. Sacolas que atendem aos padrões de qualidade são consideradas produtos acabados, enquanto aquelas com falhas retornam ao aglutinador para reprocessamento. O processo de produção pode ser visto através do fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do processo de produção



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA CRÍTICO

O sistema de reciclagem abordado tem como objetivo a separação e o processamento de materiais para garantir que, no final do processo, se obtenha uma "mistura ideal", ou seja, um material de qualidade para ser utilizado nas próximas etapas. O processo envolve várias etapas críticas, como a alimentação do material na roda giratória para remoção de impurezas, a catação manual para separar os itens indesejados, a trituração e lavagem do material, e, finalmente, a secagem do material.

A secadora é, sem dúvida, o sistema mais crítico do processo de reciclagem, pois desempenha um papel fundamental na garantia da qualidade do produto final. O material precisa ser seco de maneira precisa antes de ser transferido para as etapas subsequentes do processo. Se o material não atingir o nível de secagem adequado, o produto acabado apresentará marcas de linha d'água, o que compromete sua aparência e funcionalidade, além de afetar sua elasticidade. Por outro lado, se o material for excessivamente seco, ele pode se tornar frágil e se rasgar, o que comprometeria a qualidade e a integridade do produto. Na Figura 6, é possível visualizar o processo de fabricação da secadora, evidenciando as etapas de montagem e construção do equipamento.

Figura 6 – Secadora em processo de fabricação



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, a secadora é tão essencial para o fluxo de produção que, caso haja qualquer parada ou falha em uma das unidades, toda a linha de produção é interrompida. Isso ocorre porque, sem o material que passa por ela, não há material suficiente para ser processado nas fases seguintes, o que leva à paralisação da fábrica como um todo. Esse impacto direto na produção coloca a secadora como o ponto crítico que precisa de uma atenção constante para garantir a continuidade da operação e evitar prejuízos significativos.

A secadora no processo de reciclagem é composta por três unidades que operam em sequência. Cada secadora recebe uma carga de material com características distintas de umidade. A primeira secadora recebe o material mais molhado, enquanto a última recebe um material já parcialmente seco. Para garantir que o processo de secagem ocorra de maneira eficiente e contínua, todas as três secadoras precisam estar funcionando corretamente. As secadoras em funcionamento podem ser vistas na Figura 7.

Figura 7 – Secadoras em uso



Fonte: Autoria própria (2025).

Um dos principais desafios enfrentados na operação das secadoras é a variação do material que é alimentado nelas. O material processado pode variar quanto à limpeza (mais sujo ou mais limpo), umidade (muito molhado ou mais seco) e outros fatores. Essas variações podem impactar diretamente no desempenho das secadoras, que precisam se adaptar às características do material para garantir um processo eficiente.

No entanto, em geral, a política de manutenção atualmente aplicada às secadoras é predominantemente corretiva. Ela geralmente é realizada devido à presença de impurezas no sistema e fatores externos, como a ação de terceiros ou falhas inesperadas, que podem causar quebras antes dos prazos previstos. Essa instabilidade nos ciclos de manutenção, muitas vezes, torna o planejamento mais desafiador. Na Figura 8, é possível visualizar a secadora passando por um serviço de manutenção.

Figura 8 – Equipe de manutenção realizando um serviço na secadora



Fonte: Autoria própria (2025).

A criticidade da secadora torna-se ainda mais evidente ao considerar seu histórico de falhas, especialmente em relação aos rolamentos, que representam uma das principais causas de paradas operacionais. A falha desses componentes pode comprometer não apenas o funcionamento da secadora, mas também outros elementos essenciais do sistema, aumentando os custos de manutenção e o tempo de inatividade. Além disso, qualquer interrupção na operação da secadora impacta diretamente o fluxo produtivo, podendo levar à paralisação de toda a fábrica, resultando em atrasos na produção e prejuízos operacionais significativos. Dessa maneira, a escolha da secadora como equipamento crítico justifica-se tanto por sua relevância no processo produtivo quanto pela necessidade de estratégias de manutenção que garantam sua confiabilidade e minimizem os riscos de falha.

3.3 COMPONENTE CRÍTICO

Na secadora, o rolamento é um dos componentes mais críticos, pois seu desempenho afeta diretamente o funcionamento das secadoras, e, conseqüentemente, o desempenho de toda a linha de produção. Cada secadora possui dois rolamentos principais, totalizando seis rolamentos no sistema. O histórico de manutenção evidencia que as paradas operacionais da secadora ocorrem, em grande parte, devido a falhas nesses rolamentos, tornando este componente um ponto vulnerável no processo produtivo.

Essas falhas, quando ocorrem, podem gerar impactos significativos, não apenas interrompendo a operação da secadora, mas também comprometendo outros componentes fundamentais, como eixos, polias e correias. Além disso, o tempo de inatividade causado por uma falha nos rolamentos pode resultar em atrasos na produção e aumento nos custos de manutenção corretiva, uma vez que, dependendo da severidade do dano, pode ser necessário substituir não apenas o rolamento, mas também peças associadas. Na Figura 9, é possível visualizar o rolamento em sua condição lacrada e fora de uso, evidenciando sua estrutura e forma de proteção antes da operação.

Figura 9 – Rolamento utilizado na secadora



Fonte: SKF (2025).

Quando um rolamento apresenta falhas, o impacto na produção é significativo. A falha pode fazer com que a secadora pare de funcionar ou, em casos mais graves, danifique outros componentes da máquina, como o eixo e a estrutura da secadora. Em uma situação extrema, uma falha de rolamento pode comprometer todo o sistema de produção, gerando uma parada que, embora não seja imediata nos setores subsequentes, causa uma redução gradativa na produção. Com o tempo, a falta de material para ser processado leva à paralisação de setores, comprometendo o abastecimento da fábrica.

A manutenção do rolamento é de natureza corretiva e é necessária quando uma falha ocorre inesperadamente, afetando o desempenho da secadora e, por consequência, interrompendo a produção. Quando o retentor está em bom estado, o tempo de manutenção é menor.

Embora o custo do rolamento em si seja relativamente baixo, variando entre R\$250 e R\$400 por unidade, o impacto econômico de uma falha de rolamento é muito maior. O custo não está apenas no valor do componente, mas no custo por hora de máquina parada. Cada hora de parada da secadora pode resultar em uma perda significativa de produção, já que a linha de produção deixa de processar material. A produtividade do setor é de cerca de 600 kg/h, e a parada pode durar até 2,5 horas para a troca do rolamento, mais o tempo necessário para reaquecer a máquina e iniciar a produção novamente. Durante o processo de reaquecimento, que pode levar horas, o consumo de energia é consideravelmente maior do que o consumo normal de operação.

A troca de rolamento exige um processo cuidadoso, dado o impacto que uma troca inadequada pode ter no funcionamento da máquina. Durante a troca, é necessário substituir os dois rolamentos, revisar os eixos, verificar as correias e realizar a lubrificação com graxa especial. Esse serviço pode durar até 2,5 horas. A graxa utilizada é uma graxa especial, com resistência a altas temperaturas e água, com custo de R\$300 por kg. A cada 7 kg de graxa, o consumo dura cerca de 2 meses e meio, representando mais um custo recorrente do processo de manutenção.

Além disso, um problema recorrente durante a troca de rolamentos é o danos ao retentor, que é danificado durante a substituição. Isso pode gerar falhas

adicionais, prolongando ainda mais o processo de manutenção e aumentando os custos.

