



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO

BISMARCK PEREIRA DAS NEVES

**IMPLEMENTAÇÃO, ANÁLISE E APLICAÇÃO DE UM INDICADOR DE  
DESEMPENHO RELATIVO DA MANUTENÇÃO**

Recife  
2024

BISMARCK PEREIRA DAS NEVES

**IMPLEMENTAÇÃO, ANÁLISE E APLICAÇÃO DE UM INDICADOR DE  
DESEMPENHO RELATIVO DA MANUTENÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Alexandre Ramalho Alberti, Dr.

Recife  
2024

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Neves, Bismark Pereira das.

Implementação, análise e aplicação de um indicador de desempenho relativo da manutenção / Bismark Pereira das Neves. - Recife, 2024.

45 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção, 2024.

Orientação: Alexandre Ramalho Alberti.

Inclui referências.

1. Indicador de Desempenho; 2. Desempenho Relativo; 3. Manutenção. I. Alberti, Alexandre Ramalho. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

BISMARCK PEREIRA DAS NEVES

**IMPLEMENTAÇÃO, ANÁLISE E APLICAÇÃO DE UM INDICADOR DE  
DESEMPENHO RELATIVO DA MANUTENÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação Profissional em Engenharia de produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 27/08/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alexandre Ramalho Alberti (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza (Examinador Externo)  
Universidade de São Paulo - USP

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe Ana Pereira das Neves e ao meu pai Domilson Pires das Neves (in memoriam) pelos corretos ensinamentos acadêmicos e de vida.

A minha mulher, Tainá, que sempre compreende e incondicionalmente está ao meu lado.

Agradeço a Acumuladores Moura, que vem depositando em mim tanta confiança durante quase duas décadas, sem medir esforços para mútua melhoria contínua através de estudos e pesquisas.

Também quero deixar minha gratidão ao corpo docente do departamento de engenharia de produção da UFPE, em especial ao Prof. Dr. Alexandre Alberti, pelos ensinamentos, paciência, orientação precisa, dedicação e após essa jornada a quem, posso chamar de amigo.

Aos meus colegas de curso, especialmente Walmar Nogueira, de quem também obtive a honra e o privilégio de chamar de amigo

Por último, e mais importante, a meu Deus de bondade, que sempre me protege, me guia e me ilumina, cuidado da minha saúde e paz.

## RESUMO

Este trabalho propõe um método para avaliar o desempenho relativo da manutenção de sistemas técnicos, com base na disponibilidade, visando permitir uma comparação justa, mesmo em contextos distintos. O método desenvolvido é fundamentado na definição de um nível mínimo esperado de desempenho para cada sistema técnico, permitindo assim a obtenção de uma métrica de desempenho relativo que pode ser comparada entre diferentes sistemas. O trabalho também apresenta um framework para lidar com os desafios práticos associados à obtenção de dados para análise de confiabilidade dos sistemas. Um software chamado "FAIR - Sistema de Informação" foi implementado com o objetivo de facilitar a aplicação do método por gestores de manutenção. Em um estudo de caso conduzido para avaliar a aplicabilidade do método na prática, duas máquinas distintas foram selecionadas para análise comparativa: uma injetora de plástico e uma prensa. Os resultados obtidos indicaram que a manutenção da injetora de plástico apresentou um desempenho relativo superior à da prensa, em linha com as expectativas do gestor da área. A aplicação evidenciou o potencial de contribuição do sistema para a gestão da manutenção na prática.

**Palavras-chave:** Indicador de Desempenho; Desempenho Relativo; Manutenção; Disponibilidade; Estudo de Caso.

## ABSTRACT

This work proposes a method to assess the relative performance of technical systems maintenance, based on availability, aiming to enable a fair comparison even for systems in different contexts. The developed method is grounded in defining a minimum expected performance level for each technical system, thus allowing the derivation of a relative performance metric that can be compared across different systems. The work also presents a framework to address the practical challenges associated with obtaining data for reliability analysis of the systems. A software called "FAIR - Information System" was implemented with the aim of facilitating the method's application by maintenance managers. In a case study conducted to evaluate the method's applicability in practice, two distinct machines were selected for comparative analysis: a plastic injector and a press. The results indicated that the maintenance of the plastic injector exhibited a superior relative performance compared to the press, in line with the expectations of the area manager. The application highlighted the potential contribution of the system to maintenance management in practice.

