



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

MATHEUS FELIX MOREIRA

**GESTÃO DA MANUTENÇÃO DO ROLAMENTO DO ANILOX EM IMPRESSORAS
FLEXOGRÁFICAS**

Caruaru

2025

MATHEUS FELIX MOREIRA

**GESTÃO DA MANUTENÇÃO DO ROLAMENTO DO ANILOX EM IMPRESSORAS
FLEXOGRÁFICAS**

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 bacharel em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador (a): 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

MOREIRA, MATHEUS FELIX.

GESTÃO DA MANUTENÇÃO DO ROLAMENTO DO ANILOX EM
IMPRESSORAS FLEXOGRÁFICAS / MATHEUS FELIX MOREIRA. -
Caruaru, 2025.

69 : 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.
8.

Inclui referências.

1. Gestão da Manutenção. 2. Impressoras Flexográficas. 3. Indústria de
Plástico. 4. Manutenção Preditiva. 5. Confiabilidade de Equipamentos. I. da
Silva Rodrigues, Augusto José . (Orientação). II. Título.

670 CDD (22.ed.)

MATHEUS FELIX MOREIRA

**GESTÃO DA MANUTENÇÃO DO ROLAMENTO DO ANILOX EM IMPRESSORAS
FLEXOGRÁFICAS**

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 bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 16/12/2025

BANCA EXAMINADORA

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

Dr. RAMON SWELL GOMES RODRIGUES CASADO (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Me. USAMA ALI SALAHUDDIN GHORI (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força e sabedoria concedidas ao longo de toda esta jornada, que sem Ele não teria sido possível completar. Agradeço profundamente à minha mãe, Claudenice Maria da Cruz, pelo amor incondicional, educação e valores que me acompanham desde sempre. Agradeço também à querida memória do meu pai, Marcos Felix Moreira, cujo exemplo de vida, ensinamentos e legado de integridade permanecem vivos em minha caminhada, inspirando-me diariamente. À minha tia Maria José Felix da Silva, agradeço por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis. Seu apoio, acolhimento e incentivo foram essenciais para que eu conseguisse seguir em frente.

Ao Prof. Dr. Augusto José da Silva Rodrigues, meu orientador, expresso minha sincera gratidão pela orientação dedicada, paciência e pelos ensinamentos que foram fundamentais não apenas para este trabalho, mas para minha formação profissional e pessoal.

Aos amigos que compartilharam comigo os anos da graduação, meu muito obrigado pela cumplicidade, pelos momentos de descontração e pelo apoio mútuo nos desafios acadêmicos.

À Mirles Melo dos Santos, minha amada, agradeço pelo apoio emocional, pela paciência e por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava. Sua presença foi essencial para que eu superasse os obstáculos e concluísse esta etapa com confiança e determinação.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho faz uso de um modelo de gestão de manutenção customizado para o componente de maior criticidade em um sistema produtivo essencial da indústria de transformação de plásticos: o rolamento do conjunto anilox do sistema de impressão flexográfica. Partindo da identificação das falhas recorrentes neste componente como principal causa de interrupções na produção, o estudo aplica uma política de manutenção híbrida, que integra inspeções periódicas e substituição preventiva baseada na idade. Embora o modelo híbrido utilizado não tenha sido desenvolvido neste estudo, mas sim adaptado e aplicado ao contexto industrial analisado, sua estrutura, originalmente inspirada no comportamento de engrenagens e baseada em um processo de degradação em dois estágios, mostrou-se altamente adequada ao problema real investigado. A análise de sensibilidade demonstra a robustez do modelo, destacando o custo de falha e a proporção de componentes heterogêneos na população como os fatores de maior impacto na performance da política. Os resultados indicam uma política ótima para o caso base composta por uma inspeção após 1,89 anos e substituição preventiva aos 2,8 anos, equilibrando custos operacionais e confiabilidade do ativo. Conclui-se que a abordagem aplicada constitui uma ferramenta estratégica e economicamente vantajosa para aumentar a disponibilidade operacional, reduzir paradas não programadas e aprimorar a competitividade no setor, oferecendo uma contribuição prática para a aplicação de modelos analíticos de manutenção em um contexto industrial específico.

Palavras-chave: Gestão da Manutenção; Manutenção Preditiva; Confiabilidade de Equipamentos; Indústria de Plásticos.

ABSTRACT

This work employs a customized maintenance management model for the most critical component in an essential production system within the plastics processing industry: the anilox roll bearing in the flexographic printing system. Starting from the identification of recurring failures in this component as the main cause of production stoppages, the study applies a hybrid maintenance policy that integrates periodic inspections and age-based preventive replacement. Although the hybrid model used was not developed in this study but rather adapted and applied to the industrial context analyzed, its structure, originally inspired by gear behavior and based on a two-stage degradation process, proved highly suitable for the real problem investigated. Sensitivity analysis demonstrates the robustness of the model, highlighting the failure cost and the proportion of heterogeneous components in the population as the factors with the greatest impact on policy performance. The results indicate an optimal policy for the base case consisting of an inspection after 1.89 years and preventive replacement at 2.8 years, balancing operational costs and asset reliability. It is concluded that the applied approach constitutes a strategic and economically advantageous tool to increase operational availability, reduce unplanned downtime, and enhance competitiveness in the sector, offering a practical contribution to the application of analytical maintenance models in a specific industrial context.

Keywords: Maintenance Management; Predictive Maintenance; Equipment Reliability; Plastics Industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Conceito <i>Delay-time</i> – Evolução da Degradação	31
Figura 2 –	Interface do software de simulação utilizado para otimização	33
Figura 3 –	Grupo impressor flexográfico	38
Figura 4 –	Diagrama de Pareto - Distribuição das falhas por componente do grupo impressor	39
Figura 5 –	Componente crítico: conjunto de rolamentos do anilox	40
Figura 6 –	Rolamento utilizado na impressora	42
Figura 7 –	Componentes do rolamento	44
Figura 8 –	População heterogênea de rolamentos - Distribuição mista de Weibull	48
Figura 9 –	Impacto dos Parâmetros na Taxa de Custo	60
Figura 10 –	Impacto da Heterogeneidade da População no Custo de Comportamento da política ótima	61
Figura 11 –	Análise completa de sensibilidade da taxa de custo	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parque de máquinas por setor produtivo	36
Tabela 2 –	Análise de frequência de falhas no grupo impressor	39
Tabela 3 –	Classificação ISO do dano no rolamento e dos modos de falha	46
Tabela 4 –	Notação utilizada na modelagem da política híbrida	51
Tabela 5 –	Parâmetros de entrada para o Caso Base (CB)	54
Tabela 6 –	Análise de sensibilidade dos parâmetros da política	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
CBM	Manutenção Baseada na Condição
FAG	<i>Fischer Aktien-Gesellschaft</i> (Fabricante de rolamentos)
OEE	<i>Eficiência Global dos Equipamentos</i>
RCM	Reliability-Centered Maintenance
SLSQP	Programação de Mínimos Quadrados Sequenciais
TPM	Manutenção Produtiva Total

LISTA DE SIMBOLOS

X	Tempo até a chegada do defeito
H	<i>Delay-time</i> (intervalo entre o defeito e a falha)
$f_x(x)$	Função densidade de probabilidade da variável aleatória X
$F_x(x)$	Função de distribuição acumulada da variável aleatória X
$R_x(x)$	Função de confiabilidade da variável aleatória X
$f_H(h)$	Função densidade de probabilidade da variável aleatória H
$F_H(h)$	Função de distribuição acumulada da variável aleatória H
$R_H(h)$	Função de confiabilidade da variável aleatória H
λ	Taxa de falha associada ao <i>delay-time</i>
CF	Custo de substituição corretiva
CP	Custo de substituição preventiva
CI	Custo de cada inspeção
K	Número máximo de inspeções durante a fase inicial
Δ	Intervalo de tempo entre inspeções periódicas
T	Idade para substituição preventiva
p	Proporção de componentes fracos na população
η_1, β_1	Parâmetros da distribuição de Weibull para componentes fracos
η_2, β_2	Parâmetros da distribuição de Weibull para componentes fortes
$CR(K, \Delta, T)$	Taxa de custo (função objetivo)
$EC(K, \Delta, T)$	Custo esperado do ciclo
$EL(K, \Delta, T)$	Duração esperada do ciclo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.3.1	Objetivo geral.....	18
1.3.2	Objetivos específicos.....	18
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	20
2.2	DEFINIÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	21
2.3	CLASSIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	22
2.3.1	Manutenção corretiva.....	24
2.3.2	Manutenção preditiva.....	25
2.3.3	Manutenção preventiva.....	26
2.4	POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO.....	27
2.4.1	Ações de manutenção baseadas no tempo.....	27
2.4.2	Ações de manutenção baseadas na condição.....	28
2.5	MODELO <i>DELAY-TIME</i>	30
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	32
3.2	MODELAGEM ANALÍTICA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL...	33
4	DESENVOLVIMENTO.....	35
4.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	35
4.2	IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA CRÍTICO.....	38
4.3	COMPONENTE CRÍTICO.....	41
4.4	ROLAMENTO.....	44
4.5	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA.....	47
4.6	CRITÉRIO DE DECISÃO E MODELAGEM.....	49
4.7	ANÁLISE DA PERFORMANCE DA POLÍTICA PROPOSTA.....	53
4.7.1	Análise de sensibilidade.....	55

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

O cenário empresarial contemporâneo tem sido moldado por transformações tecnológicas e pela integração de mercados, fatores que reconfiguraram as relações competitivas e expandiram o escopo de atuação das organizações. Neste contexto dinâmico, observa-se não apenas uma intensificação da concorrência, mas também uma maior cobrança por práticas corporativas socialmente responsáveis.

No âmbito da gestão de ativos, a função manutenção experimentou uma notável trajetória de evolução, com significativos avanços tanto em sua fundamentação teórica quanto na aplicação prática pelas empresas (Muchiri et al., 2011). Esta transição, motivada pela sofisticação dos sistemas produtivos e pela incessante busca por eficiência e redução de custos, tem orientado as organizações na adoção de abordagens de manutenção mais estratégicas e eficazes (Jardine; Tsang, 2013).

Em períodos anteriores, a atividade de manutenção ocupava uma posição de baixo prestígio nas estruturas organizacionais, sendo frequentemente tratada como uma função secundária ou até como um entrave ao ritmo produtivo. Tal percepção era reforçada por uma tensão histórica entre as áreas de operações e manutenção: enquanto a produção buscava maximizar o output e o retorno financeiro, as intervenções de manutenção eram vistas como interrupções indesejadas, sobretudo quando envolviam paradas não programadas (Kelly, 2006; Wireman, 2004). Essa visão reducionista, que interpretava a manutenção como um centro de custos e não como uma atividade estratégica, era amplamente disseminada no ambiente industrial e refletia modelos gerenciais da época, marcados por baixa integração entre confiabilidade e desempenho operacional (Pintelon e Parodi-Herz, 2008; Moubray, 1997). Com isso, consolidou-se durante décadas uma abordagem limitada, na qual o papel da manutenção era subestimado, restringindo seu potencial de contribuição para a competitividade organizacional.

O campo de atuação da manutenção, em suas formas mais desenvolvidas, supera em muito o simples objetivo de conservar equipamentos. Ela representa um conjunto integrado de ações de caráter estratégico, voltadas para assegurar a vida útil dos ativos, manter sua disponibilidade operacional, prepará-los para situações de contingência e, de modo fundamental, resguardar a integridade física dos

colaboradores (Blanchard, 2017). A falta de atenção a essas práticas pode acarretar consequências severas, incluindo falhas de grande porte, acidentes e danos ambientais, cujos impactos se estendem para muito além dos limites da empresa, afetando a sociedade como um todo (Dhillon, 2002). Eventos como o desastre de Mariana, em 2015, servem como exemplos elucidativos dos riscos inerentes à gestão inadequada de ativos críticos, evidenciando que as falhas em manutenção podem ter desdobramentos que transcendem perdas produtivas, colocando vidas em risco e provocando graves degradações ambientais.

Diante desse quadro, a implementação de políticas de manutenção robustas constitui uma condição fundamental para assegurar a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos. A aplicação de políticas bem concebidas, que integrem a manutenção preventiva, reconhecida como um pilar para garantir a disponibilidade e a confiabilidade dos ativos (Blanchard, 2017), e a manutenção preditiva, cuja finalidade é reduzir falhas e elevar a eficiência operacional (Ruschel; Santos; Costa, 2017), torna-se uma necessidade evidente. Tais políticas devem refletir os objetivos estratégicos da organização e considerar as particularidades de cada setor industrial. Uma gestão de manutenção eficaz exige, além da adequada definição de responsabilidades, a implementação de rotinas de monitoramento contínuo e a análise sistemática do desempenho dos ativos.

Nessa perspectiva, segmentos industriais que operam com máquinas de alta especialização, como é o caso das destinadas à extrusão, impressão, laminação e conformação de plásticos, deparam-se com desafios suplementares, uma vez que falhas imprevistas podem ocasionar significativos atrasos, desperdícios de material e prejuízos financeiros. Nessas circunstâncias, o monitoramento ininterrupto e a modelagem de políticas de manutenção tornam-se componentes indispensáveis da gestão. Conforme assinala Dhillon (2002), a manutenção na contemporaneidade precisa superar a mera correção de avarias, integrando em sua rotina práticas de caráter preventivo e preditivo com vistas a minimizar riscos operacionais e potencializar a eficiência dos sistemas produtivos.

Esta problemática adquire especial relevo na indústria de transformação plástica, na qual a complexidade dos equipamentos e o caráter frequentemente contínuo ou semi-contínuo dos processos demandam um nível de cuidado ainda mais apurado. Máquinas como extrusoras, impressoras e laminadoras exigem uma

gestão de manutenção meticulosamente planejada para evitar paralisações inesperadas e assegurar a qualidade da produção. Ademais, faz-se necessário monitorar questões como superaquecimento, desgaste de componentes críticos e falhas no controle de qualidade, cuja ocorrência pode resultar em desperdício de recursos, riscos ambientais e impactos financeiros negativos (ABIPLAST, 2023).

Considerando a competitividade inerente ao ambiente industrial global e a premência de manter os ativos operantes no segmento de transformação plástica, emerge o seguinte questionamento de pesquisa: uma vez identificado o sistema mais crítico de uma organização, de que maneira é possível modelar uma política de manutenção que favoreça a eficiência operacional desse ativo, tendo em vista a minimização do custo médio a longo prazo? O estudo propõe desenvolver uma modelagem matemática que harmonize, de maneira equilibrada, as dimensões econômicas e operacionais, levando em conta elementos como vida útil remanescente, custos associados às intervenções de manutenção e a probabilidade de ocorrência de falhas.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A indústria de embalagens plásticas mantém sua relevância no cenário econômico devido à versatilidade, custo-benefício e ampla aplicabilidade de seus produtos. Conforme destaca o estudo do setor, a capacidade de atendimento a mercados diversificados consolida a importância estratégica desse segmento (ABIPLAST, 2023). No entanto, a competitividade inerente a esse mercado exige níveis elevados de eficiência operacional, um desafio que muitas empresas enfrentam devido a problemas crônicos em seus processos produtivos.