Uma falha no rolamento também pode ter consequências graves para a estrutura da secadora. Se o rolamento danificado causar danos no eixo ou em outros componentes, pode ser necessário realizar reparos ou até a substituição de partes da estrutura, o que gera custos adicionais elevados. A fabricação de novas peças e a instalação de uma estrutura substituta pode ser um processo caro e demorado, aumentando o impacto financeiro de uma falha no rolamento.

3.4 ROLAMENTO

De acordo com as informações do fabricante, os rolamentos rígidos de esferas de uma carreira com vedações ou proteções (Rolamento 6314-2RS1) são altamente versáteis e apresentam baixo atrito, o que contribui para a redução de ruído e vibração. Esse conjunto de características os torna ideais para operações em altas velocidades de rotação. Além disso, esses rolamentos são capazes de suportar tanto cargas radiais quanto axiais em ambas as direções, oferecendo grande flexibilidade. A sua construção simples e robusta facilita a montagem e, ao mesmo tempo, reduz as necessidades de manutenção em comparação com outros tipos de rolamentos. A vedação integral, por sua vez, é um recurso que prolonga significativamente a vida útil do rolamento, pois mantém o lubrificante em seu interior e impede a entrada de contaminantes. Na Figura 10, é possível visualizar o rolamento internamente, permitindo a observação de seus componentes e estrutura em detalhes.

Figura 10 – Rolamento 6314-2RS1

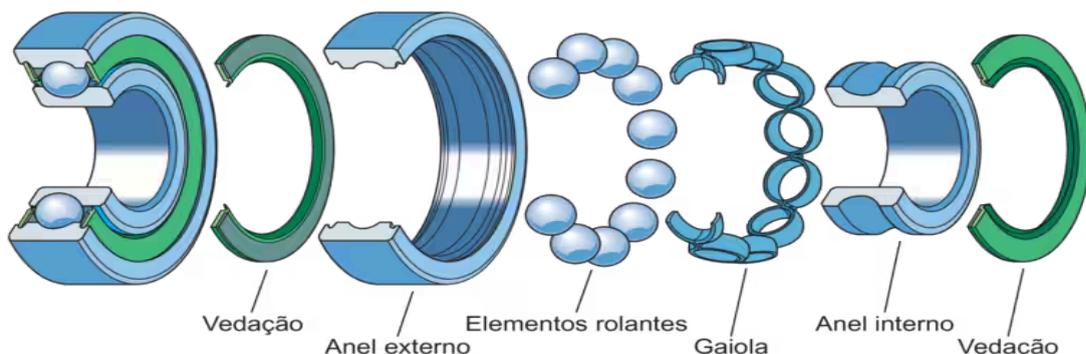


Fonte: SKF (2025).

Os rolamentos têm a função de suportar e direcionar, com o mínimo de atrito, os componentes rotativos ou oscilantes, como eixos e rodas, nas máquinas, transferindo as cargas entre suas partes. Eles proporcionam alta precisão e baixo atrito, o que possibilita altas velocidades de rotação, ao mesmo tempo que minimizam o ruído, o calor, o consumo de energia e o desgaste. São componentes econômicos e de fácil substituição, geralmente fabricados conforme normas de dimensões nacionais e internacionais.

Um rolamento típico é constituído por vários componentes essenciais, que incluem um anel interno, um anel externo, esferas ou rolos que funcionam como elementos rolantes e uma gaiola. A ilustração na Figura 11 apresenta esses elementos de forma detalhada.

Figura 11 – Componentes do rolamento



Fonte: SKF (2025).

Os rolamentos desempenham um papel fundamental em equipamentos rotativos, sendo essenciais para o bom funcionamento das máquinas. Muitas vezes, o estado de um rolamento reflete diretamente a eficiência da operação de um equipamento. No entanto, em algumas situações, os rolamentos podem falhar. Quando isso ocorre, é importante saber como proceder para identificar e corrigir o problema.

Existem várias causas possíveis para as falhas nos rolamentos. Fatores como desalinhamento, desbalanceamento, folgas excessivas e atrito inadequado podem ser transmitidos ao rolamento, resultando em danos. Como os rolamentos são frequentemente componentes cruciais dos sistemas, a sua falha pode levar a paradas inesperadas, danos em peças adjacentes e custos elevados com reparos.

Com o aumento da preocupação em prevenir falhas recorrentes em rolamentos, a ISO (Organização Internacional de Normalização) desenvolveu uma metodologia para classificar esses tipos de falhas, que está descrita na norma ISO 15243:2004. Essa norma estabelece seis categorias principais de falhas e 16 subcategorias, todas relacionadas a danos que ocorrem após a fabricação dos rolamentos. O foco da norma está em características visíveis nos elementos rolantes, nas pistas e em outras superfícies funcionais, além de identificar os mecanismos que causam cada tipo de falha.

Na prática, a maioria dos danos observados em rolamentos pode ser atribuída aos seis grupos principais de falhas, bem como aos diversos subgrupos descritos na Tabela 4. Essa abordagem oferece uma maneira estruturada e detalhada de entender as falhas, o que facilita a identificação das causas e a implementação de soluções adequadas.

Tabela 4 – Classificação ISO do dano no rolamento e dos modos de falha

GRUPO PRINCIPAL	SUBGRUPO
FADIGA	Fadiga subsuperficial Fadiga iniciada na superfície
DESGASTE	Desgaste abrasivo Desgaste adesivo
CORROSÃO	Corrosão por umidade Corrosão por atrito Corrosão por contato Falso brinelamento
EROSÃO ELÉTRICA	Tensão excessiva Fuga de corrente
DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	Sobrecarga Endentações por partículas Endentações por manuseio
FRATURA E TRINCA	Fratura forçada Fratura por fadiga Trinca térmica

Fonte: Adaptado de SKF (2025).

3.5 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA

Propõe-se uma política de manutenção para o rolamento, componente crítico previamente identificado. Embora políticas de manutenção geralmente sejam desenvolvidas para sistemas compostos por múltiplos componentes, como abordado em Vergin e Scriabin (1977), em alguns casos, é mais eficaz focar em um único componente, pois a falha deste pode comprometer a funcionalidade total do sistema. Assim, quando o objetivo for gerenciar um único componente, a modelagem é tecnicamente considerada como projetada para um sistema composto por esse único componente. Isso implica que, mesmo em sistemas com múltiplos componentes, caso as falhas mais recorrentes estejam associadas a um

componente específico, o sistema pode ser tratado como um único componente (ou possuindo um único) para fins de modelagem (Santos; Cavalcante; Ribeiro, 2021).

No que tange à estratégia a ser considerada, supõe-se que o componente será submetido a uma política de manutenção híbrida. Ela é híbrida porque combina dois tipos de ações: inspeções periódicas a cada intervalo de tempo T e substituição preventiva na idade KT . A adoção de uma substituição preventiva na K -ésima inspeção é justificada pelo fato de que, a partir deste ponto, o risco de falha do componente tende a aumentar, o que torna vantajoso realizar a substituição antes que a falha ocorra. Isso garante que o sistema não seja afetado por falhas inesperadas, que poderiam comprometer sua operação, e possibilita que a substituição preventiva seja realizada com base em um intervalo de tempo conhecido, evitando surpresas. Assim, ao contrário dos modelos baseados exclusivamente em inspeções, que só agem após a detecção de um defeito (Jia; Christer, 2002; Rodrigues; Cavalcante; Alberti, 2023), a modelagem proposta aqui também inclui a substituição preventiva. Essa abordagem busca minimizar o impacto das falhas, agindo de forma antecipada para garantir a continuidade operacional. Vale destacar que as inspeções são modeladas como perfeitas, ou seja, assume-se que, quando realizadas, todos os defeitos, caso existam, são detectados com total precisão, sem falhas no processo de diagnóstico, o que assegura a confiabilidade da detecção.