**Keywords:** Performance Indicator; Relative Performance; Maintenance; Availability; Case Study.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização do método proposto.....	30
Figura 2 - Prensa Yucry 2.....	34
Figura 3 - Pólo de bateria.....	34
Figura 4 – Injetora de termoplásticos.....	35
Figura 5 - Tampa de bateria automotiva.....	35
Figura 6 – Logo e cabeçalho do sistema FAIR.....	38
Figura 7 -Identificação e histórico de desempenho.....	38
Figura 8 - Estimativas do tempo de manutenção.....	39
Figura 9 - Dados relativos à confiabilidade do sistema.....	40
Figura 10 - Distribuição de probabilidade empírica.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores do tipo <i>leading</i> para avaliação do desempenho da manutenção.....	22
Tabela 2 - Conjunto de indicadores do tipo lagging.....	22
Tabela 3 - Estimativas do tempo necessário para manutenção.....	36
Tabela 4 - Prensa 2.....	37
Tabela 5 - Injetora 18.....	37

## SUMARIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	16
<b>2.1.1 Manutenção</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.2 Indicadores de desempenho</b> .....	<b>17</b>
2.2 REVISÃO DA LITERATURA .....	18
<b>3 FRAMEWORK PARA AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO JUSTA DO DESEMPENHO RELATIVO DA MANUTENÇÃO DE SISTEMAS TÉCNICOS</b> .....	<b>21</b>
3.1 ANTECEDENTES .....	21
3.2 INDICADOR DE DESEMPENHO RELATIVO DA MANUTENÇÃO .....	24
<b>3.2.1 Política de Manutenção Básica Padrão</b> .....	<b>25</b>
3.3 UMA ABORDAGEM PARA LIDAR COM A FALTA DE DADOS OBJETIVOS E INCERTEZA .....	28
3.4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	31
<b>4 ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>32</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DA EMPRESA .....	32
4.2 EQUIPAMENTOS ESTUDADOS .....	33
4.3 COLETA DE DADOS PARA A ANÁLISE .....	35
4.4 APLICAÇÃO NO SISTEMA FAIR.....	37
4.5 RESULTADOS DA APLICAÇÃO.....	40
4.6 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS .....	42
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais pilares da economia brasileira é o setor da indústria, correspondendo a cerca de 22% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, de acordo com o Conselho Nacional da Indústria. A mesma fonte também afirma que a indústria corresponde a 49% das exportações brasileiras (R\$ 250 bilhões), 67% (R\$ 47,67 bilhões) do investimento em pesquisa e desenvolvimento do setor privado e 32% (R\$ 87,36 bilhões) dos tributos arrecadados a nível federal (Confederação Nacional da Indústria, 2020).

Diante de um mercado cada vez mais competitivo, a manutenção de um bom nível de produtividade tem se mostrado imprescindível para a competitividade e sobrevivência de empreendimentos industriais, e tal resultado só é possível com a devida gestão da manutenção de máquinas, equipamentos e ferramentas. Neste contexto, a mensuração periódica do desempenho da manutenção se mostra relevante, na medida em que viabiliza a coleta e estruturação de informações relevantes para dar suporte à tomada de decisões por parte dos gestores de operações (Van Horenbeek & Pintelon, 2014).

Este trabalho foi motivado por uma situação observada no contexto de uma indústria manufatureira, onde o gestor de manutenção deseja identificar as melhores práticas de manutenção entre suas equipes, de modo que possa estabelecer um *benchmarking* interno e, eventualmente, implementar uma política de recompensa por bom desempenho. Contudo, o gestor em questão percebeu um desafio relevante associado a esta tarefa: as métricas comumente utilizadas para avaliar o desempenho da manutenção falham em prover uma boa base para comparação de desempenho, uma vez que as equipes de manutenção lidam com sistemas distintos em termos de nível tecnológico, propriedades de confiabilidade e disponibilidade de ferramentas para trabalho.

A fim de abordar este problema, neste trabalho é proposto um novo indicador para avaliar o desempenho relativo da manutenção de sistemas técnicos, partindo da premissa de que para cada sistema (máquina, equipamento ou ferramenta) pode-se esperar um nível mínimo de desempenho a ser alcançado. Então, com base na comparação com esse nível mínimo de desempenho (específico para cada sistema) é possível se obter um indicador de desempenho relativo da manutenção. O trabalho ainda aborda um método desenvolvido com o objetivo de viabilizar tal análise mesmo

na ausência de dados objetivos, e diante da incerteza quanto aos parâmetros básicos necessários para tal.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um método para avaliar o desempenho relativo da manutenção de sistemas técnicos, que permita uma comparação justa do desempenho da manutenção em diferentes condições.