O problema investigado neste estudo foi inspirado na realidade operacional de uma indústria localizada no agreste pernambucano, que enfrenta recorrentes dificuldades em seu setor de impressão. As impressoras flexográficas, equipamentos essenciais para a agregação de valor aos produtos fabricados, apresentam interrupções frequentes ao longo da operação. A maior parte dessas paradas está relacionada a falhas no conjunto impressor, especialmente em componentes do cilindro anilox, considerado o elemento central do sistema de dosagem de tinta.

Essas interrupções impactam significativamente a produtividade, causando atrasos na entrega dos pedidos, desperdício de substrato e tintas, e aumento dos custos operacionais. Nakajima (1988) destaca que falhas frequentes em componentes críticos de equipamentos afetam diretamente a Eficiência Global dos Equipamentos (OEE), tornando a implementação de políticas de manutenção preditiva uma estratégia essencial para minimizar paradas não programadas. A necessidade constante de intervenções corretivas no conjunto impressor compromete a eficiência da produção, reduzindo a capacidade da empresa de atender à demanda do mercado de forma ágil e competitiva.

A ausência de uma manutenção adequada do sistema anilox-rolamento também compromete diretamente a qualidade do produto. Variações no sistema de impressão, causadas por componentes em desgaste, podem gerar defeitos como banding (listras) e inconsistência na aplicação de cor, resultando em produtos que não atendem aos padrões exigidos pelo mercado. Na indústria de embalagens plásticas, qualquer falha na qualidade de impressão compromete o valor percebido da embalagem, aumentando as taxas de refugo e insatisfação do cliente.

Além dos impactos financeiros e produtivos, a falta de uma política de manutenção estruturada para componentes de alta rotação, como os rolamentos do anilox, pode comprometer a segurança dos trabalhadores. Falhas catastróficas em componentes rotativos representam riscos operacionais significativos, podendo ocasionar a projeção de partes e prejudicar a integridade dos colaboradores. Dessa forma, a implementação de uma política de manutenção eficaz e baseada na condição do ativo não apenas melhora a eficiência do processo produtivo, mas também contribui para um ambiente de trabalho mais seguro.

1.2 JUSTIFICATIVA

A ocorrência de interrupções frequentes e avarias imprevistas no parque industrial sinaliza a necessidade premente de uma investigação aprofundada para isolar o equipamento de maior criticidade e, dentro dele, o componente com maior propensão a falhar. Como fundamenta Smith e Hinchcliffe (2004), a efetividade de qualquer programa de confiabilidade está intrinsecamente ligada à correta identificação e gestão dos modos de falha que mais impactam os objetivos do

negócio. Um diagnóstico preciso desses pontos de fragilidade é, portanto, o alicerce para a concepção de um plano de manutenção verdadeiramente estratégico e eficaz.

Ao adotar uma postura proativa, orientada pela prevenção, a organização pode elevar substancialmente a confiabilidade de seus ativos. Essa transição para uma mentalidade preventiva, conforme os princípios do TPM (Manutenção Produtiva Total) defendidos por Nakajima (1988), é um passo decisivo para a estabilização do fluxo produtivo. O impacto econômico dessa mudança é significativo: ao minimizar as intervenções corretivas de emergência, que são invariavelmente mais onerosas, e ao reduzir o desperdício de insumos causado por paradas bruscas, a empresa experimenta uma sensível contenção de custos, além de promover um prolongamento da vida útil dos equipamentos.

As implicações positivas transcendem a esfera operacional e financeira imediata, refletindo-se no fortalecimento da posição competitiva da empresa a médio e longo prazos. A implementação de frameworks consagrados, como a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) e técnicas preditivas, não se restringe à mera eliminação de falhas. Segundo Pinto e Xavier (2018), tais metodologias permitem uma reestruturação da gestão de ativos, pavimentando o caminho para uma operação industrial mais eficiente, ágil e sustentável. Desta forma, a presente proposta de pesquisa visa solucionar uma deficiência operacional palpável, ao mesmo tempo em que agrega valor estratégico ao negócio.

Por fim, é crucial destacar que uma estratégia de manutenção ineficaz carrega consigo riscos que vão além da produção, podendo comprometer a segurança do ambiente de trabalho e a uniformidade da qualidade do produto final. Falhas súbitas podem criar cenários de risco para os colaboradores e resultar em não-conformidades que afetam a percepção do cliente sobre a marca (Moura e Andrade, 2019). Assim, o estudo contribui simultaneamente para a resiliência operacional, a proteção das pessoas e a consolidação da reputação empresarial no mercado de embalagens plásticas.

1.3 OBJETIVO

Esta seção delinea a finalidade central da pesquisa, apresentando o objetivo macro que orienta o estudo, bem como os objetivos específicos que operacionalizam sua consecução.

1.3.1 Objetivo geral

Aplicar um modelo de política de manutenção baseada em ações híbridas ao componente de maior criticidade de um sistema produtivo essencial em uma indústria de transformação de plásticos, de modo a avaliar seu potencial para aumentar a disponibilidade operacional e reduzir o custo médio a longo prazo.

1.3.2 Objetivo específicos

Para a plena realização do objetivo geral, esta pesquisa propõe os seguintes objetivos específicos:

- Revisar a literatura especializada sobre gestão de manutenção e políticas de manutenção aplicáveis a sistemas produtivos industriais;
- Caracterizar o sistema produtivo crítico da organização analisada por meio de estudo de caso;
- Identificar o componente de maior criticidade em termos de impacto operacional e histórico de falhas;
- Aplicar a política de manutenção híbrida proposta por Scarf et al. (2009) ao componente crítico selecionado, considerando os parâmetros operacionais e econômicos pertinentes;
- Avaliar o desempenho da política aplicada por meio de simulação numérica e propor recomendações gerenciais para sua implementação prática.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em quatro capítulos, que desenvolvem de forma sequencial e lógica a pesquisa, conforme exposto a seguir.

O primeiro capítulo, Introdução, apresenta a contextualização do estudo no âmbito da indústria de transformação plástica, destacando a relevância estratégica da manutenção para a competitividade empresarial. São definidos o problema de pesquisa, relacionado às falhas recorrentes no sistema de impressão, bem como os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a metodologia científica empregada para o desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo, Referencial Teórico, constitui a fundamentação conceitual da pesquisa. Aborda a evolução histórica da manutenção industrial, com ênfase nas estratégias contemporâneas de gestão de ativos. Serão examinados os princípios teóricos da Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) e da Manutenção Baseada em Condição, além das características técnicas dos sistemas de impressão flexográfica, particularmente o cilindro anilox e seus componentes críticos. Também são revisadas as abordagens de modelagem matemática para otimização de políticas de manutenção.

O terceiro capítulo, Desenvolvimento e Análise, compreende a aplicação prática do estudo. É detalhado o estudo de caso na empresa do agreste pernambucano, com a caracterização do ambiente produtivo e o diagnóstico das práticas de manutenção. Realiza-se a identificação e análise do componente crítico: o rolamento do conjunto anilox do sistema impressor. Apresenta-se o desenvolvimento da modelagem matemática para a política de inspeção híbrida proposta, seguida pela aplicação numérica do modelo e pela execução de análise de sensibilidade para avaliação da robustez dos resultados.

O quarto capítulo, Conclusões e Recomendações, sintetiza as contribuições da pesquisa. Recuperam-se os objetivos estabelecidos para avaliar o alcance dos resultados obtidos com a política de manutenção modelada. As conclusões destacam a relevância do estudo para o aumento da confiabilidade operacional do parque de impressão, enquanto as recomendações orientam a implementação prática das soluções propostas. Por fim, sugerem-se direcionamentos para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos essenciais para a compreensão e desenvolvimento deste trabalho. A base conceitual aqui construída permitirá uma análise consistente do problema das falhas recorrentes no sistema de impressão, fundamentando a proposta de modelagem de uma política de manutenção especializada. Serão abordados a evolução histórica da manutenção, suas definições e classificações, bem como os modelos analíticos que suportam a tomada de decisão em gestão de ativos críticos.

2.1 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO

A manutenção, enquanto prática organizada, está diretamente ligada ao avanço industrial e ao aumento da complexidade dos equipamentos. Entretanto, a ideia de manter ferramentas e dispositivos em condições adequadas é tão antiga quanto a própria humanidade, remontando à necessidade de consertar instrumentos rudimentares na pré-história (Moubray, 2015).

Com a Revolução Industrial no século XVIII, a prática assumiu uma forma mais estruturada. A crescente mecanização nas fábricas trouxe uma dependência maior de máquinas, e a manutenção começou a ser percebida como um componente essencial para evitar falhas inesperadas e garantir a continuidade dos processos produtivos (Almeida, 2005).

Nesse contexto inicial, a manutenção era predominantemente reativa, concentrando-se em corrigir problemas somente após a ocorrência de falhas. Conforme apontado por Gonçalves (2010), a ausência de uma abordagem estratégica levava as empresas a enxergar a manutenção como um mero gasto inevitável, em vez de um investimento essencial para a eficiência operacional. Esta visão, como destacado na introdução deste trabalho, criava uma tensão estrutural entre as áreas de operação e manutenção.

Após a Segunda Guerra Mundial, a manutenção passou por uma transformação significativa, impulsionada pela modernização industrial e pela crescente automação. Nos anos 1960, a manutenção preditiva emergiu como uma resposta inovadora aos novos desafios da complexidade dos equipamentos. De

acordo com Pereira (2003), essa abordagem marcou um ponto de inflexão, pois, pela primeira vez, as decisões podiam ser baseadas em dados objetivos, aumentando consideravelmente a confiabilidade dos sistemas.

Um salto ainda mais significativo ocorreu a partir da década de 1980, com a consolidação da Manutenção Baseada em Condição (CBM), impulsionada por avanços tecnológicos em monitoramento. Isso representou uma mudança de paradigma, transformando a manutenção de uma função operacional para uma estratégica (Moura e Andrade, 2019).

Na contemporaneidade, no contexto da Indústria 4.0, tecnologias como inteligência artificial e big data transformaram os modelos tradicionais. Práticas como a CBM e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) mostram a evolução da área, agora voltada para sustentabilidade, redução de custos e maior competitividade (Moura e Andrade, 2019).

2.2 DEFINIÇÃO DA MANUTENÇÃO

Para este estudo, adota-se a definição clássica de Moubray (1997), que caracteriza a manutenção como "todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um item, destinadas a mantê-lo ou recolocá-lo em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida". Esta visão abrangente vai além do simples reparo, englobando a preservação da função do ativo e o gerenciamento de processos imprevisíveis que podem levar a um estado de falha, conceito este detalhado por Dhillon (2002) como a incapacidade de um sistema ou componente de desempenhar sua função requerida dentro dos limites especificados.

No contexto industrial moderno, a manutenção desempenha um papel fundamental ao assegurar a disponibilidade operacional de equipamentos e instalações. Conforme Kardec e Nascif (2001), sua finalidade é atender às demandas do processo produtivo de forma confiável, segura e com custos adequados, promovendo a preservação ambiental. Os autores ressaltam que a função da manutenção deve transcender a mera eficiência em realizar reparos rápidos, buscando também a eficácia na garantia da operação contínua e na prevenção de interrupções.

Esta necessidade é universal. Nakajima (1988), um dos pais do TPM (Total Productive Maintenance), já destacava que todos os equipamentos, independentemente de sua complexidade, estão sujeitos à degradação e demandam intervenções para restaurar e preservar suas condições ideais. Tais intervenções são essenciais para garantir que a produção não seja impactada negativamente, preservando tanto a eficiência do processo quanto a qualidade dos produtos finais.

Para que estes serviços de reparo e preservação sejam realizados de maneira organizada, eficiente e produtiva, é crucial uma gestão estruturada. Pintelon e Parodi-Herz (2008) enfatizam que a manutenção deve ser vista como um sistema integrado, cabendo à sua gestão a definição de estratégias, métricas e procedimentos que otimizem o desempenho dos ativos físicos.

Neste contexto, é fundamental a distinção conceitual entre manutenção como função e manutenção como processo. Jardine e Tsang (2013) elucidam essa diferenciação:

- Manutenção como função: refere-se à área ou departamento da organização com a responsabilidade de assegurar a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos físicos. É uma unidade organizacional com papéis e responsabilidades definidos.
- Manutenção como processo: corresponde à sequência de atividades e à aplicação prática de recursos (mão de obra, ferramentas, peças, informações) para executar as ações que garantem a condição operacional do ativo. Refere-se às tarefas específicas de inspeção, reparo e substituição.

A partir das definições apresentadas, consolida-se o entendimento da manutenção como uma disciplina estratégica, cujo propósito é garantir que os ativos produtivos cumpram sua missão com confiabilidade e custo otimizado ao longo de todo o seu ciclo de vida.

2.3 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, destacam-se a corretiva, realizada após a ocorrência de uma falha; a preventiva, baseada em intervalos de tempo ou uso para antecipar possíveis quebras; e a preditiva, que monitora parâmetros específicos do equipamento para intervenções no momento mais oportuno. Apesar de suas abordagens distintas, essas modalidades podem atuar de forma complementar, garantindo assim a confiabilidade operacional do sistema produtivo.

Quando existe um plano de manutenção estabelecido, a distinção entre os tipos se dá pela base de decisão para intervenção:

- Se a decisão é baseada no monitoramento contínuo de variáveis de condição (como vibração, temperatura, ruído), caracteriza-se como manutenção preditiva ou Manutenção Baseada em Condição (CBM). Esta abordagem utiliza sensores e análise de dados para permitir intervenções precisas quando são detectados sinais de degradação incipiente;
- A manutenção preventiva é caracterizada quando a decisão de intervir é tomada com base em critérios pré-definidos, como tempo de calendário, horas de operação acumuladas, número de ciclos de trabalho ou quantidade de inspeções realizadas. Esta estratégia é planejada antecipadamente, baseando-se em políticas que não exigem o monitoramento contínuo do estado físico instantâneo do equipamento.