Modelos híbridos também foram abordados na literatura (Scarf *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2024), mas este trabalho acrescenta uma característica importante e inovadora: a consideração de informações obtidas por meio de manutenção preditiva. Um sensor específico pode indicar que o componente apresenta defeito. A aplicação de sensores para apoiar o processo de gerenciamento de um ativo tem se tornado uma tendência forte (Kaiser; Gebraeel, 2009). Esses sensores, ao detectar sinais precoces de defeito, permitem uma intervenção antes que o problema evolua para uma falha, proporcionando maior controle sobre o processo produtivo e reduzindo a necessidade de manutenções emergenciais, que podem ser mais caras e disruptivas.

Contudo, assume-se que o sensor não é totalmente confiável. Embora ele tenha a vantagem de poder antecipar a identificação do estado defeituoso, sua precisão nem sempre é garantida. Em outras palavras, a informação fornecida pelo sensor pode ser afetada por problemas de qualidade, como variações na calibração

ou interferências térmicas, que são comuns em sensores de temperatura. Isso implica que o sensor pode induzir duas possibilidades:

- I. Como o sensor não é perfeito, ele pode sinalizar um defeito que ainda não se manifestou, resultando em ações prematuras de manutenção (falso positivo). Assim, assume-se que a indicação de um defeito pelo sensor ocorre de acordo com um processo de Poisson com taxa λ_z ;
- II. Caso o componente realmente entre em estado defeituoso, há uma probabilidade β de o defeito ser identificado imediatamente pelo sensor.

A chance de identificar o defeito de forma imediata está relacionada ao fato de que, quando o defeito ocorre, ele geralmente gera sinais detectáveis com rapidez, que o sensor consegue captar, mas isso depende da natureza do defeito e da sensibilidade do sensor.

3.6 CRITÉRIO DE DECISÃO E MODELAGEM

Com base na política de manutenção previamente descrita, é possível identificar que o modelo proposto terá duas variáveis de decisão:

T : Intervalo de tempo entre inspeções periódicas;

K : Número de ações de manutenção, onde $(K - 1)$ é o número máximo de inspeções, sabendo que em KT haverá uma substituição preventiva.

O critério de decisão a ser considerado será a taxa de custo (função objetivo), representada por $TC(KT)$, que reflete o custo de longo prazo por unidade de tempo. O objetivo principal é minimizar essa taxa de custo, o que envolve a escolha adequada de T e K para equilibrar os custos com manutenção e falhas, garantindo ao mesmo tempo a confiabilidade do sistema. Conforme mencionado anteriormente, a modelagem será baseada no Teorema da Recompensa da Renovação, que é uma técnica amplamente utilizada para modelar sistemas estocásticos (Ross, 1996), especialmente aqueles que envolvem ciclos de manutenção ou renovação periódica, como é o caso da política de manutenção descrita.

O Teorema da Recompensa da Renovação permite modelar sistemas que operam em ciclos, nos quais a "renovação" ou substituição de um componente ocorre após um certo intervalo de tempo ou após um determinado número de falhas. Esse teorema fornece uma maneira de calcular o valor esperado da "recompensa" (neste caso, o custo) por unidade de tempo, considerando a distribuição de

probabilidades das diferentes durações dos ciclos e os custos associados a cada um deles (Yao; Zhou, 2017; Cha; Finkelstein, 2018).

Modelar políticas de manutenção com o Teorema da Recompensa da Renovação tem sido uma prática comum porque ele permite uma análise precisa do custo de longo prazo de uma política de manutenção, levando em conta as probabilidades de falhas e o tempo de operação de cada componente antes que uma intervenção seja necessária (Barlow e Proschan, 1965). Além disso, ao integrar a expectativa do número de renovações e os custos associados a cada ciclo, esse teorema ajuda a prever com precisão os custos totais ao longo do tempo, considerando as diferentes combinações de falhas, manutenções preventivas e inspeções (Berrade *et al.*, 2013).

Para determinar a taxa de custo, $TC(K, T)$, é essencial definir o custo esperado e a vida útil esperada nos cenários de renovação, que dependem da probabilidade de ocorrência de cada cenário. Esses cenários representam as diferentes possibilidades de falhas ou substituições durante o ciclo de vida do componente. A formulação matemática para cada um desses cenários será apresentada abaixo, cobrindo seis cenários de renovação exclusivos e exaustivos, ou seja, que cobrem todas as possibilidades de eventos do sistema, como falhas que ocorrem entre inspeções ou antes da substituição preventiva. Para facilitar a compreensão dos termos utilizados nas equações, a Tabela 5 apresenta a notação adotada na modelagem.

Tabela 5 – Notação.

X	Tempo até a chegada do defeito.
H	<i>Delay-time</i> (tempo entre o defeito e a falha).
Z	Tempo até a chegada do sensor.
$f_X(x), F_X(x), R_X(x)$	Função de densidade de probabilidade de X , Função de distribuição acumulada de X e Função de sobrevivência de X , respectivamente.
$f_H(h), F_H(h), R_H(h)$	Função de densidade de probabilidade de H , Função de distribuição acumulada de H e Função de sobrevivência de H , respectivamente.
$f_Z(z), F_Z(z), R_Z(z)$	Função de densidade de probabilidade de Z , Função de distribuição acumulada de Z e Função de sobrevivência de Z , respectivamente.
$1/\lambda_X$	Tempo médio até a chegada do defeito.
$1/\lambda_H$	Média do <i>delay-time</i> .
$1/\lambda_Z$	Tempo médio até a chegada do sensor.
β	Probabilidade que o sensor identifique o defeito imediatamente quando ele surgir.
c_F, c_P, c_I, c_D	Custo de uma substituição corretiva, custo de uma substituição preventiva, custo de uma inspeção, e custo de inatividade (devido a uma para não esperada), respectivamente.
t_F, t_P, t_D	Tempo de uma substituição corretiva, tempo de uma substituição preventiva, e tempo de inatividade (devido a uma para não esperada), respectivamente.
K, T	Variáveis de decisão, onde T é o intervalo entre inspeções, $(K - 1)$ é o número máximo de inspeções e (KT) é a idade para substituição preventiva.
$P_i(K, T)$	Probabilidade do ciclo de renovação i , $i = 1, 2, \dots, 6$
$CE_i(K, T)$	Custo esperado do ciclo de renovação i , $i = 1, 2, \dots, 6$
$DE_i(K, T)$	Duração esperada do ciclo de renovação i , $i = 1, 2, \dots, 6$
$TC(K, T)$	Taxa de custo

Fonte: Autoria própria (2025).

O tempo até a chegada do defeito e o *delay-time* seguem uma distribuição exponencial, com taxas λ_X e λ_H , respectivamente. Na prática, esses tempos podem ser modelados como processos de Poisson, onde os eventos (defeitos e falhas) ocorrem de forma independente e com uma taxa constante ao longo do tempo (Christer, 1999; Yucesan; Özkil; Özbek, 2022). Essa abordagem é válida em sistemas onde os defeitos não têm uma causa específica que dependa de outros eventos, mas sim ocorrem aleatoriamente com uma taxa constante, o que é uma característica típica de muitos sistemas, como poços subterrâneos (Alotaibi, 2023), cabos de alta tensão (Liao, 2020), eixos de engrenagens (Jiang; Yu; Makis, 2012) ou rolamentos (Zhao et al., 2022);

De maneira análoga, o tempo até a detecção de uma irregularidade pelo sensor também pode ser modelado por uma distribuição exponencial. A razão para isso é que a detecção de irregularidades é tratada como um processo estocástico, no qual o evento de detecção não depende do histórico de irregularidades anteriores. Em outras palavras, a probabilidade de o sensor identificar uma irregularidade em um determinado intervalo de tempo é constante, caracterizando um comportamento independente e aleatório. Essa suposição é amplamente utilizada em sistemas de monitoramento, especialmente quando os eventos são raros e ocorrem de forma independente, seguindo a aplicabilidade falta de memória da distribuição exponencial, uma propriedade usada várias aplicações (Thomas; Luk, 2008; Zhang Et Al., 2011; Ali, 2017; Noguchi; Robles, 2022).