A fim de alcançar o objetivo geral, este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Proposição de um indicador para avaliação do desempenho relativo da manutenção;
- b) Avaliação das condições para aplicação do indicador proposto na prática;
- c) Desenvolvimento de um método para viabilizar a análise de desempenho mesmo em condições de falta de dados objetivos;
- d) Apresentação de um sistema para realização da análise comparativa do desempenho da manutenção;
- e) Aplicação do método em um contexto real e avaliação dos resultados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo é dividido em duas seções principais, sendo a primeira dedicada a uma fundamentação teórica, que tem por objetivo apresentar conceitos fundamentais que estabelecem a base deste trabalho, seguida por uma revisão da literatura, onde são apresentados trabalhos prévios que abordam tópicos relacionados ao objeto deste trabalho.

### 2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo desta seção é apresentar conceitos básicos importantes para a compreensão deste trabalho. Sendo assim, primeiro é apresentado o conceito de manutenção, seguido de uma breve discussão sobre indicadores de desempenho em processos produtivos.

#### 2.1.1 Manutenção

A manutenção é um campo vasto que engloba um conjunto de atividades essenciais para garantir o funcionamento e eficiência dos ativos físicos de uma empresa. Essas atividades vão desde inspeções rotineiras e lubrificação até a execução de reparos e substituição de componentes e equipamentos (Mobley, 2002). A norma brasileira NBR 5462/1994 define manutenção com a “[c]ombinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um sistema em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994).

Algumas estratégias básicas de manutenção podem ser adotadas na prática, destacando-se as estratégias de manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva. A manutenção corretiva consiste na intervenção nos equipamentos somente após a ocorrência de uma falha; trata-se de uma abordagem reativa, que pode ser necessária em casos de emergência ou quando os custos de prevenção são muito elevados. A manutenção preventiva, por sua vez, envolve a execução de atividades de manutenção de acordo com um plano pré-estabelecido, buscando evitar falhas com ações preventivas que se antecipam com relação a estas. A manutenção preditiva, por fim, trata de um tipo de abordagem preventiva que se

baseia no monitoramento das condições dos equipamentos por meio de técnicas como análise de vibração, termografia e análise de óleo (Mobley, 2002). Ding e Kamarudin (2015) ainda identificam um cenário mais avançado em que a manutenção vai além de suas barreiras iniciais e também se dedica a mudanças de práticas, e até mesmo do projeto de sistemas técnicos, com o objetivo de melhorar a sua confiabilidade.

A manutenção, vista no passado como um “mal necessário”, desempenha um papel fundamental nas organizações, especialmente no setor industrial. A gestão adequada (ou não) da manutenção pode ter impactos significativos na disponibilidade, confiabilidade e vida útil de equipamentos, o que também significa que há impacto na qualidade de produtos e segurança das operações (Muchiri *et al.*, 2011).

Apesar da importância da manutenção, empresas diversas enfrentam uma série de desafios ao implementar e gerenciar programas de manutenção. Primeiramente, com o avanço da tecnologia, os equipamentos utilizados têm se tornado cada vez mais complexos, impondo maior dificuldade para a manutenção e demandando um maior nível de expertise por parte da equipe de manutenção, por vezes sendo necessário recorrer a estratégias de terceirização. Além disso, a gestão de ativos se mostra desafiadora para empresas que possuem uma grande variedade de equipamentos com diferentes idades, históricos de manutenção e requisitos de serviço. Isso se soma a um cenário frequentemente observado, em que os recursos (financeiros, técnicos e humanos) disponíveis para a manutenção são restritos e a cultura organizacional não confere o devido valor para a manutenção preventiva (Bakri *et al.*, 2021).

### **2.1.2 Indicadores de desempenho**

Indicadores de desempenho exercem um papel crucial na avaliação para o aprimoramento de operações industriais. Trata-se de métricas que fornecem uma visão objetiva do desempenho de processos, equipamentos e equipes, permitindo o acompanhamento de metas e a identificação de áreas para melhoria (Neely *et al.*, 2005).