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, pode-se implementar monitoramento contínuo para acionar intervenções preditivas, complementado por inspeções periódicas para verificação de condição. Se nenhum indício de falha for detectado, ainda pode ser realizada uma substituição preventiva baseada em idade ou uso acumulado. Eventualmente, se ocorrer uma falha inesperada, aplica-se a manutenção corretiva. Esta combinação proporciona maior flexibilidade e confiabilidade na tomada de decisão, permitindo otimizar recursos e maximizar a disponibilidade do ativo.

2.3.1 Manutenção corretiva

A Manutenção Corretiva (MC) caracteriza-se como uma abordagem reativa, acionada após a ocorrência de uma falha em um equipamento, com o objetivo primordial de restaurar sua funcionalidade e normalizar o processo produtivo no menor tempo possível. Sendo a forma mais antiga de manutenção, com origens na própria Revolução Industrial, sua aplicação permanece relevante em contextos específicos, notadamente em componentes não críticos ou quando a análise de custo-benefício não justifica o investimento em estratégias proativas (Blanchard, 2017).

A principal vantagem aparente da MC reside em seus custos iniciais diretos extremamente baixos, uma vez que não demanda investimentos significativos em planejamento, monitoramento ou tecnologias especializadas. Conforme aponta Pintelon e Parodi-Herz (2008), esta característica a torna uma opção pragmaticamente válida para uma série de cenários, como falhas imprevisíveis em equipamentos de baixa criticidade ou em sistemas com redundância operacional, desde que executada com agilidade e eficiência para conter os prejuízos.

Contudo, a análise superficial dos custos iniciais oculta uma realidade financeira mais complexa. A natureza reativa da MC frequentemente resulta em custos totais significativamente mais elevados no longo prazo. Estes custos são compostos não apenas pelo reparo em si, mas principalmente pelas perdas decorrentes de paradas de produção não planejadas, potenciais danos colaterais a outros componentes e a perda de oportunidades de venda devido à indisponibilidade (Mobley, 2002). Além disso, a prática recorrente de intervenções corretivas pode acelerar o desgaste geral do ativo, reduzindo sua vida útil e gerando um ciclo vicioso de reparos cada vez mais frequentes e onerosos.

Neste sentido, conforme sintetiza Dhillon (2002), a manutenção corretiva deve ser compreendida essencialmente como uma solução de curto prazo. A sua dependência exclusiva, na ausência de uma estratégia de manutenção mais abrangente, configura-se como uma prática gerencialmente ineficiente e financeiramente dispendiosa, comprometendo a confiabilidade operacional e a competitividade da organização.

2.3.2 Manutenção preventiva

A Manutenção Preventiva (MP) constitui uma abordagem proativa e sistemática de gestão de ativos, cujo princípio fundamental é a execução de intervenções planejadas com o objetivo de prevenir a ocorrência de falhas. Diferente da abordagem corretiva, a MP opera com base em um cronograma pré-estabelecido, que pode ser definido por variáveis temporais (ex.: dias, meses) ou de utilização (ex.: horas de operação, ciclos de produção). Suas atividades típicas incluem inspeções regulares, lubrificação, ajustes e substituição de componentes, visando manter os ativos em condições operacionais ideais (Moura, 2017).

O surgimento e a consolidação da manutenção preventiva estão intrinsecamente ligados à complexificação dos parques industriais. Conforme assinala Nakajima (1988), a necessidade de garantir a continuidade dos processos produtivos em larga escala, um dos pilares do Total Productive Maintenance (TPM), tornou imperativo um modelo de manutenção que reduzisse a frequência de paradas não programadas. Nesse contexto, a MP emergiu como um paradigma essencial, evoluindo de uma prática emergente para um pilar da gestão de ativos.

Os benefícios dessa estratégia são multifacetados. Ela é reconhecida por assegurar a disponibilidade e confiabilidade dos ativos, otimizando custos no longo prazo e prolongando significativamente sua vida útil (Blanchard e Fabrycky, 2006). Adicionalmente, contribui para a sustentabilidade ambiental, uma vez que a extensão da vida útil dos equipamentos e a prática da remanufatura reduzem a geração de resíduos e o consumo de recursos (Gungor e Gupta, 2019).

Contudo, a implementação da MP não está isenta de desafios. O principal risco reside na sua potencial sub-otimização. Intervenções excessivamente frequentes ou a substituição de componentes que ainda possuíam vida útil remanescente podem gerar custos desnecessários, consumo prematuro de peças sobressalentes e introduzir riscos de falha devido à própria intervenção, um fenômeno discutido por Pintelon e Parodi-Herz (2008). Consequentemente, a MP pode se tornar uma prática onerosa e ineficiente se não for criteriosamente planejada.

Portanto, a otimização da manutenção preventiva reside no equilíbrio crítico entre a frequência das intervenções e os benefícios por ela gerados. Conforme

aponta Dhillon (2002), é fundamental determinar o intervalo ótimo que maximize a disponibilidade e a confiabilidade do equipamento, sem comprometer a eficiência econômica da operação. Esse equilíbrio é a chave para transformar a manutenção preventiva de uma despesa operacional fixa em um investimento estratégico de alto retorno.

2.3.3 Manutenção preditiva

A Manutenção Baseada em Condição (CBM, do inglês Condition-Based Maintenance) representa um avanço significativo em relação às estratégias de manutenção tradicionais. Consolidada a partir do final do século XX com o amadurecimento das tecnologias de monitoramento, sua premissa fundamental é determinar a necessidade de intervenção com base no estado real do ativo, por meio de técnicas como análise de vibração, termografia infravermelha, análise de óleo e ultrassom. A Manutenção Preditiva (PdM, do inglês Predictive Maintenance) é uma evolução conceitual da CBM. Enquanto a CBM identifica falhas incipientes com base no estado presente do equipamento, a PdM utiliza esses dados de condição, integrados a análises históricas e modelos prognósticos, para prever o momento futuro da falha e programar a intervenção no momento mais oportuno (Mobley, 2002).

O cerne dessa estratégia reside na capacidade de transformar dados em insights acionáveis. Ao monitorar continuamente ou em intervalos regulares parâmetros significativos da condição do equipamento, é possível identificar anomalias e tendências de falha antes que estas evoluam para uma parada total do sistema. Isso permite o planejamento de intervenções no momento mais oportuno, tornando-as substancialmente mais assertivas e eficazes (Jardine, Tsang e Joseph, 2005).

Os benefícios operacionais e econômicos da MdP são expressivos. Conforme documentado por Blanchard (2017), sua implementação está diretamente associada à drástica redução de paradas não programadas, à otimização do uso de peças sobressalentes e da mão de obra, e ao prolongamento da vida útil dos ativos. Ademais, ao evitar falhas catastróficas, contribui significativamente para a melhoria do ambiente de segurança nas operações.

Apesar das vantagens, a implementação da MdP não é isenta de desafios. O principal obstáculo reside no elevado investimento de capital inicial requerido para aquisição de sensores, sistemas de aquisição de dados e softwares especializados para análise. Somado a isso, existe a necessidade de um investimento paralelo na capacitação de profissionais para operar essas tecnologias e interpretar corretamente as informações geradas, formando uma equipe de análise com conhecimentos especializados (Moura, 2017).

Contudo, conforme destacam Ruschel, Santos e Costa (2021), a relação custo-benefício tende a ser altamente favorável no longo prazo para ativos críticos. A economia gerada pela eliminação de paradas inesperadas, a redução de reparos de grande porte e o aumento da disponibilidade do equipamento frequentemente superam os custos iniciais, tornando a MdP um investimento estratégico.

Do ponto de vista conceitual, é crucial entender que a manutenção preditiva é uma forma sofisticada e baseada em condição de manutenção preventiva. Ambas compartilham o objetivo primordial de evitar a ocorrência da falha. A distinção reside no gatilho para a ação: enquanto a preventiva tradicional age com base em intervalos de tempo ou uso fixos, a preditiva age com base no diagnóstico do estado real do componente, otimizando o momento exato da intervenção (Dhillon, 2002).

2.4 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

Esta seção apresenta duas classes de políticas de manutenção essenciais: as Ações Baseadas no Tempo e as Ações Baseadas na Condição. Ambas são amplamente utilizadas nas organizações e possuem particularidades que as tornam mais adequadas para diferentes contextos operacionais. A escolha entre uma e outra impacta diretamente a eficácia e a eficiência dos sistemas produtivos, devendo ser alinhada à criticidade do ativo e aos objetivos estratégicos da manutenção.

2.4.1 Ações de manutenção baseadas no tempo

As ações de Manutenção Baseadas no Tempo (TBM) envolvem a execução de tarefas de manutenção em intervalos fixos predeterminados, independentemente do estado atual de degradação dos equipamentos (Jardine e Tsang, 2013). O

conceito central desta abordagem é realizar intervenções periódicas e programadas com base em critérios temporais preestabelecidos, como dias, meses ou horas de operação. O objetivo primordial é prevenir falhas inesperadas e garantir que os equipamentos operem de forma eficiente, segura e confiável ao longo do tempo (Mobley, 2002).

Conforme destacado por Nakajima (1988) em seus princípios de Total Productive Maintenance (TPM), a manutenção baseada em intervalos regulares é fundamental para estabilizar processos e eliminar perdas. Esta abordagem é amplamente utilizada em diversos setores industriais, especialmente em sistemas multi-componentes, onde a substituição preventiva sincronizada de peças pode prevenir falhas em cascata e otimizar o desempenho global do sistema.

Esta estratégia é frequentemente aplicada em ambientes onde o risco de falhas catastróficas é elevado ou onde os equipamentos apresentam um histórico comprovado de desgaste regular e previsível (Blanchard, 2017). A principal vantagem da manutenção baseada no tempo é a previsibilidade que oferece ao planejamento operacional. Por exemplo, se um fabricante ou a experiência operacional determina que um rolamento crítico deve ser inspecionado ou substituído a cada 5.000 horas de operação, este intervalo é rigorosamente seguido, independentemente de o equipamento apresentar, ou não, sinais evidentes de falha iminente.

A importância da TBM é particularmente clara em contextos de produção que exigem alta disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, como em linhas de produção contínua, sistemas de utilidades e operações críticas onde paradas não programadas resultam em impactos financeiros severos. De acordo com Dhillon (2002), esta abordagem é fundamental para garantir a continuidade da operação e constitui a base para a estabilização de processos produtivos, prevenindo paralisações inesperadas que poderiam gerar grandes prejuízos.

2.4.2 Ações de manutenção baseadas na condição

Diferentemente da manutenção baseada no tempo (TBM), a Manutenção Baseada na Condição (MBC) adapta-se ao comportamento real do equipamento, permitindo que as intervenções sejam realizadas apenas quando necessárias, com

base no monitoramento de parâmetros de diagnóstico como vibração, temperatura, análise de óleo e ultrassom (Mobley, 2002).

Conforme destacam Jardine, Tsang e Joseph (2005), a CBM, impulsionada pelos avanços tecnológicos em sensoriamento e análise de dados, consolida-se como uma estratégia promissora para otimizar a gestão de ativos, reduzir custos e aumentar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos industriais. Seu conceito central reside no monitoramento contínuo ou periódico das condições operacionais, utilizando tecnologias de diagnóstico para detectar estágios iniciais de degradação e agir de forma preventiva antes que a falha se torne crítica.

Quando os dados analisados indicam que um componente está se aproximando de um estado de falha iminente ou operando fora de seus parâmetros normais, a manutenção é acionada de forma planejada. Esta abordagem é particularmente valiosa em máquinas e sistemas críticos, como turbinas, compressores, motores de alta potência e, no contexto deste estudo, nos rolamentos de cilindros anilox de impressoras flexográficas, onde falhas não detectadas podem resultar em danos significativos e custos elevados de reparo e produção (Blanchard, 2017).

A principal vantagem da CBM é a redução de custos com manutenções desnecessárias, uma vez que as intervenções são realizadas estritamente com base na condição real do ativo. Adicionalmente, ela maximiza a disponibilidade dos sistemas, pois os problemas são identificados e corrigidos de forma planejada, evitando paradas não programadas, e aumenta a confiabilidade ao prevenir falhas catastróficas (Dhillon, 2002).

É importante destacar que a CBM não exige, necessariamente, monitoramento contínuo. Em muitos contextos práticos, a avaliação da condição é realizada em inspeções periódicas, que podem ser regulares ou irregulares. Esta abordagem de monitoramento discreto é frequentemente modelada com base no conceito de delay-time, onde o intervalo entre inspeções é otimizado para detectar um defeito no período em que ele é identificável antes de evoluir para uma falha funcional (Christer, 1999). Esta flexibilidade torna a CBM aplicável a uma ampla gama de orçamentos e complexidades tecnológicas.

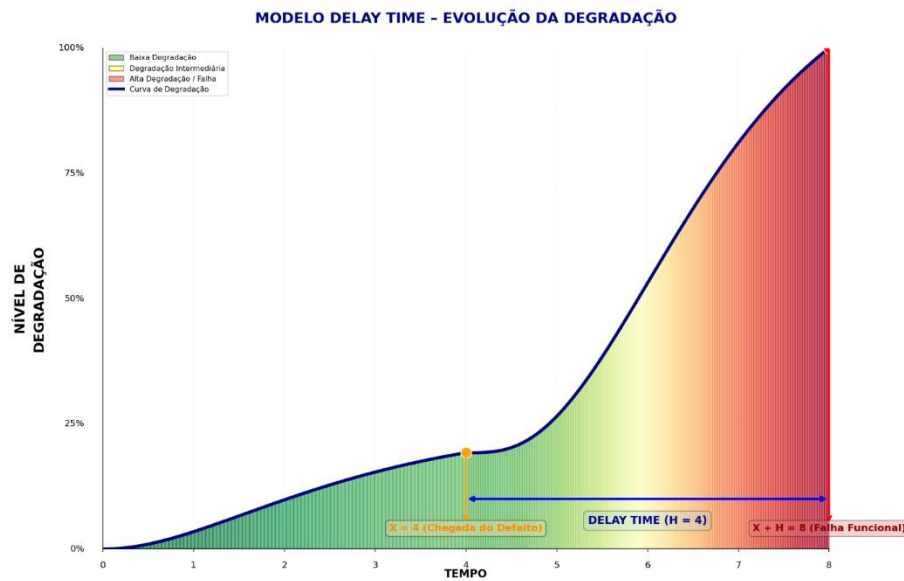
2.5 MODELO *DELAY-TIME*

O conceito de delay-time é amplamente empregado para representar um processo de degradação em dois estágios: (i) a transição do estado “bom” para o estado “defeituoso”; e (ii) a progressão do estado “defeituoso” para o estado de falha, intervalo este denominado delay-time. Os tempos associados a esses dois estágios são modelados por variáveis aleatórias, usualmente denotadas por X e H , respectivamente. (Christer, 1999)

O estado defeituoso permite a operação com desempenho reduzido. Detectável por inspeções, possibilita intervenções planejadas antes da falha funcional.