Cabe ressaltar que, embora a suposição adotada da exponencial para os eventos supracitados tenha se mostrado adequada para os objetivos deste trabalho, o modelo proposto apresenta flexibilidade para incorporar outras distribuições de probabilidade. Por exemplo, se os dados indicarem taxas de falha não constantes (processos não-homogêneos), dependência de variáveis operacionais ou mesmo comportamentos não-Markovianos, a estrutura proposta pode ser adaptada sem perda de generalidade. Essa flexibilidade permite que o modelo permaneça válido mesmo sob premissas distintas, bastando redefinir os parâmetros de taxa ou incorporar funções de *hazard* mais sofisticadas, como as das distribuições de Weibull, log-normal ou processos de renovação, conforme exigido pela natureza dos dados e pelo comportamento observado do sistema.

Diante disso, a modelagem matemática desenvolvida para a política de manutenção considera seis cenários distintos de ciclos de renovação, cada um com características próprias, o que indica que as probabilidades de ocorrência desses cenários totalizam 1 (100%). Abaixo, são detalhados cada cenário, com suas respectivas descrições (particularidades do ciclo de renovação), probabilidade de ocorrência, custo associado e vida útil esperada.

Cenário 1) Este cenário está relacionado à imperfeição do sensor, que sinaliza um defeito ainda não manifestado. Ou seja, não houve defeito ou falha até um dado momento. No entanto, no i -ésimo intervalo entre inspeções periódicas ou no último intervalo (entre a última inspeção periódica e a manutenção preventiva na idade KT), o sensor indica a chegada (manifestação) do defeito. Vale ressaltar que, neste caso, não ocorre uma renovação efetiva do componente, mas sim um ponto teórico de renovação. Isso se deve à falta de memória da distribuição exponencial, que é uma característica matemática que implica que, ao observar o tempo até a ocorrência de um evento (como o defeito), o processo não "lembra" quando o último defeito ocorreu. Ou seja, a distribuição exponencial assume que o tempo até o próximo evento é independente do tempo que já passou, o que impede a consideração de informações passadas sobre o histórico de falhas ao realizar a previsão de novos defeitos. As consequências deste cenário são as seguintes:

$$P_1(K, T) = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)T}^{iT} f_Z(z)R_X(z)dz$$

$$CE_1(K, T) = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)T}^{iT} \left\{ [(i-1)c_i] + (c_D t_D) \right\} f_Z(z)R_X(z)dz$$

$$DE_1(K, T) = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)T}^{iT} (t_D z) f_Z(z)R_X(z)dz$$

Cenário 2) Neste cenário, o defeito surge no i -ésimo intervalo entre inspeções periódicas, mas o sensor falha, com probabilidade $(1 - \beta)$, em identificar a situação imediatamente. Mesmo assim, a inspeção periódica subsequente ocorre antes da falha, substituindo preventivamente o componente. As consequências deste cenário são as seguintes:

$$\begin{aligned}
P_2(K, T) &= \sum_{i=1}^{K-1} (1 - \beta) \int_{(i-1)T}^{iT} f_X(x) R_Z(x) R_H(iT - x) dx \\
CE_2(K, T) &= \sum_{i=1}^{K-1} (ic_I + c_p) [(1 - \beta) \int_{(i-1)T}^{iT} f_X(x) R_Z(x) R_H(iT - x) dx] \\
DE_2(K, T) &= \sum_{i=1}^{K-1} (1 - \beta) \int_{(i-1)T}^{iT} (iT + t_p) f_X(x) R_Z(x) R_H(iT - x) dx
\end{aligned}$$

Cenário 3) Este cenário é semelhante ao anterior, porém, o defeito surge entre a última inspeção periódica (realizada no momento $(K - 1)T$) e a idade de substituição preventiva (KT). Assim como no cenário anterior, o sensor falha, com probabilidade $(1 - \beta)$, em identificar o defeito de imediato. Contudo, a substituição preventiva em KT ocorre antes que a falha aconteça, prevenindo qualquer parada. As consequências deste cenário são as seguintes:

$$\begin{aligned}
P_3(K, T) &= (1 - \beta) \int_{(K-1)T}^{KT} f_X(x) R_Z(x) R_H(KT - x) dx \\
CE_3(K, T) &= [(K - 1)c_I + c_p] [(1 - \beta) \int_{(K-1)T}^{KT} f_X(x) R_Z(x) R_H(KT - x) dx] \\
DE_3(K, T) &= (KT + t_p) [(1 - \beta) \int_{(K-1)T}^{KT} f_X(x) R_Z(x) R_H(KT - x) dx]
\end{aligned}$$

Cenário 4) Este cenário ilustra a razão pela qual a empresa optou pela instalação do sensor. O defeito surge no i -ésimo intervalo entre inspeções periódicas ou no último intervalo (entre a última inspeção periódica e a manutenção preventiva na idade KT), mas o sensor o detecta imediatamente, resultando na interrupção da operação e substituição do componente antes que uma falha ocorra. Em uma situação ideal, se isso acontecesse sempre, seria uma solução excelente, pois mostraria que o sensor possui uma alta qualidade. As consequências deste cenário são as seguintes:

$$\begin{aligned}
P_4(K, T) &= \sum_{i=1}^K \beta \int_{(i-1)T}^{iT} f_X(x) R_Z(x) dx \\
CE_4(K, T) &= \sum_{i=1}^K \{[(i - 1)c_I + c_p + (c_D t_D)]\} [\beta \int_{(i-1)T}^{iT} f_X(x) R_Z(x) dx] \\
DE_4(K, T) &= \sum_{i=1}^K \beta \int_{(i-1)T}^{iT} (x + t_p) f_X(x) R_Z(x) dx
\end{aligned}$$

Cenário 5) Ao contrário do cenário anterior, este é o menos desejado. O defeito surge no i -ésimo intervalo entre ações de manutenção, mas não é detectado pelo sensor. Além disso, a falha ocorre antes da ação subsequente (seja inspeção periódica ou manutenção preventiva), levando a uma parada não planejada. As consequências deste cenário são as seguintes:

$$P_5(K, T) = \sum_{i=1}^K (1 - \beta) \int_{(i-1)T}^{iT} \int_0^{iT-x} f_X(x) R_Z(x) f_H(h) dh dx$$

$$CE_5(K, T) = \sum_{i=1}^K [(i - 1)c_I + c_F] [(1 - \beta) \int_{(i-1)T}^{iT} \int_0^{iT-x} f_X(x) R_Z(x) f_H(h) dh dx]$$

$$DE_5(K, T) = \sum_{i=1}^K (1 - \beta) \int_{(i-1)T}^{iT} \int_0^{iT-x} [(x + h) + t_F] f_X(x) R_Z(x) f_H(h) dh dx$$

Cenário 6) Finalmente, este cenário envolve a substituição preventiva na idade KT . Neste caso, também não houve um falso positivo (quando o sensor indica um defeito inexistente) antes dessa substituição. As consequências deste cenário são as seguintes:

$$P_6(K, T) = R_X(KT) R_Z(KT)$$

$$CE_6(K, T) = [(K - 1)c_I + c_p] P_6(K, T)$$

$$DE_6(K, T) = [KT + t_p] P_6(K, T)$$

Assim, sabendo que $\sum_{i=1}^6 P_i(K, T) = 1$, conclui-se a modelagem. Com isso, a

função objetivo é dada por $TC(K, T) = \frac{\sum_{i=1}^6 EC_i(K, T)}{\sum_{i=1}^6 DE_i(K, T)}$.