No contexto industrial, indicadores de desempenho são amplamente utilizados para medir a eficiência e a eficácia dos processos produtivos, permitindo a identificação de gargalos, a análise de tendências e a comparação de resultados ao

longo do tempo. Além disso, fornecem dados relevantes para a tomada de decisões estratégicas, orientando empresas na busca pela excelência operacional e competitiva (Neely et al., 2005).

Quando se trata da manutenção, os indicadores de desempenho exercem um papel ainda mais significativo, ao permitir a avaliação da eficácia das estratégias de manutenção adotadas, bem como o acompanhamento da disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Indicadores como MTBF (*Mean Time Between Failures* – Tempo Médio Entre Falhas), MTTR (*Mean Time To Repair* – Tempo Médio de Reparo) e OEE (*Overall Equipment Effectiveness* – Eficiência Global do Equipamento) são amplamente utilizados na indústria para mensurar o desempenho dos processos de manutenção e identificar oportunidades de melhoria (Muchiri et al., 2011).

Em resumo, a integração estratégica da manutenção e a utilização eficaz de indicadores de desempenho são fundamentais para o sucesso das operações industriais. Ao adotar uma abordagem baseada em dados e métricas, as empresas podem se posicionar melhor para enfrentar os desafios do mercado e alcançar a excelência operacional.

## 2.2 REVISÃO DA LITERATURA

A medição de desempenho é essencial para a gestão de operações em uma organização. Possuir algum tipo de sistema de medição de desempenho é pré-requisito para que se possa julgar se uma operação vai bem ou não, de acordo com os objetivos estratégicos definidos pela organização; sem isso, se torna impossível exercer o devido controle sobre uma operação, ou mesmo julgar se alguma melhoria é necessária (Slack et al., 2016).

Conforme apontado por Parida et al. (2015), sistemas de medição de desempenho também contribuem para estabelecer uma base para *benchmarking* interno e externo, uma vez que a informação obtida por meio deles faz mais sentido quando utilizada para indicar o quão bom o desempenho de uma operação é em termos comparativos. Sistemas de medição de desempenho podem, então, contribuir para a avaliação da melhoria de desempenho ao longo do tempo em uma organização, e mesmo estabelecer uma base de informação útil para a implementação de programas de remuneração por desempenho.

A medição de desempenho no âmbito da manutenção tem sido abordada em trabalhos acadêmicos há algumas décadas, como mostrado por Parida *et al.* (2015), em um trabalho de revisão sistemática da literatura sobre o tópico. Esse interesse pode ter sido motivado por uma mudança na visão que gestores de organizações têm sobre o papel da manutenção, que deixou de ser vista como um “mal necessário” e passou a ser reconhecida como uma atividade que agrega valor, especialmente no contexto de operações intensivas em capital (Parida *et al.*, 2015).

Alguns *frameworks* foram apresentados na literatura para dar suporte ao desenvolvimento de sistemas de medição de desempenho para a manutenção. Neste âmbito destaca-se o trabalho de Muchiri *et al.* (2011), onde os autores apontam que, na elaboração de um sistema de medição de desempenho, os indicadores de desempenho não devem ser definidos de maneira isolada, mas se apresentarem como resultado de uma análise cuidadosa da relação da função manutenção com outras funções organizacionais. Em trabalho anterior, parte dos autores participou de uma análise empírica junto a empresas belgas, que trouxe importante *insights* da realidade prática (Muchiri *et al.*, 2010).

Muchiri *et al.* (2011) apresentaram uma revisão abrangente de medidas de desempenho para a manutenção e propuseram um *framework* conceitual para construção de um sistema com um conjunto de indicadores que, avaliados em conjunto, podem ser capazes de prover uma boa base para análise do desempenho da manutenção como um todo. O *framework* considera duas classes de indicadores de desempenho: indicadores *lagging* e indicadores *leading*. Os primeiros são utilizados para avaliar, *a posteriori*, o desempenho de uma estratégia já implementada, enquanto os últimos servem para monitorar o progresso de uma atividade, podendo ser utilizados para orientar decisões e mudanças em uma estratégia enquanto ela está sendo implementada. Exemplos de indicadores do tipo *lagging* para a manutenção são: número de paradas não planejadas, disponibilidade e tempo médio entre falhas. Por outro lado, são indicadores do tipo *leading*: percentual de ordens de serviço atendidas dentro do prazo, tempo médio de reparo e percentual de tempo de trabalho dedicado a trabalho proativo.