Compreender e estimar a duração deste intervalo, o delay-time, é essencial para implementar estratégias de manutenção que previnam falhas inesperadas e otimizem a disponibilidade dos ativos. A análise do delay time tem sido amplamente aplicada para modelar problemas de decisão em manutenção, auxiliando na determinação da frequência ótima de inspeções e na alocação eficiente de recursos para evitar falhas críticas (Wang, 2012). Esta abordagem é particularmente valiosa para minimizar custos operacionais totais, melhorar a confiabilidade dos equipamentos e reduzir paradas não planejadas.

A implementação prática do conceito de delay-time tem sido viabilizada por tecnologias de monitoramento, como sensores inteligentes, IoT e análise de dados. Essas ferramentas permitem a detecção precoce de falhas durante a janela de oportunidade (delay-time), possibilitando intervenções planejadas que reduzem paradas não programadas e otimizam a vida útil dos ativos (Jardine, Tsang e Joseph, 2005). A Figura 1 ilustra esquematicamente esse processo de degradação em dois estágios.

Figura 1 – Conceito *Delay-time*.

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 1 apresenta dois estágios distintos de degradação. Neste exemplo, é possível observar que, 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. 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 1, 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.

Além disso, é importante notar que, embora a Figura 1 apresente um processo de degradação contínuo, usualmente, quando se usa o conceito de *delay-time*, essa evolução não é acompanhada em tempo real, daí a necessidade de inspeções periódicas para identificar a presença do defeito.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa caracteriza-se pela utilização conjugada das abordagens qualitativa e quantitativa, configurando uma estratégia de métodos mistos. A dimensão qualitativa permite uma compreensão aprofundada da complexidade operacional do sistema de impressão, considerando os fatores organizacionais e contextuais que influenciam o desempenho do conjunto anilox (Creswell, 2014; Yin, 2016). Já a abordagem quantitativa possibilita a análise sistemática de dados numéricos, como taxas de falha e indicadores de condição do rolamento, fundamentando a modelagem matemática proposta para otimização das políticas de manutenção (Field, 2017; Montgomery, 2019).

Quanto à sua natureza, a pesquisa classifica-se como aplicada, pois visa gerar conhecimento direcionado à solução do problema específico relacionado às falhas recorrentes no sistema de impressão da organização estudada. Esta orientação para aplicação prática caracteriza pesquisas que buscam responder a problemas concretos do ambiente organizacional (Gil, 2008; Proença e Bandeira, 2020). Em relação aos objetivos, este estudo configura-se como explicativo, pois busca identificar as relações causais entre as variáveis operacionais e os modos de falha do rolamento do anilox, compreendendo os fatores determinantes para sua degradação (Gil, 2008; Lakatos e Marconi, 2017). Esta compreensão causal é fundamental para o desenvolvimento de modelos preditivos robustos em gestão de ativos críticos (Jardine e Tsang, 2006; Mobley, 2002).

Quanto aos procedimentos, adotou-se a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso como estratégias complementares. A pesquisa bibliográfica desenvolveu-se a partir de material já elaborado, constituído principalmente de literatura especializada em manutenção industrial, confiabilidade de componentes mecânicos e gestão de ativos (Marconi e Lakatos, 2017; Vergara, 2009). O estudo de caso, por sua vez, permitiu a investigação detalhada do fenômeno em seu contexto real, particularmente adequado para pesquisas que demandam compreensão aprofundada de situações específicas (Yin, 2016; Stake, 2006).

3.2 MODELAGEM ANALÍTICA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a definição da estratégia de manutenção, adotou-se o modelo de política híbrida de inspeção e substituição por idade desenvolvido por Scarf *et al.* (2009), o qual se fundamenta no *framework* de renovação-recompensa, abordagem consolidada para representação de sistemas sujeitos a ciclos de falha e intervenção (Taha, 2016; Ross, 2019). É importante ressaltar que a política em si não constitui uma inovação teórica, sendo um modelo analítico já consolidado na literatura internacional de gestão da manutenção. Contudo, a sua implementação e validação no contexto brasileiro, particularmente na indústria de transformação plástica, é uma aplicação pouco explorada, o que confere relevância prática e contribuição setorial a este estudo.

Um pressuposto crítico do modelo adotado é que as inspeções são consideradas perfeitas, isto é, admite-se que qualquer defeito presente no componente será identificado durante uma inspeção (Scarf *et al.*, 2009).

A implementação computacional e a otimização dos parâmetros da política (K, Δ, T) foram realizadas por meio de um *software* de simulação online desenvolvido especificamente para este fim, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Interface do *software* de simulação utilizado para otimização

Random UFPE
Risk Analysis and Decisions on
Operations and Maintenance Research Group

KAT Policy

Optimizer

Insert the parameter values below:

Characteristic life for components from subpopulation 1
1,80 - +

Shape parameter of pdf for components from subpopulation 1
2,50 - +

Characteristic life for components from subpopulation 2
5,00 - +

Shape parameter of pdf for components from subpopulation 2
5,00 - +

Fonte: RANDOM (2025).

Os parâmetros do modelo (parâmetros das distribuições de Weibull, custos) foram estabelecidos mediante julgamento de especialista (coordenador de manutenção), técnica validada para contextos com dados históricos limitados (Lad e Kulkarni, 2010; Dehsoukhteh, Razmkaha e Castanier, 2024), complementada com valores de referência da literatura técnica para parâmetros específicos do processo de falha de rolamentos de alta precisão (Harris, 2006; SKF, 2020). Ressalta-se que o código-fonte completo não será divulgado por questões de confidencialidade acordadas com a organização estudada, embora todas as equações, pressupostos e a metodologia de otimização estejam detalhadamente descritas para garantir a transparência e permitir a reprodução do estudo.

4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o estudo de caso conduzido em uma indústria produtora de embalagens plásticas, com foco na análise do cenário atual de manutenção. O objetivo central é caracterizar o ambiente operacional da empresa para identificar a política de manutenção mais adequada às suas necessidades específicas, particularmente no sistema de impressão flexográfica.

A investigação concentra-se no diagnóstico das práticas de manutenção vigentes, na identificação do componente crítico responsável pelas maiores interrupções produtivas e na coleta de dados essenciais para a modelagem da política de manutenção proposta.

4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Para garantir a confidencialidade da organização estudada, informações sensíveis como nome e dados identificadores foram omitidos, mantendo-se a fidelidade dos aspectos operacionais analisados.

A empresa em questão é um grupo de origem familiar com mais de quatro décadas de atuação no setor de embalagens plásticas flexíveis, sediada no Agreste de Pernambuco. A unidade fabril objeto deste estudo está estabelecida há mais de 30 anos no mercado e emprega diretamente mais de 70 colaboradores.

Sua atuação abrange os nove estados do Nordeste, além do Amazonas e Pará, demonstrando significativa capilaridade na região Norte-Nordeste. A empresa é reconhecida por produzir soluções completas em embalagens, com foco em sacolas, sacos e filmes plásticos para diversos segmentos, atendendo a demandas por resistência, funcionalidade e apresentação.

No âmbito organizacional, a empresa pauta suas ações em valores como autorresponsabilidade, honestidade e respeito, mantendo um ambiente de sinergia e colaboração entre seus colaboradores. A unidade opera ininterruptamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana, com operadores de produção atuando em regime de escala 12x36. As equipes de manutenção e os setores administrativos trabalham em horário comercial.

A empresa consolidou-se como uma organização que combina experiência e compromisso com a qualidade, destacando-se no mercado de embalagens plásticas flexíveis através de uma atuação estratégica orientada à excelência operacional.

A infraestrutura produtiva da unidade fabril em estudo é composta por dezessete equipamentos de grande porte, distribuídos estrategicamente pelos setores que compõem a cadeia de transformação de embalagens plásticas flexíveis. Conforme detalhado na Tabela 1, o parque industrial conta com cinco extrusoras, uma laminadora, duas impressoras flexográficas, duas rebobinadeiras, cinco sacoleiras e duas valvuladeiras, organizadas em um layout que possibilita diferentes rotas de produção conforme a complexidade do produto solicitado.

Tabela 1 - Parque de máquinas por setor produtivo

SETOR	QUANTIDADE	MÁQUINA
EXTRUSÃO	5	EXTRUSORA
LAMINAÇÃO	1	LAMINADORA
IMPRESSÃO	2	IMPRESSORAS
ACABAMENTO	2	REBOBINADEIRAS
	5	SACOLERIAS
	2	VALVULADEIRAS

Fonte: Autoria própria (2025).

O processo produtivo inicia-se com o planejamento e liberação da ordem de produção, documento que especifica todos os parâmetros do produto, incluindo: tipo de resina (PEBD, PEAD ou PP), densidade do material, dimensões (largura e espessura do filme), cores de impressão conforme padrão Pantone®, e características técnicas específicas como resistência à tração e selabilidade. A primeira etapa operacional consiste na extrusão de filmes, onde grânulos de resina termoplástica são alimentados no funil da extrusora e submetidos a gradiente térmico entre 160°C e 220°C, sendo plasticizados e homogeneizados por uma rosca única ou dupla. O polímero fundido é então forçado através de uma matriz circular (*die head*), formando um tubo tubular que é inflado, estirado e resfriado para obtenção do filme de geometria e espessura controladas.

Para produtos que não demandam personalização gráfica, os quais representam aproximadamente 30% do portfólio da empresa, o filme extrusado segue diretamente para o setor de acabamento e conversão. Nesta etapa, as sacoleiras realizam o processo de solda por impulso e corte rotativo, transformando o filme em sacolas com alças do tipo *die-cut* ou alças laterais seladas. Os formatos padronizados variam entre 30x40 centímetros e 50x60 centímetros, atendendo às demandas do mercado de embalagens descartáveis.

Nos casos em que há exigência de personalização gráfica, correspondente a cerca de 70% da produção, o material é direcionado para o setor de impressão flexográfica. Nesta etapa, as impressoras, equipadas com cilindros anilox de 120 a 180 linhas por centímetro, aplicam tintas à base de água ou solvente em até seis cores. O processo segue rigorosamente o *layout* previamente aprovado pelo cliente, utilizando clichês de fotopolímero com resolução entre 1500 e 2000 dpi para garantir a fidelidade do registro gráfico.

Após a impressão, o material pode seguir dois caminhos distintos: para acabamento direto nas rebobinadeiras, destinadas ao refil e embobinamento, ou nas valvuladeiras, para aplicação de sistemas de fechamento do tipo V-Notch ou Patch. Alternativamente, o material pode ser submetido ao processo de laminação, empregado em aproximadamente 25% dos produtos. A laminação consiste na união de duas ou mais camadas de filmes plásticos mediante adesivos de base aquosa ou por extrusão de polietileno, criando estruturas multimateriais como BOPP/PE e PET/MET/PE. Essas estruturas conferem propriedades barreira superiores, com taxa de transmissão de vapor de água inferior a 10 gramas por metro quadrado por dia e taxa de transmissão de oxigênio abaixo de 800 centímetros cúbicos por metro quadrado por dia. Adicionalmente, proporcionam maior resistência mecânica, superior a 30 MPa, e funcionalidades específicas como propriedades antienviscamento e alta transparência, com *haze* inferior a 10%.

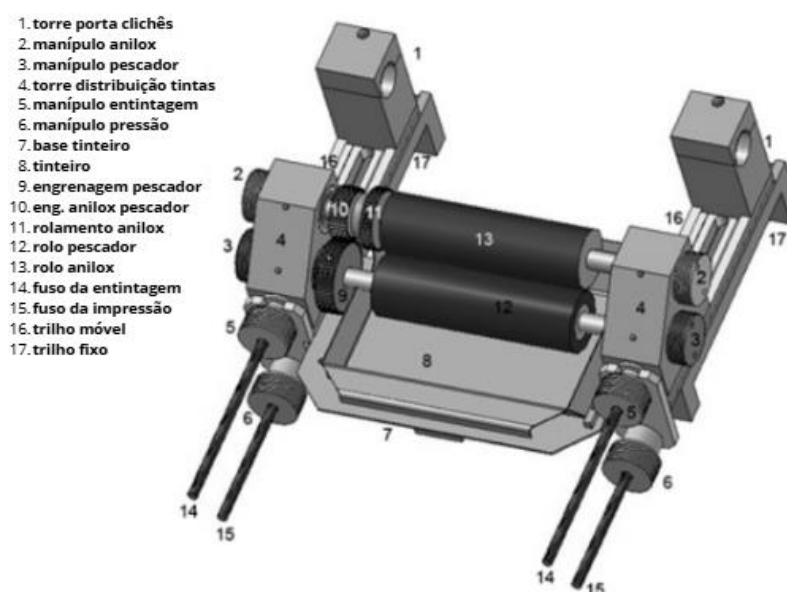
O material laminado é então encaminhado para o setor de acabamento, onde ocorre a etapa final de conformação e inspeção. Nas rebobinadeiras, o filme é submetido a controle tensiométrico e refil lateral para acondicionamento em bobinas de 500 a 1000 metros. Simultaneamente, nas valvuladeiras, são aplicados sistemas de fechamento que garantem vedação adequada e facilidade de abertura. O produto final passa por controle dimensional rigoroso e amostragem de qualidade

antes da expedição, assegurando o atendimento integral às especificações técnicas e mercadológicas demandadas pelos clientes.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA CRÍTICO

O sistema de impressão flexográfica estudado tem como função primordial a aplicação precisa de grafismos e cores sobre o filme plástico, agregando valor estético e informativo ao produto final. Este processo envolve etapas críticas de dosagem de tinta, registro de cores e controle de qualidade, sendo fundamental para a customização das embalagens conforme especificações dos clientes. A Figura 3 apresenta uma visão esquemática completa do sistema impressor, detalhando todos os componentes e suas interações.

Figura 3 – Grupo impressor flexográfico



Fonte: Adaptado de Flexototal (2017).

Para identificar objetivamente o componente de maior criticidade dentro do grupo impressor, foi realizada uma análise do histórico de manutenção complementada por entrevistas com a equipe técnica. A Tabela 2 apresenta a frequência relativa de falhas dos principais componentes do sistema, revelando que os rolamentos do anilox respondem por aproximadamente 35% das interrupções não programadas.