3.7 ANÁLISE DA PERFORMANCE DA POLÍTICA PROPOSTA

Como o objetivo é definir os valores de K e T que minimizem $TC(K, T)$, optou-se por implementar o modelo através da linguagem de programação *python* utilizando das bibliotecas *scipy* e *numpy*. Além disso, o método de Programação de Mínimos Quadrados Sequenciais (SLSQP) foi empregado para o processo de minimização. O valor de K foi variado de 1 até um limite suficientemente grande, e,

para cada valor de K , o método SLSQP foi utilizado para determinar o valor correspondente de T . O SLSQP é um método eficiente de otimização não linear, que se destaca por ser capaz de lidar tanto com restrições de igualdade quanto de desigualdade, além de ser robusto em problemas de otimização contínua (Kraft, 1988). Diversos estudos têm demonstrado a eficácia desse método em diferentes contextos, incluindo desde o setor de manutenção (Rodrigues *et al.*, 2024), até mesmo o de saúde (Gupta; Gupta, 2018).

A Tabela 6 apresenta um compilado dos parâmetros de entrada, considerados no caso base (CB) do trabalho. Para o CB, foram considerados alguns parâmetros (λ_H , c_F e c_P) de um estudo anterior que analisou o comportamento de falha de rolamentos (Scarf *et al.*, 2009). Quanto aos demais parâmetros, sua seleção foi realizada com base em um processo de julgamento especializado. Nesse caso, especialistas da empresa, com vasta experiência prática e técnica, foram consultados para fornecer estimativas fundamentadas em seu conhecimento empírico. Esse processo de decisão foi estruturado para garantir que os parâmetros refletissem de forma realista as condições e limitações do ambiente operacional da empresa. É importante destacar que os custos são expressos em unidades monetárias e os tempos em unidades de tempo, sem especificar a moeda ou a unidade temporal utilizada, pois isso dependerá do país e do tipo de unidade de tempo adotada nos dados de entrada.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada para o Caso Base (CB)

Parâmetro	Valor para o CB
λ_X	0.25
λ_H	0.5
λ_Z	0.1
β	0.9
c_F	10
c_P	1
c_I	0.3
c_D	100
t_F	$2. (10^{-4})$
t_P	$1. (10^{-4})$
t_D	$3. (10^{-3})$

Fonte: Autoria própria (2025).

3.7.1 Análise de sensibilidade

A Tabela 7 apresenta uma análise de sensibilidade, permitindo avaliar como a variação de determinados parâmetros influencia os resultados obtidos. A realização dessa análise é fundamental para compreender a robustez do modelo proposto e identificar quais variáveis exercem maior impacto no desempenho do sistema.

No contexto da manutenção industrial, a análise de sensibilidade auxilia na tomada de decisões estratégicas ao demonstrar como mudanças em fatores como taxas de falha, tempos médios de reparo e intervalos de manutenção preventiva podem afetar indicadores operacionais, como disponibilidade, confiabilidade e custos. Isso possibilita a definição de políticas de manutenção mais eficazes, garantindo maior previsibilidade e otimização dos recursos.

Além disso, a análise de sensibilidade contribui para a mitigação de riscos, pois permite antecipar possíveis cenários adversos e avaliar a viabilidade de diferentes estratégias de manutenção antes de sua implementação. Dessa forma, a aplicação desse método reforça a confiabilidade dos resultados apresentados e confere maior embasamento técnico às recomendações propostas.

Tabela 7– Análise de Sensibilidade

CASOS	Parâmetros											Política KT			PC
	λ_X	λ_H	λ_Z	β	c_F	c_P	c_I	c_D	t_F	t_P	t_D	K	T	TC	TC
CB	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	17	3,5576	0,5142	0,5450
2	0,5	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	14	2,1077	0,9042	1,0133
3	0.125	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	9	8,6767	0,2925	0,2935
4	0.25	1	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	8	6,3356	0,5580	0,5583
5	0.25	0.25	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	14	4,0559	0,4639	0,5202
6	0.25	0.5	0.2	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	12	3,2811	0,5383	0,5734
7	0.25	0.5	0.05	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	17	3,7190	0,5023	0,5308
8	0.25	0.5	0	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	18	3,9018	0,4905	0,5166
9	0.25	0.5	0.1	1	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	5	33.9187	0.3548	0,3548
10	0.25	0.5	0.1	0.45	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	50	1,2686	0,8117	1,2163
11	0.25	0.5	0.1	0	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	50	0,9322	0,9817	1,6862
12	0.25	0.5	0.1	0.9	20	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	26	2,0476	0,6341	0,7830
13	0.25	0.5	0.1	0.9	5	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	6	8,9030	0,4252	0,4260
14	0.25	0.5	0.1	0.9	10	2	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	12	4,1716	0,7409	0,7592
15	0.25	0.5	0.1	0.9	10	0.5	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	14	3,3235	0,4001	0,4379
16	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.6	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	7	6,6777	0,5389	0,5450
17	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.15	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	27	2,1812	0,4820	0,5450
18	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	200	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	16	3,6236	0,6088	0,6378
19	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	50	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	17	3,5258	0,4669	0,4986
20	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (2 \cdot (10^{-4}))$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	17	3,5576	0,5142	0,5450
21	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$\frac{1}{2} \cdot (2 \cdot (10^{-4}))$	$1 \cdot (10^{-4})$	$3 \cdot (10^{-3})$	17	3,5576	0,5142	0,5450
22	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$2 \cdot (1 \cdot (10^{-4}))$	$3 \cdot (10^{-3})$	17	3,5576	0,5142	0,5450
23	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$\frac{1}{2} \cdot (1 \cdot (10^{-4}))$	$3 \cdot (10^{-3})$	17	3,5576	0,5142	0,5450
24	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$2 \cdot (3 \cdot (10^{-3}))$	16	3,6234	0,6086	0,6377
25	0.25	0.5	0.1	0.9	10	1	0.3	100	$2 \cdot (10^{-4})$	$1 \cdot (10^{-4})$	$\frac{1}{2} \cdot (3 \cdot (10^{-3}))$	17	3,5258	0,4670	0,4987

Fonte: Autoria própria (2025).

A análise desenvolvida comparou o desempenho de duas políticas de manutenção: a política proposta, denominada “política KT”, e a política exclusivamente corretiva (PC), atualmente adotada pela empresa do estudo de caso para o componente em questão. Enquanto a PC atua apenas após a ocorrência de falhas, a KT combina inspeções periódicas com substituições preventivas programadas, buscando antecipar falhas e reduzir os custos totais de manutenção.

A análise comparativa entre diferentes valores dos parâmetros de entrada demonstra um impacto direto na taxa de custo. O caso base trouxe como resultados: ($K=17$, $T=3,5576$, $TC=0,5142$). Isso significa que, serão feitas 17 ações de manutenção, no qual 16 delas são inspeções periódicas a cada 3,5576 unidades de tempo. Além disso, na idade 60,4792 unidades de tempo, ocorrerá uma substituição preventiva.