O desenvolvimento de sistemas com múltiplos indicadores para a medição do desempenho da manutenção pode ser uma tarefa complexa, visto que há uma grande diversidade de indicadores que podem parecer úteis; mas um bom sistema deve incluir um número restrito deles para que um monitoramento adequado seja possível.

Endereçando esta questão, Parida e Chattopadhyay (2007) apresentaram um *framework* baseado em um sistema de hierarquia e múltiplos critérios de avaliação para construção de um sistema de avaliação de desempenho da manutenção útil para *stakeholders* em diferentes níveis. Mais recentemente, Van Horenbeek e Pintelon (2014) propuseram um *framework* baseado no método ANP (*Analytic Network Process*) para selecionar e priorizar indicadores para medição do desempenho na manutenção. Todos destacam que um bom sistema de avaliação de desempenho deve ser desenvolvido a partir de uma análise do contexto específico onde será utilizado.

No que diz respeito a apresentação e discussão mais aprofundada de indicadores de desempenho para a manutenção, Wireman (1998) apresenta em seu livro um conjunto abrangente de indicadores já consolidados na literatura e prática. Alguns autores defendem o uso de métricas agregadas, como o índice de produtividade da manutenção apresentado por Lofsten (2002). Entretanto, esta abordagem encontra algumas críticas, pois pode prover uma visão limitada do desempenho da manutenção, além do desafio de quantificar diferentes tipos de *inputs* e *outputs* da manutenção (Muchiri *et al.*, 2011).

O presente trabalho contribui para a literatura com a apresentação de um novo indicador de desempenho, adequado para conduzir uma avaliação comparativa do desempenho da manutenção de sistemas técnicos, em termos relativos. Esta contribuição surge após um período de tempo significativo em que não se observa contribuições relevante à literatura da área, conforme pesquisa em bases de dados de artigos científicos como SCOPUS e *Web of Science*.

### **3 FRAMEWORK PARA AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO JUSTA DO DESEMPENHO RELATIVO DA MANUTENÇÃO DE SISTEMAS TÉCNICOS**

Neste capítulo é apresentado um *framework* elaborado para avaliar e comparar de maneira equitativa o desempenho da manutenção em sistemas técnicos, mesmo quando lidando com a complexidade da manutenção de sistemas distintos entre si, caracterizados por propriedades diversas de confiabilidade.

O impulso para esse trabalho surgiu a partir de uma situação observada em um contexto industrial, onde o gestor de manutenção buscava identificar as melhores práticas nessa área. O objetivo era estabelecer um *benchmarking* interno e, eventualmente, implementar uma política de recompensas por desempenho excepcional. Contudo, o gestor percebeu um desafio significativo: as métricas convencionais para avaliar o desempenho da manutenção mostravam-se inadequadas para a comparação justa, dada a diversidade de sistemas com os quais as equipes de manutenção lidavam, variando em termos de nível tecnológico, confiabilidade e recursos disponíveis para manutenção.

O *framework* proposto neste capítulo parte do pressuposto de que, para cada sistema técnico, é possível definir um patamar mínimo de desempenho alcançável com a aplicação de políticas de manutenção simples e adaptáveis. Ao comparar o desempenho da manutenção ao longo do tempo com esse nível estabelecido como referência básica, torna-se possível calcular um indicador de desempenho relativo. Esse indicador viabiliza uma comparação mais justa do desempenho da manutenção em sistemas técnicos diversos.

#### **3.1 ANTECEDENTES**

Conforme discutido no Capítulo 2, a problemática da medição de desempenho na área de manutenção já foi amplamente abordada na literatura, sendo identificada como um desafio significativo para os gestores. Destaca-se, entre os trabalhos dedicados a esse tema, o artigo de Muchiri *et al.* (2011), o qual acumula 236 citações na base de dados SCOPUS (data de referência: 23/08/2024).

No referido trabalho, os autores apresentaram um *framework* composto por três fases. Inicialmente, parte-se da definição de uma estratégia para a manutenção, seguida pela seleção de indicadores para a construção de um sistema de avaliação

de desempenho. Essa seleção tem início com indicadores do tipo *leading*, os quais desempenham um papel crucial na orientação das decisões durante a implementação de uma estratégia de ação (Muchiri *et al.*, 2011).

Os indicadores do tipo *leading*, conforme classificados por Muchiri *et al.* (2011), são distribuídos em quatro categorias que abrangem a identificação, planejamento, agendamento e execução de trabalho. Uma tabela contendo um conjunto de indicadores do tipo *leading* específicos para manutenção é apresentada a seguir.