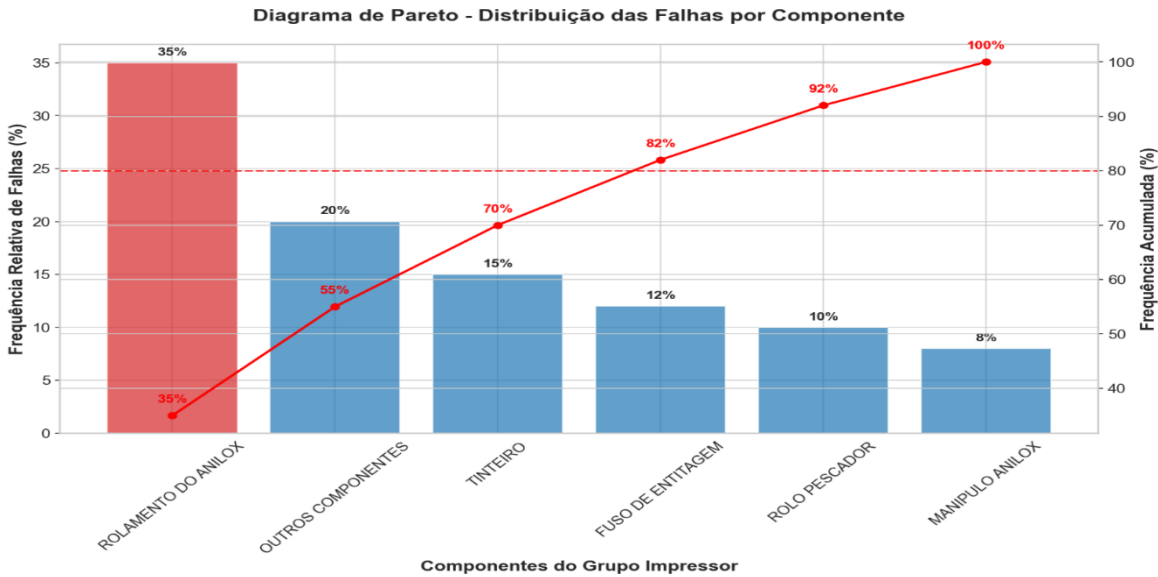
Tabela 2: Análise de frequência de falhas no grupo impressor

COMPONENTE	FUNÇÃO PRINCIPAL	FREQUÊNCIA RELATIVA DE FALHAS (%)
11. ROLAMENTO DO ANILOX	Suportar e guiar o cilindro anilox	35%
8. TINTEIRO	Armazenar e dosar tinta	15%
14. FUSO DE ENTINTAGEM	Regular aproximação anilox/clichê	12%
12. ROLO PESCADOR	Limpar excesso de tinta	10%
2. MANIPULO ANILOX	Posicionar conjunto anilox/Pescador	8%
OUTROS COMPONENTES	-	20%

Fonte: Autoria Própria (2025).

Os rolamentos do anilox representam mais de um terço das falhas, sendo o componente crítico devido às condições adversas de operação: altas cargas, contaminação e rotação contínua (Tabela 2, Figura 4).

Figura 4 - Diagrama de Pareto - Distribuição das falhas por componente do grupo impressor



Fonte: Autoria própria (2025).

Dentre todos os elementos ilustrados, o conjunto de rolamentos do cilindro anilox configura-se como o componente de maior criticidade operacional. Este conjunto desempenha papel vital na garantia da qualidade de impressão, atuando diretamente na transferência uniforme de tinta para o clichê e subsequente aplicação no substrato plástico. O cilindro anilox, considerado o "coração" do sistema de dosagem, depende integralmente do perfeito funcionamento de seus rolamentos para manter a estabilidade rotacional e o paralelismo necessário durante a operação.

A criticidade deste componente manifesta-se através de dois cenários operacionais críticos. Quando ocorre desalinhamento ou desgaste excessivo nos rolamentos, verifica-se a formação de defeitos de impressão conhecidos como *banding* (listras) e variações de densidade de cor, que comprometem a uniformidade gráfica do produto final. Por outro lado, a falha catastrófica dos rolamentos pode resultar em travamento do cilindro anilox, causando danos em cascata a outros componentes do sistema impressor e paradas produtivas prolongadas para substituição do conjunto completo.

A Figura 5 detalha o conjunto de rolamentos do anilox, evidenciando a complexidade mecânica e justificando a investigação de políticas de manutenção específicas para esse componente, dado seu impacto na eficiência e qualidade final.

Figura 5 – Componente crítico: conjunto de rolamentos do anilox.



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, o conjunto de rolamentos do anilox é tão essencial para o fluxo de impressão que, caso haja qualquer falha em uma das unidades impressoras, toda a linha de produção é interrompida. Isso ocorre porque, sem o material impresso que passa por esse sistema, não há produto final para ser processado nas etapas subsequentes de acabamento, o que leva à paralisação da fábrica como um todo. Esse impacto direto na produção coloca os rolamentos do anilox como o ponto crítico que demanda atenção constante para garantir a continuidade da operação e evitar prejuízos significativos.

O sistema de impressão flexográfica da unidade é composto por duas impressoras que operam em paralelo. Cada impressora recebe diferentes tipos de pedidos com características distintas de complexidade gráfica e cores. Para garantir que o processo de impressão ocorra de maneira eficiente e contínua, todos os conjuntos de rolamentos precisam estar funcionando corretamente, uma vez que a falha em qualquer uma das unidades afeta diretamente a capacidade produtiva total.

A criticidade do conjunto de rolamentos do anilox torna-se ainda mais evidente ao considerar seu histórico de falhas, que representa uma das principais causas de paradas operacionais no setor de impressão. A falha desses componentes pode comprometer não apenas o funcionamento do sistema impressor, mas também outros elementos essenciais como cilindros, clichês e sistemas de dosagem de tinta, aumentando os custos de manutenção e o tempo de inatividade. Além disso, qualquer interrupção na operação das impressoras impacta diretamente o fluxo produtivo, podendo levar à paralisação de toda a fábrica, resultando em atrasos na entrega de pedidos e prejuízos operacionais significativos. Dessa maneira, a escolha do conjunto de rolamentos do anilox como componente 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.

4.3 COMPONENTE CRÍTICO

A análise da criticidade operacional do sistema impressor flexográfico, apresentada na seção anterior, permitiu identificar o conjunto de rolamentos do anilox como o componente de maior impacto na continuidade produtiva. Este

subitem justifica a escolha desse componente para modelagem analítica detalhada, fundamentando-se em seus modos de falha característicos, sua influência direta nos parâmetros do modelo de manutenção e seu comportamento frente às políticas de intervenção.

Tecnicamente, os rolamentos do anilox são elementos de precisão submetidos a condições operacionais severas, incluindo cargas radiais elevadas, rotações constantes e potencial contaminação por tintas e agentes de limpeza. Essa exposição resulta em modos de falha predominantemente associados a fadiga superficial, desgaste abrasivo e falso brinelamento, conforme classificação ISO 15243:2017. Esses mecanismos de degradação apresentam características temporais distintas que os tornam particularmente adequados para modelagem via conceito de *delay time*. Enquanto a fadiga evolui de forma progressiva e dependente da idade, os danos por contaminação podem surgir de forma mais aleatória, justificando a consideração de uma população heterogênea de componentes.

A Figura 7 apresenta o rolamento do anilox em sua condição lacrada, evidenciando sua construção especializada antes da instalação. Esta representação visual reforça a complexidade do componente que será objeto da modelagem matemática subsequente.

A escolha desse componente para análise aprofundada fundamenta-se ainda na sua relação direta com as variáveis de decisão da política de manutenção proposta. O tempo até a ocorrência do defeito (X) reflete a vida útil dos componentes frente aos modos de falha identificados, enquanto o *delay time* (H) corresponde ao período em que defeitos como desalinhamentos ou aumento de vibração são detectáveis antes de evoluírem para falhas catastróficas. A heterogeneidade observada na população de rolamentos, com alguns apresentando falhas prematuras e outros atingindo longa duração, justifica a adoção de uma distribuição mista de Weibull na modelagem, incorporando tanto componentes fracos quanto fortes.

Essas características técnicas e operacionais consolidam o rolamento do anilox não apenas como um ponto vulnerável no processo, mas como um caso representativo onde a aplicação de uma política híbrida de inspeções e substituição por idade pode gerar ganhos mensuráveis em confiabilidade e redução de custos. A modelagem subsequente considerará essas particularidades para definir parâmetros

realistas de intervenção, alinhando a teoria da manutenção com as condições específicas do sistema de impressão flexográfica.

Figura 6 – Rolamento utilizado na impressora



Fonte: FAG (2025).

Quando um rolamento do conjunto anilox apresenta falhas, o impacto na produção é significativo. A falha pode fazer com que a impressora pare de funcionar ou, em casos mais graves, danifique outros componentes do sistema, como o cilindro anilox. Em uma situação extrema, uma falha de rolamento pode comprometer todo o sistema de impressão, gerando uma parada que, embora não seja imediata nos setores subsequentes, causa uma redução gradativa na produção. Com o tempo, a falta de material impresso para ser processado leva à paralisação dos setores de acabamento, 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 impressora e, por consequência, interrompendo a produção. Quando o sistema de vedação está em bom estado, o tempo de manutenção é menor.

Embora o custo do rolamento em si seja relativamente baixo, o impacto econômico de uma falha 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 impressora pode resultar em uma perda significativa de produção, já que a linha deixa de processar material. A produtividade do setor de impressão é de aproximadamente 200 metros por minuto (mpm), e a parada pode durar várias horas para a troca do conjunto de rolamentos, mais o tempo necessário para ajustes de registro e alinhamento do sistema.

A troca de rolamentos exige um processo cuidadoso, dado o impacto que uma instalação inadequada pode ter na qualidade de impressão. Durante a substituição, é necessário realizar o alinhamento preciso do conjunto, verificar o paralelismo dos cilindros, calibrar o sistema de pressão e aplicar lubrificação especializada. Esse serviço pode durar várias horas, dependendo da complexidade do acesso ao componente.

Além disso, um problema recorrente durante a troca de rolamentos é o dano aos sistemas de vedação, que podem ser comprometidos durante a substituição. Isso pode gerar vazamentos de lubrificante e contaminação do sistema de tintas, prolongando ainda mais o processo de manutenção e aumentando os custos.

Uma falha no rolamento também pode ter consequências graves para o sistema impressor. Se o rolamento danificado causar avarias no cilindro anilox ou em outros componentes de precisão, pode ser necessário realizar reparos especializados ou até a substituição de partes do conjunto, o que gera custos adicionais elevados. A retificação de cilindros e o reequilíbrio dinâmico do sistema podem ser processos caros e demorados, aumentando significativamente o impacto financeiro de uma falha nos rolamentos.

4.4 ROLAMENTO

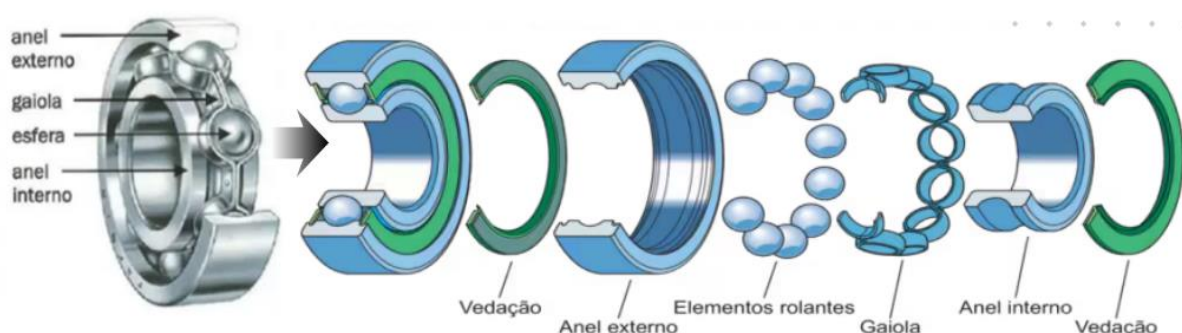
De acordo com as especificações do fabricante FAG, o rolamento NUP208-E-XL-TVP2 é um rolamento de rolos cilíndricos de uma carreira com projeto otimizado para aplicações de alta performance. Sua construção com rolos de maior capacidade de carga e tratamento térmico especializado contribui para a estabilidade dimensional e resistência em operações contínuas sob cargas radiais significativas. Essas características tornam-no ideal para aplicações em sistemas de precisão como cilindros anilox de impressoras flexográficas, onde a estabilidade rotacional é crítica para a qualidade de impressão.

Os rolamentos de rolos cilíndricos possuem a função primordial de suportar cargas radiais elevadas enquanto permitem movimentos axiais limitados do eixo em relação ao alojamento. Eles proporcionam alta rigidez e capacidade de carga, possibilitando operações em velocidades moderadas a altas com mínimo atrito, calor e consumo energético. São componentes essenciais em equipamentos rotativos de

precisão, onde a estabilidade dimensional é requisito fundamental para a qualidade do processo.

Um rolamento de rolos cilíndricos típico é constituído por vários componentes essenciais: anel interno, anel externo, rolos cilíndricos como elementos rolantes, e gaiola para manter o espaçamento adequado entre os rolos. A ilustração na Figura 7 apresenta esses elementos de forma detalhada, destacando a configuração específica do tipo NUP com pista guia integral.

Figura 7 – Componentes do rolamento



Fonte: Adaptado de SKF (2025).

Os rolamentos desempenham papel fundamental em equipamentos rotativos de alta precisão, sendo componentes críticos para o bom funcionamento de sistemas como os conjuntos impressoras. O estado de um rolamento reflete diretamente na estabilidade operacional do equipamento, influenciando parâmetros como qualidade de registro, uniformidade de cor e ausência de vibrações indesejadas.

Existem diversas causas possíveis para falhas em rolamentos de rolos cilíndricos. Fatores como desalinhamento, contaminação por partículas, lubrificação inadequada, cargas excessivas e montagem incorreta podem resultar em danos progressivos ou catastróficos. Considerando que estes rolamentos são componentes cruciais em sistemas produtivos, sua falha pode levar a paradas não programadas, danos em componentes associados de alto valor (como cilindros anilox) e custos elevados com reparos e perdas produtivas.

Com o aumento da preocupação em prevenir falhas recorrentes em rolamentos, a ISO (Organização Internacional de Normalização) estabeleceu uma metodologia padronizada para sua classificação, descrita na norma ISO 15243:2017.

Esta norma organiza as falhas em categorias principais e subcategorias, todas relacionadas a danos que ocorrem durante a operação. O foco da classificação reside na análise das características visíveis nos elementos rolantes, nas pistas e em outras superfícies funcionais, associando-as aos mecanismos causadores específicos de cada tipo de falha.