A nova política de manutenção proposta apresenta uma taxa de custo (TC) de 0,5142, em comparação com a política atualmente adotada, que apresenta uma TC de 0,5450. Isso representa uma redução de aproximadamente 5,66% na taxa de custo, indicando que a nova abordagem é mais eficiente do ponto de vista econômico. Essa diferença, embora aparentemente modesta, pode representar um impacto relevante quando considerada ao longo do tempo ou em sistemas que operam com grande número de ativos ou em ambientes críticos. Veja que, a depender das unidades monetárias reais, o impacto pode ser bastante expressivo. Por exemplo, supondo que essa taxa esteja associada a um custo anual de R\$ 1.000.000,00 sob a política atual, a nova política levaria esse valor a aproximadamente R\$ 942.385,32 (uma economia anual de mais de R\$ 57 mil). Essa economia poderia ser reinvestida em diversas frentes estratégicas para a empresa, como:

- Aquisição de rolamentos reserva para aumentar a disponibilidade operacional;
- Treinamento da equipe de manutenção;
- Melhorias nos sistemas de monitoramento e diagnóstico;
- Inovações no processo produtivo para aumento de eficiência.

Além disso, ao projetar esse ganho em um horizonte de 10 anos, considerando apenas valores nominais, a economia acumulada ultrapassa os R\$ 570.000,00 — o equivalente, por exemplo, à compra de um novo equipamento industrial, à implementação de um sistema de manutenção preditiva ou à ampliação de um setor da planta.

Portanto, a adoção da nova política não apenas melhora o desempenho da manutenção, como também libera recursos valiosos que podem fortalecer a competitividade e sustentabilidade da operação no médio e longo prazo.

Em se tratando da análise de sensibilidade, quando a taxa de chegada do defeito (λ_x) aumenta, como no caso 2 ($\lambda_x = 0,5$), os defeitos passam a surgir com mais frequência. Em termos práticos, isso significa que o sistema está mais sujeito a entrar na zona de risco (o início do *delay-time*). Para evitar falhas, a política KT reage aumentando a frequência de inspeções: reduz tanto o número de ações de manutenção ($K = 14$) quanto o intervalo T ($\approx 2,1$), fazendo substituições mais cedo (idade, KT , $\approx 29,5$). Essa ação mais agressiva busca capturar os defeitos rapidamente e evitar custos de falha, o que eleva o custo total, mas ainda se mantém inferior ao da política PC. Por outro lado, quando λ_x diminui (caso 3, $\lambda_x = 0,125$), os defeitos se tornam mais raros. Com menor risco, o sistema adota uma estratégia mais relaxada: diminui o número de ações de manutenção ($K = 9$), espaça as inspeções ($T \approx 8,68$) e adia a preventiva (idade $\approx 260,3$), o que leva a uma grande redução na TC (0,2925). Ou seja, menos ações e menos custo, sem comprometer a segurança.

Outra variável importante na análise é λ_z , que representa a taxa de chegada de sinalizações de defeito pelo sensor, mesmo que o defeito ainda não tenha ocorrido, ou seja, está associada à ocorrência de falsos positivos. Quando λ_z aumenta, o sensor emite mais alertas incorretos, o que pode levar a substituições ou inspeções desnecessárias. Isso impacta diretamente o desempenho da política KT, pois o modelo precisa decidir entre agir de forma preventiva com base nesses sinais ou esperar por uma inspeção confirmatória. No caso 6 ($\lambda_z = 0,2$), observa-se um aumento leve na TC (0,5383), indicando que a política KT ainda consegue lidar razoavelmente bem com algum nível de falsos positivos.

Por outro lado, quando λ_z diminui significativamente, como no caso 7 ($\lambda_z = 0,05$), os falsos positivos se tornam raros, e o modelo pode confiar mais nos sinais do sensor. Isso se traduz em uma TC menor (0,5023), próxima à do CB, com uma substituição preventiva programada para aproximadamente 63,2 unidades de tempo. No caso 8 ($\lambda_z = 0$), o sensor nunca emite falsos positivos — o sistema age apenas com base em inspeções ou sinais verdadeiros. A política KT, nesse cenário, atua

com mais segurança e equilíbrio, e consegue manter a TC baixa (0,4905). Assim, valores menores de λ_z favorecem uma política mais eficiente, pois reduzem o desperdício com ações baseadas em alarmes incorretos, enquanto valores elevados aumentam o número de ações desnecessárias, elevando os custos operacionais.

A influência da probabilidade de detecção imediata (β) também é bastante intuitiva. Com $\beta = 1$ (caso 9), o sensor é perfeito, e a política KT atinge uma das menores taxas de custo (TC = 0,3548). Isso ocorre porque o sistema pode confiar na detecção automática e espaçar as inspeções ($K = 5$, $T \approx 33,92$). Já nos casos 10 e 11, à medida que β cai (até 0), o sistema precisa compensar com mais inspeções, o que encarece a operação (TC chegando a 0,9817). Ainda assim, a política KT se mantém mais eficiente do que a PC, mostrando sua capacidade de adaptação mesmo em ambientes com sensores ineficazes.

Variações nos custos também influenciam fortemente a política adotada. Quando o custo de falha (c_F) aumenta (caso 12), a política KT responde antecipando ações, aceitando mais inspeções ($K = 26$) para evitar o custo elevado de falhas, mesmo com o custo total também subindo (TC = 0,6341). Inversamente, quando o custo da preventiva (c_P) diminui (caso 13), a política KT tende a adotar mais substituições preventivas, pois agora elas são mais vantajosas economicamente. O mesmo raciocínio se aplica ao custo de inspeção (c_I) no caso 14 e à inatividade (c_D) no caso 16: se o impacto financeiro da falha aumenta, o modelo reage com estratégias mais conservadoras, aumentando a frequência de inspeção e reduzindo o tempo até a substituição.

Os tempos de execução das ações afetam o custo indiretamente, já que influenciam o tempo de inatividade do sistema. Por exemplo, no caso 20, com aumento em t_F , o sistema se torna mais cauteloso, aumentando o número de inspeções e mantendo a TC sob controle (0,5142). De toda forma, foi observado que alterações nos parâmetros t_F (tempo de falha) e t_P (tempo de reparo) não impactaram significativamente os resultados finais. Mesmo quando esses valores foram duplicados ou reduzidos pela metade, as taxas de custo permaneceram praticamente os mesmos. Isso sugere que o modelo é robusto em relação a essas variáveis, indicando que a política implementada continua eficaz independentemente dessas mudanças.

Em síntese, a política KT se mostra adaptável e eficaz. Ela ajusta dinamicamente o número de inspeções ($K - 1$), o intervalo entre elas (T) e a idade para substituição preventiva (KT) conforme a frequência e severidade dos defeitos, a eficácia dos sensores e os custos envolvidos. A lógica por trás desses ajustes está centrada na busca pelo equilíbrio entre prevenção e economia. Quando o sistema está mais vulnerável (defeitos frequentes, falhas rápidas, sensores ruins), ela age cedo e frequentemente. Quando o risco é menor ou a prevenção é barata, ela adia intervenções para reduzir custos. Em praticamente todos os cenários, a política KT apresenta uma taxa de custo menor do que a PC , mostrando ser uma estratégia robusta e economicamente vantajosa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão deste trabalho reforça a relevância da implementação de uma política de manutenção estruturada para a indústria de sacolas plásticas, com foco na otimização dos processos produtivos e na redução de falhas operacionais. O objetivo principal deste estudo foi desenvolver um modelo de política de manutenção para um componente crítico do sistema de produção da empresa estudada. Através da análise detalhada das falhas recorrentes, especialmente nas secadoras utilizadas no processo, foi possível identificar os pontos vulneráveis da operação e propor soluções estratégicas para minimizar as paradas não programadas, melhorar a eficiência e garantir a segurança no ambiente de trabalho.