Tabela 1 - Indicadores do tipo *leading* para avaliação do desempenho da manutenção

<b>Categoria</b>	<b>Indicador</b>	<b>Un.</b>	<b>Descrição</b>	<b>Metas recomendadas</b>
Identificação de trabalho	Percentual de trabalho proativo	%	Homens-hora dedicados a trabalho proativo/ Total de homens-hora disponível	75% - 80%
	Percentual de trabalho reativo	%	Homens-hora dedicados a trabalho reativo/ Total de homens-hora disponível	10% - 15%
	Percentual de trabalho orientado a melhoria	%	Homens-hora dedicados a modificações e melhoria/ Total de homens-hora disponível	5% - 10%
Planejamento de trabalho	Taxa de planejamento	%	Tarefas planejadas/ Total de tarefas	95% das ordens de serviço (OS)
	Qualidade do planejamento	%	Percentual de OS que demandaram retrabalho devido a planejamento/ Total de OS	< 3% das OS
Agendamento de trabalho	Taxa de agendamento	%	Homens-hora de trabalho agendado/ Total de homens-hora	> 80%
	Qualidade do agendamento	%	Percentual de OS com execução atrasada devido a falta de material ou pessoal	< 2%
	Taxa de execução de agenda	%	OS com data agendada menor ou igual ao prazo final da tarefa/ Total de OS	> 95%
Execução do trabalho	Tempo médio de reparo	Horas	Tempo total de parada/ número de falhas	
	Taxa de utilização de força de trabalho	%	Total de horas dedicadas a tarefas/ Tempo disponível	> 80%
	Eficiência da força de trabalho	%	Tempo alocado a tarefas/ Tempo gasto com tarefas	
	Qualidade de execução	%	Percentual de ações de manutenção com demanda de retrabalho	< 3%

Fonte: adaptado de Muchiri *et al.* (2011)

A Tabela 1 revela que a maioria dos indicadores do tipo *leading* possui valores de referência para as metas de desempenho. Esses indicadores desempenham um papel valioso na avaliação de questões relacionadas à disponibilidade de mão-de-obra e materiais, métodos de trabalho e estratégias de gerenciamento. A presença de valores de referência torna esses indicadores apropriados para análises comparativas. Por outro lado, alguns indicadores, como o Tempo Médio de Reparo, não contam com valores de referência devido ao impacto das peculiaridades individuais de cada caso. Nesses cenários, a criação de uma base sólida para análises comparativas torna-se desafiadora, uma vez que comparar o desempenho da manutenção com base no Tempo Médio de Reparo entre dois sistemas técnicos distintos pode não ser justo, dadas as diferentes condições para a realização de ações de manutenção.

Em contrapartida, os indicadores do tipo *lagging* são empregados para avaliar retrospectivamente o desempenho de estratégias já implementadas. Conforme sugere o próprio termo, é necessário um período após a implementação de uma estratégia para que esses indicadores possam fornecer informações relevantes (Muchiri *et al.*, 2011).

A Tabela 2 apresenta um conjunto de indicadores do tipo *lagging* destinados à análise do desempenho de equipamentos.

Tabela 2 - Conjunto de indicadores do tipo lagging

Indicador	Unidade	Descrição
Número de falhas	n°	Número de falhas classificadas de acordo com suas consequências
Frequência de falhas/paradas	n°/unidade de tempo	Número de falhas por unidade de tempo
Tempo médio entre falhas	horas	Tempo médio entre falhas
Disponibilidade	%	Tempo de equipamento disponível/ Tempo total
OEE ( <i>Overall Equipment Effectiveness</i> – Eficiência Global do Equipamento)	%	Disponibilidade * Taxa de Produtividade * Taxa de Qualidade

Fonte: adaptado de Muchiri *et al.* (2011)

Na Tabela 2 percebe-se a falta de valores de referência para as metas de desempenho em cada indicador. Essa lacuna decorre da natureza particular de cada caso: variações na confiabilidade dos equipamentos e nas condições de trabalho têm um impacto direto nos resultados alcançados pela manutenção. Ao comparar

equipamentos com diferentes previsibilidades de falhas, é razoável esperar uma incidência variada de falhas entre eles. Sem a definição de uma métrica de desempenho relativo, torna-se inviável estabelecer uma base para uma comparação justa do desempenho da manutenção em equipamentos.