Na prática industrial, a maioria dos danos observados em rolamentos de rolos cilíndricos pode ser atribuída aos grupos principais de falhas descritos na Tabela 3, que apresenta uma adaptação da classificação ISO para o contexto específico de rolamentos de precisão em aplicações gráficas

Tabela 3 – Classificação ISO do dano no rolamento e dos modos de falha

GRUPO PRINCIPAL	SUBGRUPO	APLICAÇÃO NO ROLAMENTO ANILOX
FADIGA	Fadiga subsuperficial	Desgaste progressivo em operação contínua
	Fadiga iniciada na superfície	Danos por contaminação no sistema
DESGASTE	Desgaste abrasivo	Contaminação por partículas
	Desgaste adesivo	Lubrificação inadequada
CORROSÃO	Corrosão por umidade	Ambientes com variação higrométrica
	Falso brinelamento	Vibrações durante paradas
EROSÃO ELÉTRICA	Tensão excessiva	Correntes parasitas no sistema
DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	Sobrecarga	Cargas radiais excessivas
	Endentações por partículas	Contaminação do lubrificante
FRATURA E TRINCA	Fratura forçada	Montagem/desmontagem incorreta

Fonte: Adaptado de SKF (2025).

Dos modos de falha observados no rolamento do anilox, a análise baseada na norma ISO 15243:2017 e no histórico da empresa identificou que as principais causas são: Fadiga Iniciada na Superfície (40%), Desgaste Abrasivo (25%) e Falso

Brinelamento (15%). Estes três modos de falha respondem por aproximadamente 80% das ocorrências e estão diretamente relacionados às condições operacionais do sistema de impressão:

- Fadiga Iniciada na Superfície: Associada à contaminação por partículas de tinta e agentes de limpeza;
- Desgaste Abrasivo: Resultante da ação de partículas abrasivas no sistema de lubrificação;
- Falso Brinelamento: Causado por vibrações durante paradas e partidas do equipamento.

Esta distribuição justifica a adoção de inspeções periódicas para detecção precoce de defeitos antes que evoluam para falhas catastróficas, permitindo intervenções no momento oportuno durante o período de *delay-time*.

4.5 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA

Propõe-se a adoção de uma política de manutenção híbrida desenvolvida por Scarf et al. (2009) para o rolamento do anilox, identificado como componente crítico. Embora as políticas de manutenção frequentemente considerem sistemas multi-componentes, o foco em um único elemento justifica-se quando sua falha compromete a funcionalidade do sistema como um todo. Assim, para fins de modelagem, sistemas cujas falhas mais recorrentes estão associadas a um componente específico podem ser tratados como sistemas de componente único, conforme aplicado neste estudo.

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 Δ e substituição preventiva na idade T , com um número máximo de K inspeções durante a fase inicial. A adoção desta abordagem híbrida é justificada pela natureza heterogênea da população de rolamentos, que compreende tanto componentes "fracos" (com vida útil reduzida) quanto componentes "fortes" (com longa duração).

A Figura 8 ilustra esta heterogeneidade através de uma distribuição mista de Weibull, onde se observam duas subpopulações distintas com parâmetros

característicos: componentes fracos (η_1, β_1) e componentes fortes (η_2, β_2) . A função densidade de probabilidade da população mista é dada por:

$$f_X(x) = p \cdot f_1(x) + (1 - p) \cdot f_2(x)$$

Onde:

- p representa a proporção de componentes fracos na população
- $f_1(x)$ é a distribuição de Weibull para componentes fracos:

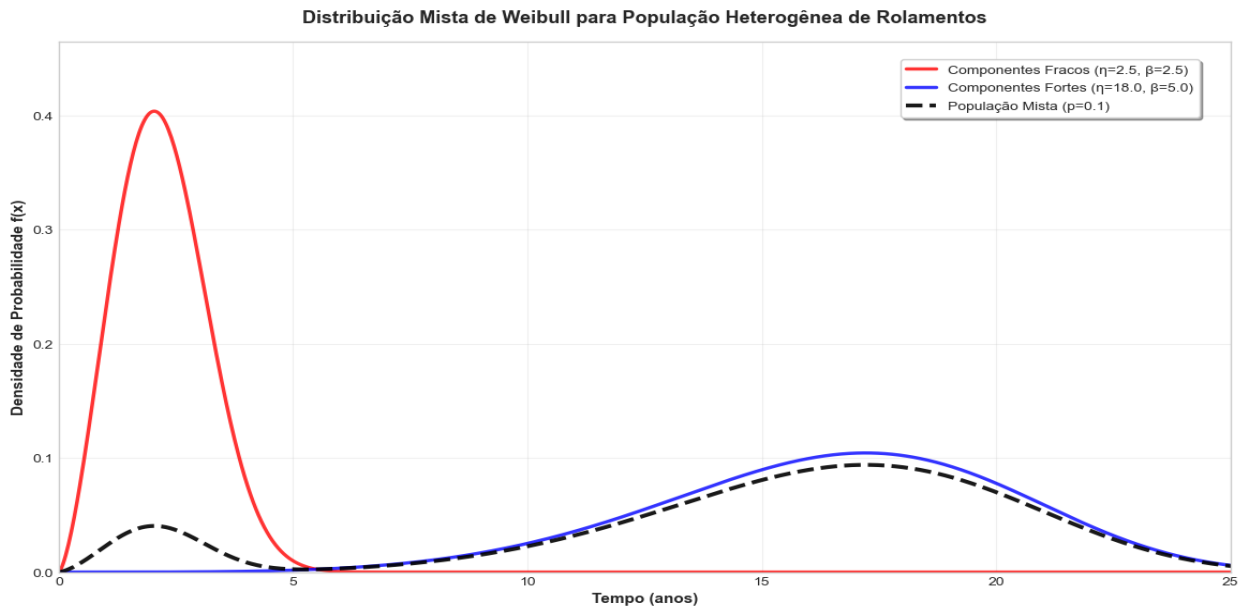
$$f_1(x) = \frac{\beta_1}{\eta_1} \left(\frac{x}{\eta_1}\right)^{\beta_1-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta_1}\right)^{\beta_1}}$$

- $f_2(x)$ é a distribuição de Weibull para componentes fortes:

$$f_2(x) = \frac{\beta_2}{\eta_2} \left(\frac{x}{\eta_2}\right)^{\beta_2-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta_2}\right)^{\beta_2}}$$

Os parâmetros η (eta) representam a vida característica - tempo no qual aproximadamente 63,2% dos componentes terão falhado - enquanto os parâmetros β (beta) determinam a forma da curva de falha, indicando se a taxa de falha é crescente ($\beta > 1$), constante ($\beta = 1$) ou decrescente ($\beta < 1$).

Figura 8 - População heterogênea de rolamentos - Distribuição mista de Weibull



Fonte: Autoria própria (2025).

A política opera em duas fases distintas: na fase de inspeção (até a idade $K\Delta$), o componente é submetido a inspeções periódicas que visam detectar precocemente os componentes fracos; na fase de substituição por idade (após $K\Delta$), o foco desloca-se para a prevenção do desgaste dos componentes fortes que

sobreviveram ao período inicial. Esta 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 (Scarf *et al.*, 2009). Esta premissa é fundamental para a eficácia da política proposta, pois garante que qualquer anomalia identificável será efetivamente capturada durante as inspeções programadas.

Modelos híbridos similares foram abordados na literatura (Scarf *et al.*, 2009), sendo particularmente adequados para contextos onde a população de componentes apresenta características mistas.

A fundamentação teórica da política considera que o processo de degradação do rolamento segue um modelo de dois estágios, partindo de um estado bom para um estado defeituoso e evoluindo para falha, conforme detalhado no modelo *delay-time* apresentado na Seção 2.4. Nesta abordagem, o tempo até a ocorrência de um defeito e o *delay-time* são modelados como variáveis aleatórias independentes, capturando a natureza estocástica do processo de degradação. A otimização dos parâmetros da política é realizada mediante a minimização do custo médio por unidade de tempo no longo prazo, utilizando o teorema da recompensa de renovação como critério de decisão.

4.6 CRITÉRIO DE DECISÃO E MODELAGEM

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

- Δ : Intervalo de tempo entre inspeções periódicas;
- K : Número máximo de inspeções durante a fase de monitoramento inicial;
- T : Idade para substituição preventiva durante a fase de desgaste.

O critério de decisão a ser considerado será a taxa de custo (função objetivo), representada por $CR(K, \Delta, T)$, 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 K , Δ e T 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 (Ross, 1996; 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 (Jardine e Tsang, 2006).

Para determinar a taxa de custo, $CR(K, \Delta, T)$, 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 cinco 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 4 apresenta a notação adotada na modelagem.

Tabela 4 - Notação utilizada na modelagem da política híbrida

Símbolos	Descrição
X	Tempo até a chegada do defeito
H	<i>Delay-time</i> (intervalo entre o defeito e a falha)
$f_X(x), F_X(x), R_X(x)$	Função densidade, distribuição e confiabilidade de X
$f_H(h), F_H(h), R_H(h)$	Função densidade, distribuição e confiabilidade de H
λ	Taxa de falha do <i>delay-time</i> ($1/\lambda$ = tempo médio entre defeito e falha)
C_F	Custo de substituição corretiva
C_P	Custo de substituição preventiva
C_I	Custo de cada inspeção
K, Δ, T	Variáveis de decisão da política
$P_{1(K, \Delta, T)}$	Probabilidade do ciclo de renovação
$EC_{1(K, \Delta, T)}$	Custo esperado do ciclo
$EL_i(K, \Delta, T)$	Duração esperada do ciclo
$CR(K, \Delta, T)$	Taxa de custo (função objetivo)

Fonte: Adaptado de Scarf et al. (2009).

O tempo até a chegada do defeito (X) segue uma distribuição mista de Weibull, característica de populações heterogêneas de componentes, enquanto o *delay-time* (H) é modelado por uma distribuição exponencial.

Para a variável X (tempo até defeito), utilizam-se as seguintes funções:

- Função densidade de probabilidade mista:

$$f_X(x) = p \cdot f_1(x) + (1 - p) \cdot f_2(x)$$

- Função de distribuição acumulada:

$$F_X(x) = p \cdot F_1(x) + (1 - p) \cdot F_2(x)$$

- Função de confiabilidade:

$$R_X(x) = 1 - F_X(x) = p \cdot R_1(x) + (1 - p) \cdot R_2(x)$$

Onde:

- p é o parâmetro de mistura (proporção de componentes fracos);
- $f_1(x), F_1(x), R_1(x)$ são as funções para componentes fracos: Weibull (η_1, β_1);

- $f_2(x), F_2(x), R_2(x)$ são as funções para componentes fortes: Weibull (η_2, β_2) .

Para a variável H (*delay-time*), assume-se distribuição exponencial com taxa λ :

- Função densidade de probabilidade:

$$f_H(h) = \lambda e^{(-\lambda h)}, \text{ para } h \geq 0$$

- Função de distribuição acumulada:

$$F_H(h) = 1 - e^{(-\lambda h)}, \text{ para } h \geq 0$$

- Função de confiabilidade:

$$R_H(h) = e^{(-\lambda h)}, \text{ para } h \geq 0$$

O parâmetro λ representa a taxa de falha instantânea durante o período de *delay-time*, sendo $1/\lambda$ o tempo médio esperado entre a ocorrência do defeito e a falha subsequente.

Esta abordagem é válida em sistemas onde os defeitos surgem de forma dependente da idade para componentes fortes, mas aleatória para componentes fracos, enquanto a transição de defeito para falha ocorre de forma essencialmente aleatória (Scarf *et al.*, 2009; Jiang; Murthy, 1998).

Diante disso, a modelagem matemática desenvolvida para a política de manutenção híbrida considera cinco 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, probabilidade de ocorrência, custo associado e vida útil esperada.

A política de manutenção híbrida resulta em cinco cenários de renovação possíveis, os quais abrangem todas as trajetórias operacionais do componente ao longo de seu ciclo de vida: (1) falha entre inspeções periódicas; (2) detecção de defeito durante uma inspeção, levando a uma substituição preventiva; (3) falha após o período de inspeções e antes da substituição preventiva por idade; (4) substituição preventiva por idade de um componente que já possui um defeito não falhado; e (5) substituição preventiva por idade de um componente em condição ótima.

Conforme estabelecido por Scarf *et al.* (2009), a função objetivo que representa a taxa de custo da política de manutenção é dada pela razão entre o custo total esperado e a duração total esperada do ciclo de renovação:

$$CR(K, \Delta, T) = \frac{[EC(K, \Delta, T)]}{[EL(K, \Delta, T)]}$$

onde:

- Numerador: Soma dos custos esperados de todos os cenários (corretivos e preventivos) (Scarf *et al.*, 2009).

$$\begin{aligned} EC(K, \Delta, T) = & \sum_{i=1}^K [(i-1)C_I + C_F] \int_{x=(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{h=0}^{i\Delta-x} f_X(x) f_H(h) dh dx \\ & + \sum_{i=1}^K (iC_I + C_P) \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) [1 - F_H(i\Delta - x)] dx \\ & + (KC_I + C_F) \int_{x=K\Delta}^T \int_{h=0}^{T-x} f_X(x) f_H(h) dh dx \\ & + (KC_I + C_P) \int_{x=K\Delta}^T f_X(x) F_H(T - x) dx + (KC_I + C_P) [1 - F_X(T)] \end{aligned}$$

- Denominador: Soma das durações esperadas de todos os ciclos de renovação (Scarf *et al.*, 2009).

$$\begin{aligned} EL(K, \Delta, T) = & \sum_{i=1}^K \int_{x=(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{h=0}^{i\Delta-x} (x+h) f_X(x) f_H(h) dh dx \\ & + \sum_{i=1}^K (i\Delta) \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) [1 - F_H(i\Delta - x)] dx \\ & + \int_{x=K\Delta}^T \int_{h=0}^{T-x} (x+h) f_X(x) f_H(h) dh dx + T \int_{x=K\Delta}^T f_X(x) F_H(T - x) dx \\ & + T [1 - F_X(T)] \end{aligned}$$

4.7 ANÁLISE DA PERFORMANCE DA POLÍTICA PROPOSTA

Para a determinação dos valores ótimos de K, Δ e T que minimizam a função de taxa de custo $CR(K, \Delta, T)$, a implementação numérica do modelo foi realizada com o auxílio de um software de otimização especializado, disponibilizado por um grupo de pesquisa da área (RANDOM). A plataforma, que integra as bibliotecas científicas do Python, foi configurada para executar o algoritmo de Sequential Least Squares

Quadratic Programming (SLSQP) ou Programação por Mínimos Quadrados Sequenciais. Este procedimento foi escolhido pela sua eficiência em problemas multivariáveis e com restrições, típicos do modelo em questão. A solução ótima foi obtida variando K sistematicamente e utilizando o SLSQP para ajustar Δ e T. A robustez do método SLSQP, documentada na literatura, é comprovada por suas aplicações desde políticas de manutenção até problemas complexos na área da saúde.