A importância deste trabalho reside na sua capacidade de proporcionar uma solução prática e eficaz para um problema operacional crítico. As falhas constantes nos equipamentos não apenas geram prejuízos financeiros devido a paradas e desperdício de matéria-prima, mas também afetam a qualidade do produto final e comprometem a segurança dos trabalhadores. Ao propor uma política de manutenção preventiva focada na confiabilidade dos ativos, este estudo contribui significativamente para a redução desses impactos, oferecendo uma alternativa para a melhoria contínua na gestão dos processos produtivos.

Os resultados obtidos indicam que a implementação de uma política de manutenção preventiva mais estratégica pode gerar uma redução significativa nos custos operacionais. A confiabilidade do sensor se revelou um fator crítico, já que uma precisão menor aumentou consideravelmente os custos devido a falsas detecções. Esses resultados demonstram que, ao ajustar adequadamente os parâmetros de manutenção, é possível melhorar a eficiência do sistema produtivo, reduzir custos e aumentar a competitividade da empresa.

Este trabalho se destaca por aplicar metodologias modernas de manutenção, fundamentadas em modelagens matemáticas, adaptadas às particularidades operacionais da indústria de sacolas plásticas. A proposta busca ir além das abordagens convencionais ao considerar as características reais do processo produtivo, oferecendo uma alternativa mais eficiente e alinhada à dinâmica desse setor.

Como perspectivas futuras, pretende-se ampliar a modelagem proposta para considerar inspeções imperfeitas, reconhecendo que, na prática, nem todo defeito

presente será necessariamente detectado durante uma inspeção. Adicionalmente, almeja-se incorporar à modelagem a hipótese de que a probabilidade de detecção de um defeito por sensores não é constante ao longo do tempo. Essa probabilidade pode ser afetada por diversos fatores, como a evolução do próprio defeito, que pode se tornar mais evidente com o tempo, a degradação do desempenho do sensor, ou até mesmo variações operacionais que interfiram na sensibilidade do monitoramento. Também se pretende explorar diferentes distribuições de probabilidade para descrever o comportamento do defeito e do delay-time, superando a suposição de distribuição exponencial. O uso de distribuições como a Weibull, log-normal ou gama pode permitir uma representação mais realista de diversos cenários de falha e progressão de defeitos. Finalmente, um avanço importante seria a extensão do modelo para sistemas multicomponentes monitorados por sensores, possibilitando aplicações mais robustas e alinhadas com a complexidade dos sistemas reais, nos quais múltiplos ativos interagem e compartilham estratégias de manutenção.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico). **Estudos setoriais**. 2025. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/>. Acesso em: 01 de fev. de 2025.
- ACHOUCH, M.; DIMITROVA, M.; ZIANE, K.; KARGANROUDI, S. S.; DHOUIB, R.; IBRAHIM, H.; ADDA, M. On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. **Applied Sciences**, v. 12, n. 16, p. 8081, 2022.
- AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. **Computers & industrial engineering**, v. 63, n. 1, p. 135-149, 2012.
- ALI, S. Time-between-events control charts for an exponentiated class of distributions of the renewal process. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, n. 8, p. 2625-2651, 2017.
- ALMEIDA, C. H.; SILVA, A. L.; OLIVEIRA, M. F. Manutenção baseada na condição: uma revisão da literatura e perspectivas futuras. **Revista de Engenharia e Manutenção**, 10(2), 45-62, 2022.
- ALMEIDA, F. A. **História da manutenção industrial**. Editora Makron Books, 2005.
- ALOTAIBI, N. M.; SCARF, P.; CAVALCANTE, C. A. V.; LOPES, R. S.; SILVA, A. L. D. O., RODRIGUES, A. J. S.; ALYAMI, S. A. Modified-opportunistic inspection and the case of remote, groundwater well-heads. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 237, p. 109389, 2023.
- ANDERSEN, J. F.; NIELSEN, B. F. A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for multi-component systems. **Reliability Engineering & System Safety**, 256, 110759, 2025.
- APELAND, S.; AVEN, T. Risk based maintenance optimization: foundational issues. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 67, n. 3, p. 285-292, 2000.
- BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. **Mathematical theory of reliability**. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- BASRI, E. I.; RAZAK, I. H. A.; AB-SAMAT, H.; KAMARUDDIN, S. Preventive maintenance (PM) planning: a review. **Journal of quality in maintenance engineering**, v. 23, n. 2, p. 114-143, 2017.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V.; DWIGHT, R. A. Imperfect inspection and replacement of a system with a defective state: A cost and reliability analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 120, p. 80-87, 2013.
- BLANCHARD, B. S. **Logistics engineering and management**. 6th ed. Pearson, 2017.
- BRANCO FILHO, G. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Ciência Moderna, 2008.

Cardoso, A. M.; Quelhas, O. L. **Manutenção centrada na confiabilidade: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2016.

CHA, J. H.; FINKELSTEIN, M. Renewal processes and applications. In: **Point Processes for Reliability Analysis**. Springer Series in Reliability Engineering. Cham: Springer, 2018.

CHRISTER, A. H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, p. 1120–1137, 1999.

DEHSOUKHTAH, S. S.; RAZMKHAH, M.; CASTANIER, B. Optimal block replacement based on expert judgement method. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, v. 238, n. 3, p. 591-603, 2024.

DHILLON, B. S.; REICHE, H. **Reliability and maintainability management**. (No Title), 1985.

FERREIRA, P.; ALMEIDA, R. **Manutenção Preditiva: Fundamentos e Aplicações no Contexto Industrial**. 1. ed. Editora Acadêmica, 2020.

GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GONÇALVES, R. F. **Manutenção: uma abordagem estratégica**. Editora Bookman, 2010.

GUPTA, M.; GUPTA, B. An ensemble model for breast cancer prediction using sequential least squares programming method (slsqp). In: **2018 eleventh international conference on contemporary computing (IC3)**. IEEE, 2018. p. 1-3.

JIA, X.; CHRISTER, A. H. A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 13, n. 1, p. 39-49, 2002.

JIANG, R.; YU, J.; MAKIS, V. Optimal Bayesian estimation and control scheme for gear shaft fault detection. **Computers & Industrial Engineering**, v. 63, n. 4, p. 754-762, 2012.

KAISER, K. A.; GEBRAEEL, N. Z. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans**, v. 39, n. 4, p. 840-849, 2009.

KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção-função estratégica**. Qualitymark Editora Ltda, 2009.

KARDEC, A; NASCIF, J; ALMEIDA, M; ANDRADE, L. **Manutenção: Função & Custos**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

KIM, J.; AHN, Y.; YEO, H. A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 12, p. 1525-1536, 2016.

KRAFT, D. A **Software Package for Sequential Quadratic Programming**. Technical Report DFVLR-FB, v. 88, n. 28, p. 1–33, 1988.

LAD, B. K.; KULKARNI, M. S. A parameter estimation method for machine tool reliability analysis using expert judgement. **International journal of data analysis techniques and strategies**, v. 2, n. 2, p. 155-169, 2010.

LAKATOS, Eva Maria; DE ANDRADE MARCONI, Marina. **Metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1991.

LEE, H.; CHA, J. H. New stochastic models for preventive maintenance and maintenance optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 255, n. 1, p. 80-90, 2016.

LEVESON, N. **Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety**. Cambridge: MIT Press, 2012.