Com o intuito de facilitar a criação de uma base apropriada para análises comparativas do desempenho da manutenção em equipamentos diversos, este trabalho apresenta um método de análise fundamentado no conceito de desempenho relativo, o qual será detalhado na próxima seção.

### 3.2 INDICADOR DE DESEMPENHO RELATIVO DA MANUTENÇÃO

A execução da manutenção em um sistema técnico é fortemente moldada por condições específicas do contexto, abrangendo desde as características técnicas do próprio sistema até a disponibilidade de recursos materiais e capacidade técnica para as operações de manutenção. Dada a singularidade de cada situação, torna-se impraticável estabelecer um indicador de desempenho direto que permita uma comparação justa do impacto da manutenção no desempenho de sistemas técnicos que operam em contextos distintos. Para viabilizar essa comparação, o *framework* proposto neste trabalho adota um indicador de desempenho relativo, ou seja, um indicador calculado com base em um nível de desempenho estabelecido como referência para cada contexto.

A premissa fundamental subjacente ao desenvolvimento deste trabalho é a seguinte: para cada caso analisado, é possível determinar um nível mínimo de desempenho esperado para o sistema como resultado das atividades de manutenção. Propõe-se que o desempenho seja avaliado em termos da disponibilidade do equipamento, dado que é um indicador relativamente fácil de quantificar e menos propenso a distorções. Embora critérios relacionados a custos sejam comumente empregados em modelos de suporte à tomada de decisões em manutenção (Almeida *et al.*, 2015), indicadores de custos podem ser suscetíveis a distorções, principalmente devido à complexidade na contabilização de custos indiretos relacionados à manutenção.

Uma vez estabelecido o nível de referência para a disponibilidade de um sistema, o indicador de desempenho relativo da manutenção, representado aqui por  $\theta$ , é definido de acordo com a Equação 1:

$$\theta = \frac{A_{obs} - A^*}{1 - A^*} \quad (01)$$

Onde:

- $A_{obs}$  – disponibilidade do sistema observada ao longo de um período de tempo, definida como fração do tempo em que o sistema se encontra disponível para operação.
- $A^*$  – nível mínimo de disponibilidade esperado para o sistema.

Na forma como foi definido, o indicador de desempenho relativo da manutenção ( $\theta$ ) destaca como tendo melhor resultado a manutenção feita em um sistema no qual foi possível avançar mais, em termos proporcionais, sobre o *gap* existente entre a disponibilidade mínima esperada para o sistema em questão e a total disponibilidade.

Quanto a operacionalização de um sistema de avaliação de desempenho baseado no indicador apresentado, a primeira questão que se apresenta é: como definir o nível mínimo de disponibilidade esperado para cada sistema? Para tal, propôs-se o desenho de uma política de manutenção padrão, simples e flexível o suficiente para que possa ser adaptada para grande parte dos sistemas técnicos existentes. Essa política, dada a sua simplicidade, representa o mínimo que se espera do que pode ser feito, e o nível mínimo de disponibilidade esperado é obtido a partir da sua otimização.

Um desafio que pode se fazer presente, quando da definição do nível mínimo de disponibilidade a partir da otimização da política de manutenção padrão, está relacionado à dificuldade para obter uma boa estimativa dos parâmetros necessários para a modelagem matemática da política citada. Frequentemente, gestores de manutenção não têm acesso a dados objetivos em quantidade e com qualidade o suficiente para fazer uma boa caracterização matemática da confiabilidade de sistemas técnicos (Jonge & Scarf, 2019). Este trabalho também apresenta um método que viabiliza a realização de análises comparativas mesmo diante da incerteza associada ao real valor do indicador de desempenho relativo da manutenção.

### 3.2.1 Política de Manutenção Básica Padrão

O indicador de desempenho relativo da manutenção, delineado anteriormente, requer a definição de um nível mínimo de disponibilidade esperado para cada sistema.

Para estabelecer esse ponto de referência, sugere-se que seja este derivado da otimização de uma política de manutenção básica padrão. Essa política deve ser adaptável a diferentes contextos e suficientemente simples, representando o esforço mínimo esperado da manutenção.