A Tabela 5 compila os parâmetros de entrada do caso base, que incluem distribuições de Weibull baseadas em Scarf et al. (2009) e ajustadas pelo coordenador de manutenção da empresa estudada, considerando o histórico operacional e as condições específicas do sistema de impressão flexográfica.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada para o Caso Base (CB)

Parâmetro	Valor Caso Base	Descrição
η_1	1.8 anos	Vida característica componentes fracos
β_1	2.5	Forma da curva - taxa de falha crescente
η_2	5.0 anos	Vida característica componentes fortes
β_2	5.0	Forma da curva - desgaste acelerado
p	0.1	Proporção de componentes fracos
λ	0.5	Taxa do <i>delay-time</i>
C_F	10	Custo de substituição corretiva
C_P	1	Custo de substituição preventive
C_I	0.1	Custo de cada inspeção

Fonte: Scarf et al. (2009), especificações FAG, e julgamento especializado.

4.7.1 Análise de sensibilidade

A aplicação do modelo de otimização aos parâmetros de referência da Tabela 6, que configura o Caso Base deste estudo, resultou em uma política de manutenção híbrida ótima com os seguintes valores: $K = 1$, $\Delta = 1,89$ anos e $T = 2,8$ anos, apresentando uma taxa de custo de longo prazo de 0,68. Na prática operacional da fábrica estudada, essa política estabelece a realização de uma inspeção periódica após cerca de 1 ano e 11 meses de operação, seguida por substituição preventiva ao completar 2 anos e 10 meses de idade. Este resultado representa a estratégia de menor custo para o cenário atual da planta, oferecendo um referencial concreto para a revisão do plano de manutenção vigente. Esses resultados fundamentam a subsequente análise de sensibilidade, que avaliará a robustez deste plano de manutenção frente a variações nos parâmetros do modelo, considerando contextos operacionais realistas.

A Tabela 6 apresenta a análise de sensibilidade, permitindo avaliar como a variação de determinados parâmetros influencia os resultados obtidos. Essa análise é fundamental para compreender a robustez do modelo proposto e identificar quais variáveis exercem maior impacto no desempenho do sistema. Especificamente no contexto da empresa estudada, os cenários simulados possuem correspondência direta com situações reais enfrentadas pela manutenção. Por exemplo, um cenário de alto custo de falha (CF) é particularmente plausível nesta fábrica, considerando que cada hora de parada da impressora resulta em perda significativa de produção e compromete o fluxo contínuo dos setores subsequentes. Da mesma forma, a ausência completa de componentes fracos ($p = 0$) é improvável neste sistema, dado o histórico observado de falhas prematuras em alguns lotes de rolamentos, frequentemente associados a variações na qualidade de fornecimento ou condições adversas de operação.

No contexto da manutenção industrial, a análise de sensibilidade auxilia na tomada de decisões estratégicas ao demonstrar como mudanças em fatores como confiabilidade de componentes, custos operacionais e características de degradação podem afetar indicadores de desempenho, como a taxa de custo total. Isso possibilita a definição de políticas de manutenção mais eficazes, garantindo maior previsibilidade e otimização dos recursos disponíveis na fábrica.

Além disso, a análise contribui para a mitigação de riscos, permitindo antecipar possíveis cenários adversos e avaliar a viabilidade de diferentes estratégias de manutenção antes de sua implementação. Dessa forma, a aplicação desse método não apenas reforça a confiabilidade dos resultados apresentados, mas também conecta a modelagem teórica às necessidades práticas da organização, conferindo maior embasamento técnico às recomendações propostas para o sistema de impressão flexográfica.

Tabela 6 - Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo

Caso	Parâmetro Variado	Valor	K	Δ (anos)	T (anos)	CR	Variação vs. CB
CB	Caso Base	-	1	1,89	2,8	0,68	0,00%
S0	Parâmetro mistura (p)	0	0	1,2	2,74	0,44	-35,29%
S1	Parâmetro mistura (p)	0,05	1	2,18	2,87	0,57	-16,18%
S2	Parâmetro mistura (p)	0,2	6	0,5	3,37	0,82	20,59%
S3	Parâmetro mistura (p)	0,4	9	0,37	3,63	1,07	57,35%
S4	Vida característica fracos (η_1)	0,9	2	0,65	3,02	0,69	1,47%
S5	Vida característica fracos (η_1)	3,6	0	1,62	2,58	0,05	-92,35%
S6	Vida característica fortes (η_2)	2,5	0	1,77	1,39	0,96	41,18%
S7	Vida característica fortes (η_2)	10	2	1,16	5,88	0,39	-42,65%
S8	Forma curva fracos (β_1)	1,25	4	0,69	3,16	0,66	-2,94%
S9	Forma curva fracos (β_1)	5	1	1,99	2,92	0,65	-4,41%
S10	Forma curva fortes (β_2)	2,5	2	1,16	5,88	0,39	-42,65%
S11	Forma curva fortes (β_2)	10	2	1,16	5,88	0,39	-42,65%
S12	Taxa <i>delay-time</i> (λ)	1	3	0,95	3,37	0,58	-14,71%
S13	Taxa <i>delay-time</i> (λ)	4	1	1,95	2,7	0,77	13,24%
S14	Custo falha (CF)	5	4	1,03	4,57	1,64	141,18%
S15	Custo falha (CF)	20	5	0,49	2,77	0,89	30,88%
S16	Custo preventiva (CP)	0,5	1	1,5	2,14	0,48	-29,41%
S17	Custo preventiva (CP)	2	4	0,8	3,61	0,96	41,18%
S18	Custo inspeção (CI)	0,3	9	0,34	3,3	0,54	-20,59%
S19	Custo inspeção (CI)	0,05	7	0,43	3,29	0,66	-2,94%

A análise da Tabela 7 possibilita avaliar tanto o impacto na taxa de custo quanto a forma como a política de manutenção se adapta dinamicamente a variações nos parâmetros do sistema. A Figura 10 oferece uma representação visual desse impacto, hierarquizando os seis parâmetros de maior influência na taxa de custo, selecionados por sua relevância prática e impacto gerencial. A figura 9 combina parâmetros estruturais, como a proporção de componentes fracos (p) e a vida característica dos componentes fortes (η_2), com parâmetros econômicos, como o custo de falha (CF). Esta representação revela que os fatores econômicos exercem impacto mais pronunciado na taxa de custo do que os parâmetros puramente estocásticos.

O custo de falha (CF) destaca-se como o parâmetro de maior influência, sendo capaz de elevar a taxa de custo em 141,18% no Cenário S14, representado pela barra em tom mais escuro que indica aumento significativo de custo. Diante deste cenário oneroso, a política ótima reage tornando-se significativamente mais intrusiva. O número de inspeções quadruplica e o intervalo entre elas é reduzido para 1,03 ano, priorizando a detecção precoce para evitar custos emergenciais. Em contraste, a ausência de componentes fracos ($p = 0$) no Cenário S0 representa a condição mais favorável, resultando na maior economia de custo (-35,3%), indicada pela barra em tom claro que sinaliza redução de custo. Nesta situação, a política responde de maneira radical, eliminando completamente as inspeções, uma vez que a população homogênea e confiável não justifica o custo do monitoramento.

A análise revela padrões comportamentais bem definidos. Cenários que induzem inspeções frequentes, como aumentos na proporção de componentes fracos e no custo de falha, tornam a política progressivamente mais rigorosa. Quando p aumenta para 0,2 e 0,4, por exemplo, o número de inspeções salta para 6 e 9 respectivamente, com intervalos drasticamente reduzidos para 0,5 e 0,37 ano. Esta estratégia de monitoramento intensivo busca gerenciar o risco crescente de falhas prematuras. Por outro lado, cenários que desincentivam as inspeções, como a alta confiabilidade dos componentes fortes evidenciada pelo aumento de η_2 para 10, permitem uma estratégia mais conservadora. A política responde realizando um número moderado de inspeções e, notavelmente, postergando a substituição preventiva para cerca de 5,9 anos, confiando na longevidade desses componentes.

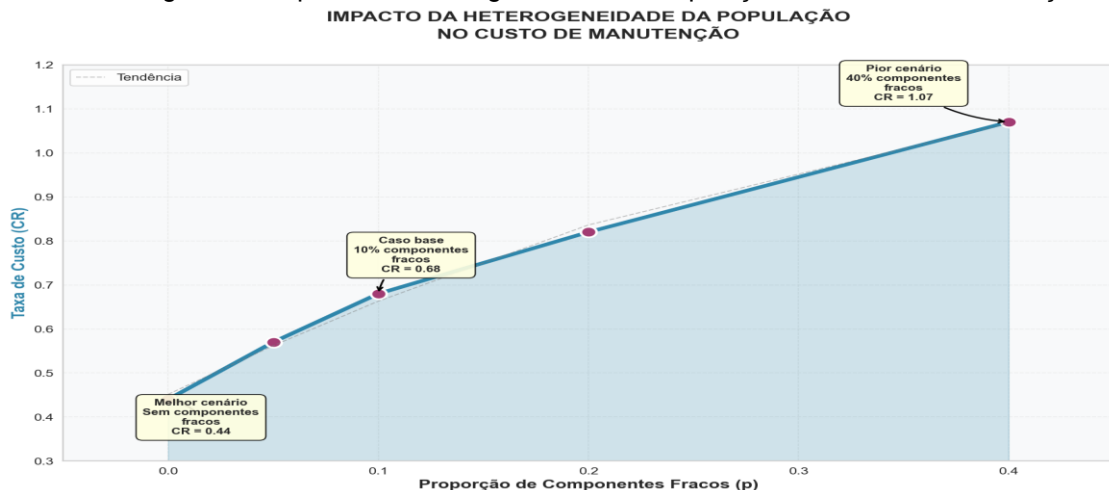
A relação entre a heterogeneidade da população e o custo é um dos achados mais significativos desta análise. Conforme ilustrado pela Figura 10, que mostra o impacto da proporção de componentes fracos (p) no custo, a política de manutenção adapta-se drasticamente.

No extremo mais favorável (Cenário S0, $p = 0$), onde a população é homogênea e composta apenas por componentes fortes, a estratégia ótima elimina completamente as inspeções ($K = 0$) e mantém a substituição preventiva aos 2,74 anos, resultando na menor taxa de custo observada ($CR = 0,44$). Neste caso, a confiabilidade inerente dos componentes não justifica o custo do monitoramento.

À medida que a proporção de componentes fracos aumenta, o sistema se torna mais vulnerável. A política reage tornando-se progressivamente mais intrusiva para gerir o risco. No Cenário S3 ($p = 0,4$), por exemplo, o modelo responde com um monitoramento intensivo: o número de inspeções salta para $K = 9$ e o intervalo entre elas é drasticamente reduzido para $\Delta = 0,37$ ano. Esta ação busca capturar defeitos de forma precoce, explicando o aumento da taxa de custo para $CR = 1,07$, um acréscimo de 57,35% em relação ao caso base.

Além da heterogeneidade, o custo de falha (C_F) destaca-se como o parâmetro de maior sensibilidade. No Cenário S14 ($C_F = 5$), a política responde de forma contundente a falhas potencialmente mais custosas: quadruplica o número de inspeções ($K = 4$) e antecipa a primeira para 1,03 ano. Essa reação, que resulta em um aumento de 141,18% na taxa de custo, demonstra que o modelo prioriza a prevenção a qualquer custo quando o impacto financeiro da falha é significativo.

Figura 9 – Impacto da Heterogeneidade da População no Custo de Manutenção

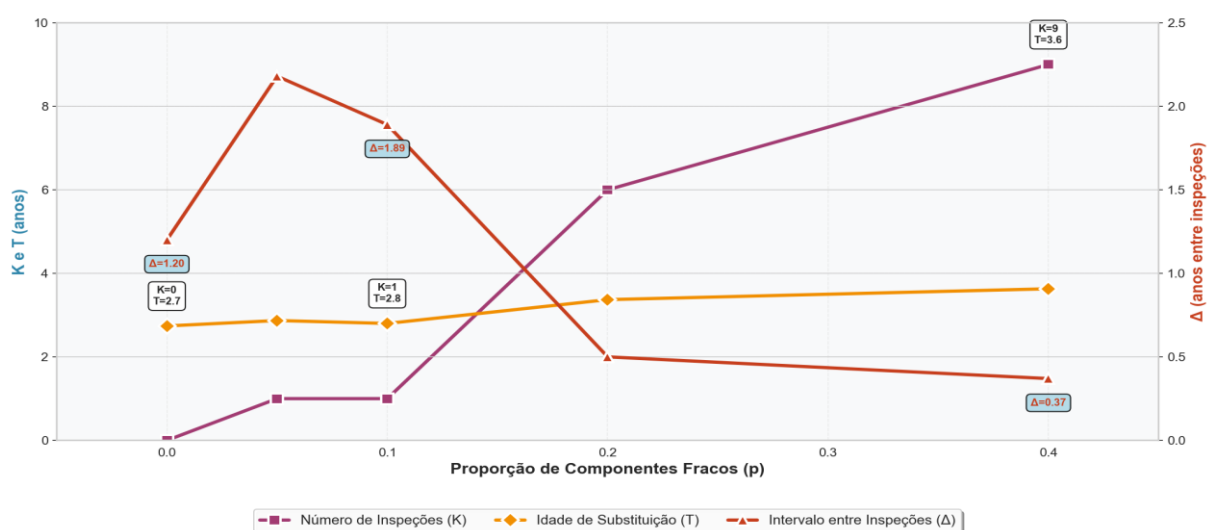


Fonte: Autoria própria (2025).

Essa relação é detalhada na Figura 10, que complementa a análise ao demonstrar o comportamento das variáveis de decisão da política ótima em função da heterogeneidade da população. Visualmente confirma-se que, à medida que a proporção de componentes fracos (p) aumenta, a política responde com maior frequência de monitoramento: o número de inspeções (K) cresce e os intervalos entre elas (Δ) se reduzem. Paralelamente, observa-se que a idade para substituição preventiva (T) mantém uma relativa estabilidade, com apenas um ligeiro aumento à medida que a incerteza da população se eleva.

Esse comportamento revela dois insights importantes. Primeiro, que ignorar a heterogeneidade da população pode levar a subestimações significativas do custo de manutenção, uma vez que a presença de componentes fracos exige um regime de inspeção muito mais intensivo. Segundo que apesar da intensificação das inspeções, a idade ótima de substituição apresenta variação limitada, sugerindo que o envelhecimento médio do sistema permanece um critério robusto mesmo diante da heterogeneidade. Esse padrão reflete uma estratégia globalmente mais conservadora, que busca equilibrar a detecção precoce de componentes problemáticos com a manutenção de um horizonte de substituição consistente para a população como um todo.