LIAO, Y.; YUAN, J.; WEI, Y.; XU, X.; ZHOU, C. Maintenance scheduling for HV cable based on the delay-time concept. In: **2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**. IEEE, 2020. p. 1-4.

LOPES, J. **Manutenção Preditiva: Técnicas e Aplicações**. São Paulo: Editora Y, 2021.

MACHADO, C. O.; MONTEIRO JUNIOR, S. C.; CELESTINO, Y. V. e S.; ANDRADE, J. A. B.; RODRIGUES JUNIOR, A. S. Manutenção prescritiva: a evolução da manutenção na Indústria 4.0. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 9, 2023.

MECALUX. **Manutenção preditiva: o que é e como aplicá-la na indústria**. 2022. Disponível em: <https://www.mecalux.com.br/blog/manutencao-preditiva>. Acesso em: 13 mar. de 2025.

MELLO, C. H. P.; LIMA, A. G. B.; SILVA, F. F.; SOUZA, L. H. A.; PEREIRA, M. A. C. **Manutenção na Indústria 4.0: Uma revisão bibliográfica sobre tecnologias e aplicações**. Revista Produção e Desenvolvimento, v. 18, n. 1, e2022004, 2022.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**. Butterworth-Heinemann, 2018.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: MRC**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2015.

MOURA, J. F.; ANDRADE, C. R. **Manutenção industrial na era da Indústria 4.0**. Editora Elsevier, 2019.

MOURA, J. M. **Manutenção Preditiva e sua Importância na Indústria**. 2017.

NAKAJIMA, S. Introduction to TPM: total productive maintenance. **Productivity Press, Inc., 1988**,, p. 129, 1988.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva, v. 1**. Editora Blucher, 1989.

NOGUCHI, K.; ROBLES, K. F. On Generating Distributions with the Memoryless Property. **The American Statistician**, v. 76, n. 3, p. 280-285, 2022.

OLIVEIRA, A. R. **Gestão de Manutenção Industrial: Desafios e Soluções**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Industrial, 2019.

OMSHI, E. M.; SHEMEHSAVAR, S.; GRALL, A. An intelligent maintenance policy for a latent degradation system. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 242, p. 109739, 2024.

PEREIRA, L. S. **Engenharia da manutenção: conceitos e práticas**. Editora EDUFBA, 2003.

PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: an evolutionary perspective. In: KOBACZY, K. A. H.; MURTHY, D. N. P. (Orgs.) **Complex System Maintenance Handbook**. Nova York: Springer, p. 21-48, 2008.

PINTO, R. S.; XAVIER, P. L. **Gestão da Manutenção Industrial**. 1. ed. São Paulo: Editora Exemplo, 2018.

PRAJAPATI, A.; BECHTEL, J.; GANESAN, S. Condition based maintenance: a survey. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 18, n. 4, p. 384-400, 2012.

RIBEIRO, M. S.; OLIVEIRA, A. L.; SOUZA, C. F. Manutenção corretiva: uma análise de suas aplicações e limitações na indústria moderna. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 18, n. 4, p. 78-92, 2022.

RODRIGUES, A. J. S.; CAVALCANTE, C. A. V.; LEE, C. A general inspection and replacement policy for protection systems subject to shocks with state dependent effect. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 251, p. 110397, 2024.

RODRIGUES, A. J. S.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALBERTI, A. R. A multicriteria model to support the selection of inspection service providers based on the delay time model. **International Transactions in Operational Research**, v. 30, n. 6, p. 3554-3577, 2023.

RODRIGUES, A. J. S.; DA MOTTA, F. A.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALBERTI, A. R. A hybrid maintenance policy for a protection system under internal degradation and shocks: a case study in a steel industry. **Quality Technology & Quantitative Management**, v. 21, n. 6, p. 895-925, 2024.

ROSS, S. M. **Stochastic processes**. New York: Wiley, 1996.

SANTOS, A. C. J.; CAVALCANTE, C. A. V.; RIBEIRO, L. F. A. The use of second-hand items based on delay time modelling. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 146, p. 118-125, 2021.

SANTOS, A. C. S.; CAVALCANTE, C. A. V. A study on the economic and environmental viability of second-hand items in maintenance policies. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 217, p. 108133, 2022.

SANTOS, A. S. F.; AGNELLI, J. A. M.; MANRICH, S. Tendências e desafios da reciclagem de embalagens plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 4, p. 260-267, 2002.

SANTOS, J.; SILVA, M. **Gestão da Manutenção: Teorias e Práticas no Contexto Industrial**. 1. ed. Editora Técnica, 2022.

SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V.; DWIGHT, R. A.; GORDON, P. An age-based inspection and replacement policy for heterogeneous components. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 58, n. 4, p. 641-648, 2009.

SILVA, A. C. Classificação metodológica das pesquisas científicas. **Anais do Congresso Nacional de Pesquisas e Práticas em Educação**, v. 2, n. 1, 2024.

SILVA, M. A.; OLIVEIRA, R. S.; SOUZA, F. P. Manutenção preventiva: uma abordagem estratégica para otimizar custos e garantir a disponibilidade de equipamentos. **Revista Brasileira de Engenharia de Manutenção**, 15(2), 45-58, 2023.

SKF. **Manual de manutenção de rolamentos da SKF**. 2025. Disponível em: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968083afa2/pdf_preview_medium/0901d1968083afa2_pdf_preview_medium.pdf#cid=463040. Acesso em: 22 de jan. de 2025.

SKF. **Rolamento de esferas de uma carreira com vedação 6314-2RS1**. 2025 Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6314-2RS1>. Acesso em: 22 jan. 2025.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. 8. ed. Harlow: Pearson, 2015.

SMITH, R. M. **Condition-Based Maintenance**. Butterworth-Heinemann, 2019.

THOMAS, D. B.; LUK, W. Sampling from the exponential distribution using independent bernoulli variates. In: **2008 International Conference on Field Programmable Logic and Applications**. IEEE, 2008. p. 239-244.

TROJAN, F.; MARÇAL, R. F. M. Proposal of Maintenance-types Classification to Clarify Maintenance Concepts in Production and Operations Management. **Journal of Business and Economics**, v. 8, n. 7, p. 560-572, 2017.

VERGIN, R. C.; SCRIBAN, M. Maintenance scheduling for multicomponent equipment. **AIIE transactions**, v. 9, n. 3, p. 297-305, 1977.

WANG, W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 106, p. 165-178, 2012.

YAO, K.; ZHOU, J. Renewal reward process with uncertain interarrival times and random rewards. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 26, n. 3, p. 1757-1762, 2017.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso-: Planejamento e métodos**. Bookman editora, 2015.

YUCESAN, O.; ÖZKIL, A.; ÖZBEK, M. E. Validity of Exponential Distribution for Modelling Inter-Failure Arrival Times of Windows based Industrial Process Control Data Exchange. **Journal of Science, Technology and Engineering Research**, v. 3, n. 1, p. 1-8, 2022.

ZHANG, H. Y.; SHAMSUZZAMAN, M.; XIE, M.; GOH, T. N. Design and application of exponential chart for monitoring time-between-events data under random process shift. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 57, p. 849-857, 2011.

ZHAO, Y. X. On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 79, n. 3, p. 301-308, 2003.

ZHAO, Y.; TOOTHMAN, M.; MOYNE, J.; BARTON, K. An adaptive modeling framework for bearing failure prediction. **Electronics**, v. 11, n. 2, p. 257, 2022.

ZONTA, T.; COSTA, C. A.; RIGHI, R. R.; LIMA, M. J.; TRINDADE, E. S.; LI, G. P. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 150, p. 106889, 2020.