Figura 10 – Comportamento da política ótima
COMPORTAMENTO DA POLÍTICA ÓTIMA
EM FUNÇÃO DA HETEROGENEIDADE DA POPULAÇÃO

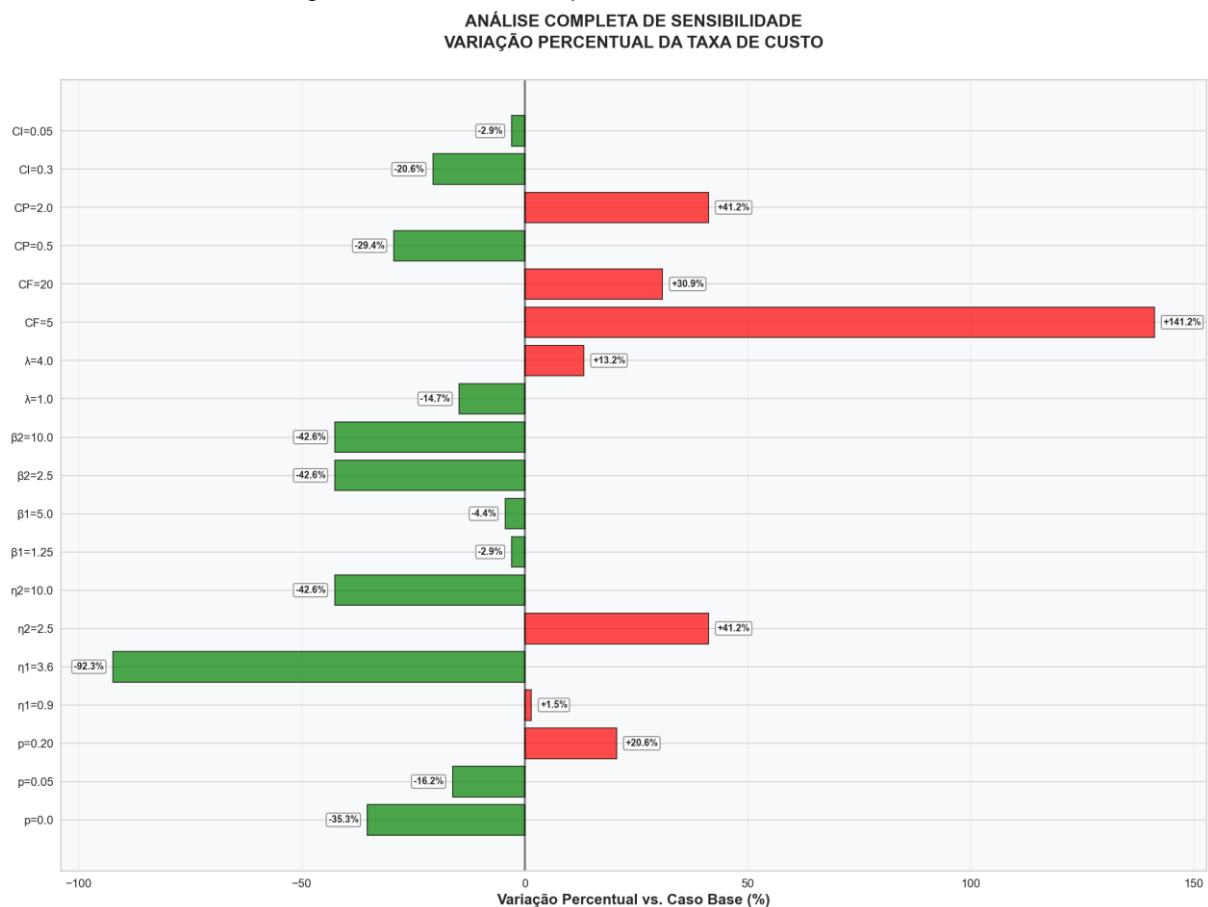


Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 11 consolida a análise, apresentando uma visão hierárquica e abrangente da sensibilidade do modelo ao classificar todos os parâmetros pelo impacto percentual na taxa de custo. O gráfico evidencia que os maiores ganhos potenciais estão associados à confiabilidade intrínseca dos componentes. A durabilidade dos componentes fracos com $\eta_1 = 3,6$ proporciona a maior redução de custo possível, atingindo 92,35%, enquanto a durabilidade dos componentes fortes com $\eta_2 = 10,0$ também oferece um ganho significativo de 42,65%. Esta hierarquia é fundamental para direcionar esforços de melhoria, indicando que investimentos em qualidade de componentes, especialmente naqueles da subpopulação menos confiável, proporcionam o retorno mais substancial.

No espectro oposto, a figura também destaca os principais fatores de risco. O custo de falha confirma sua posição como a principal ameaça à economicidade, podendo inflar os custos em 141,18%.

Figura 11 – Análise completa de sensibilidade da taxa de custo



Fonte: Autoria própria (2025).

A análise dos custos de manutenção revela um comportamento econômico intuitivo e coerente. Quando o custo de manutenção preventiva é reduzido no Cenário S16, a substituição planejada se torna uma opção mais atrativa, resultando em uma economia de 29,41%. A relação com o custo de inspeção mostra um comportamento mais complexo. Um aumento neste custo no Cenário S18 leva a uma política com inspeções mais frequentes, $K = 9$, e intervalos mais curtos de $\Delta = 0,34$ ano. Esta aparente contradição é resolvida pelo modelo, que demonstra que diante de um custo de inspeção fixo mais alto, a estratégia ótima compensa realizando inspeções mais baratas devido ao intervalo mais curto que reduz o risco de falhas caras entre inspeções, mantendo o custo total controlado em $CR = 0,54$. Por outro lado, com inspeções mais baratas no Cenário S19, a política permite um número ainda maior de inspeções, $K = 7$, aproveitando o baixo custo para um monitoramento mais denso.

Em síntese, a política híbrida com parâmetros K, Δ e T demonstra ser notavelmente adaptável e robusta. A lógica por trás de seus ajustes está consistentemente centrada no equilíbrio entre prevenção e economia. Quando o sistema está mais vulnerável, com alta proporção de componentes fracos ou custos de falha elevados, a política age de forma precoce e frequente. Quando o risco é menor ou a prevenção se torna economicamente mais vantajosa, as intervenções são adiadas para reduzir custos. Em todos os cenários analisados, a política demonstra um comportamento consistente e racional, o que confirma sua viabilidade de implementação na indústria de transformação plástica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs e implementou um modelo de gestão de manutenção customizado para o componente de maior criticidade, o rolamento do anilox, em um sistema produtivo vital da indústria de transformação plástica. O estudo partiu de uma pergunta central: como modelar uma política de manutenção que otimize a eficiência operacional e minimize o custo de longo prazo de um ativo crítico? Para respondê-la, a pesquisa seguiu uma trajetória estruturada em três momentos fundamentais.

Primeiro, identificou-se o componente crítico através de análise histórica de falhas e conhecimento técnico, revelando que os rolamentos do anilox respondiam por 35% das paradas não programadas no sistema de impressão. Em seguida, adotou-se uma abordagem de modelagem híbrida que combina inspeções periódicas e substituição preventiva por idade. Esta política foi fundamentada no conceito de delay time e avaliada economicamente por meio do Teorema da Recompensa da Renovação, conforme formalizado por Scarf *et al.* (2009). Por fim, a política foi otimizada com base na minimização da taxa de custo de longo prazo, resultando em uma estratégia composta por uma inspeção após 1,89 anos e substituição preventiva aos 2,8 anos, com taxa de custo de 0,68 para o caso base.

Esses resultados demonstram que a integração de inspeções e substituição por idade, modelada de forma analítica, consegue equilibrar prevenção de falhas e minimização de custos, aumentando a disponibilidade operacional e reduzindo custos de longo prazo em sistemas críticos. A política ótima encontrada responde diretamente ao questionamento inicial, oferecendo um caminho metodológico claro para a gestão de ativos críticos.

A análise de sensibilidade reforçou a robustez do modelo, destacando que o custo de falha e a proporção de componentes fracos são os fatores de maior impacto no desempenho da política. Em cenários extremos, variações nesses parâmetros podem elevar a taxa de custo em mais de 140% ou reduzir significativamente a necessidade de inspeções. Além dos ganhos econômicos, a política proposta contribui para a redução de paradas não programadas, melhoria da qualidade do produto, segurança operacional e sustentabilidade, ao prolongar a vida útil dos componentes e reduzir desperdícios.

Embora o modelo apresente resultados consistentes, reconhecem-se algumas limitações, como a premissa de inspeções perfeitas e a modelagem do delay time com distribuição exponencial, que simplificam a complexidade real do processo de degradação. Como perspectivas para pesquisas futuras, sugere-se a incorporação de inspeções imperfeitas, a adoção de distribuições mais flexíveis para o delay time, a extensão do modelo para sistemas multicomponentes e a integração de dados em tempo real via IoT para manutenção verdadeiramente preditiva.

Por fim, este trabalho não apenas oferece uma solução imediata para o contexto industrial estudado, mas também serve como referência metodológica para a aplicação de modelos analíticos de manutenção em setores similares. A integração entre teoria e prática confere ao estudo relevância tanto acadêmica quanto gerencial, contribuindo para a modernização e competitividade da indústria de transformação plástica nacional.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. **Relatório Setorial 2023**. São Paulo: ABIPLAST, 2023.
- ALMEIDA, J. C. D. **Gestão da Manutenção: Teoria e Prática**. São Paulo: Editora Érica, 2005.
- BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. **Mathematical Theory of Reliability**. New York: John Wiley e Sons, 1965.
- BLANCHARD, B. S. **System Engineering and Management**. 5. ed. Hoboken: John Wiley e Sons, 2017.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems Engineering and Analysis**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.
- CHA, J. H.; FINKELSTEIN, M. **Stochastic Modelling for Reliability: Shocks, Burn-in and Heterogeneous Populations**. London: Springer, 2018.
- CHRISTER, A. H. Developments in Delay Time Analysis for Modelling Plant Maintenance. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, n. 11, p. 1120-1137, 1999.
- CRESWELL, J. W. **Investigação qualitativa e projeto de pesquisa: escolhendo entre cinco abordagens**. 3. ed. Porto Alegre: Penso, 2014.
- DEHSOUKHTAH, S. A.; RAZMKAHA, S.; CASTANIER, B. A hybrid opportunistic predictive maintenance approach for complex systems using the proportional hazards model. **Reliability Engineering e System Safety**, v. 244, 2024.
- DHILLON, B. S. **Engineering Maintenance: A Modern Approach**. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS statistics**. 5. ed. London: Sage, 2017.
- FLEXOTOTAL. **Catálogo técnico de componentes flexográficos**. 2017.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GONÇALVES, J. E. L. **As Fábricas e a Manutenção: Uma Abordagem Estratégica**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 2010.
- GUNGOR, A.; GUPTA, S. M. A systematic review of research in green manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1009-1025, 2019.
- GUPTA, P.; GUPTA, S. Applications of optimization techniques in healthcare: A review. **International Journal of Healthcare Management**, v. 11, n. 3, p. 185-195, 2018.

HARRIS, T. A. **Rolling bearing analysis**. 5. ed. New York: John Wiley e Sons, 2006.

JARDINE, A. K. S.; TSANG, A. H. C. **Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

JARDINE, A. K. S.; TSANG, A. H. C. **Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

JARDINE, A. K. S.; TSANG, A. H. C.; JOSEPH, T. **Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

JIANG, R.; MURTHY, D. N. P. Mixture of Weibull distributions - parametric characterization of failure rate function. **Applied Stochastic Models and Data Analysis**, v. 14, n. 1, p. 47-65, 1998.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

KELLY, A. **Strategic Maintenance Planning**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
KRAFT, D. A software package for sequential quadratic programming. **DFVLR-FB 88-28**, 1988.

LAD, B. K.; KULKARNI, M. S. A dynamic opportunity-based predictive maintenance policy for multi-component systems. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 16, n. 2, p. 132-149, 2010.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive maintenance**. 2. ed. New York: Butterworth-Heinemann, 2002.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 10. ed. New York: John Wiley e Sons, 2019.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997.

MOURA, R. A.; ANDRADE, P. F. **Gestão da Qualidade: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

MOURA, R. A. P. D. **Manutenção Planejada: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2017.

MUCHIRI, P.; PINTELON, L.; GELDERS, L.; MARTIN, H. Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. **International Journal of Production Economics**, v. 131, n. 1, p. 295–302, 2011.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance**. Cambridge: Productivity Press, 1988.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization**. 2. ed. New York: Springer, 2006.

PEREIRA, J. R. **Manutenção Preditiva: Uma Abordagem Prática**. São Paulo: LTC Editora, 2003.

PINTO, J. M.; XAVIER, C. A. **Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma abordagem prática**. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.

PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: An Evolutionary Perspective. In: KOUL, R. *et al.* (Eds.). **Complex System Maintenance Handbook**. London: Springer, 2008. p. 21-48.

PROENÇA, J. A.; BANDEIRA, R. A. M. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

RAO, B. K. N. **Handbook of Condition Monitoring**. Oxford: Elsevier, 2011.

RANDOM – Grupo de Pesquisa em Risco e Análise de Decisão em Operações e Manutenção. **KDeltaT Policy**. Disponível em: <https://randomprototype-kdeltat-main-6lfun1.streamlit.app/>. Acesso em: 09 dez. 2025.

ROSS, S. M. **Introduction to Probability Models**. 12. ed. New York: Academic Press, 2019.

ROSS, S. M. **Stochastic Processes**. 2. ed. New York: John Wiley e Sons, 1996.

RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A.; COSTA, J. M. H. **Manutenção Preditiva: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A. P.; COSTA, A. F. B. Manutenção Baseada em Confiabilidade: Revisão e Análise da Literatura. **Gestão e Produção**, v. 28, n. 2, 2021.

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. 644-653, 2009.

SMITH, A. M.; HINCHCLIFFE, G. R. **RCM: Gateway to World Class Maintenance**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

STAKE, R. E. **Multiple Case Study Analysis**. New York: Guilford Press, 2006.

TAHA, H. A. **Operations Research: An Introduction**. 10. ed. Boston: Pearson, 2016.

TANDON, N.; CHOUDHURY, A. A review of vibration and acoustic measurement

methods for the detection of defects in rolling element bearings. **Tribology International**, v. 32, n. 8, p. 469-480, 1999.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais**: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 2017.

TSAROUHAS, P. **Maintenance Management in Industry 4.0**. Cham: Springer, 2020.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 15. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

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

WANG, W. A model of condition monitoring of a complex system. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 20, p. 5781-5798, 2012.

WIREMAN, T. **Benchmarking Best Practices in Maintenance Management**. New York: Industrial Press, 2004.

YIN, R. K. **Pesquisa estudo de caso**: desenho e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.