A política proposta é desenvolvida com base em alguns pressupostos fundamentais. Primeiramente, considera-se que o sistema está sujeito a dois modos de falha principais: falhas menores e falhas maiores. Falhas menores referem-se a eventos pontuais e localizados, como a substituição corretiva de um componente específico. Por outro lado, as falhas maiores são falhas abrangentes que comprometem a operação global do sistema, exigindo uma manutenção geral com a substituição de todos os componentes relevantes. A falha maior ocorre quando o estado de deterioração do sistema atinge um ponto tal em que não é possível ou economicamente viável retornar à operação normal com a substituição de um componente específico que falhou.

Para a modelagem matemática, assume-se que as falhas menores ocorrem no sistema de acordo com um Processo de Poisson, homogêneo ou não, enquanto o tempo até a ocorrência de uma falha maior é caracterizado como uma variável aleatória com distribuição de probabilidade Weibull. Além disso, presume-se que os processos associados aos dois modos de falha são estatisticamente independentes, simplificando a modelagem sem sacrificar a flexibilidade do modelo para acomodar diferentes cenários.

A política de manutenção básica padrão é então definida como uma política simples com uma única variável de decisão:  $T$ , que representa a idade máxima do sistema para a realização da manutenção preventiva geral. Segundo essa política, se o sistema não sofrer uma falha maior antes de atingir a idade  $T$ , contada desde o início de sua operação, ele passa por uma manutenção preventiva geral; caso contrário, ele é submetido a uma manutenção geral corretiva quando ocorre a falha maior. Falhas menores, por sua vez, são abordadas de forma corretiva e pontual. Na realidade prática, a manutenção geral corretiva resulta de um adiantamento da preventiva geral por razões de viabilidade técnica e/ou econômica. Para a modelagem matemática, a manutenção geral é caracterizada como uma manutenção perfeita, enquanto a manutenção pontual é representada como um reparo mínimo.

Essa política é uma adaptação da clássica política de substituição por idade, aplicável ao nível máximo de um sistema interconectado, sem extensão para uma

planta produtiva ou setor como um todo. Trata-se de uma política facilmente generalizável, podendo ser aplicada mesmo em situações onde não é possível realizar o monitoramento do estado de um sistema.

Considerações feitas, a expressão analítica para o cálculo da disponibilidade do sistema em função da variável de decisão T é apresentada na Equação 2:

$$A(T) = 1 - \left\{ \frac{D_p.R(T) + D_f.F(T) + \sum_{n=0}^{\infty} n.D_m. \left[ \Pr\{n,T\}.R(T) + \int_0^T \Pr\{n,t\}.f(t)dt \right]}{(T+D_p).R(T) + \int_0^T (t+D_f).f(t)dt} \right\} \quad (02)$$

Onde:

- $\Pr\{n,t\}$  é a probabilidade de haver n falhas menores em um intervalo de tempo t, sendo esta probabilidade definida de acordo com um Processo de Poisson com taxa definida
- $D_m$ ,  $D_p$  e  $D_f$  são os tempos médios de parada devido a, respectivamente, mínimo reparo, manutenção geral preventiva e manutenção geral corretiva
- $R$ ,  $F$  e  $f$  são, respectivamente, as funções de confiabilidade, probabilidade de falha acumulada e densidade de probabilidade para o tempo até a falha maior, aqui caracterizadas de acordo com uma distribuição de probabilidade Weibull.

A expressão apresenta a disponibilidade sendo calculada como 1 menos a indisponibilidade, definida como a razão entre o tempo médio de parada devido a falhas e manutenção e o tempo médio de duração de um ciclo de renovação do sistema.

Para que seja possível encontrar o valor de T que maximiza a disponibilidade do sistema sob a política proposta, é necessário informar um conjunto de parâmetros característicos do problema, nomeadamente: 1. os parâmetros de forma e de escala para a distribuição Weibull, que foi utilizada para representar a aleatoriedade do tempo até a falha maior, 2. a função que caracteriza a evolução da taxa de chegada de falhas menores ao longo do tempo, e 3. os tempos médios de manutenção no contexto de reparo mínimo e manutenção geral. As dificuldades presentes, principalmente quando da estimativa dos parâmetros relacionados às propriedades de confiabilidade do sistema, demandam uma abordagem para lidar com a incerteza quanto a informação possível de se obter. A abordagem proposta é apresentada na próxima seção.

### 3.3 UMA ABORDAGEM PARA LIDAR COM A FALTA DE DADOS OBJETIVOS E INCERTEZA

A determinação analítica da disponibilidade resultante da implementação da política de manutenção básica padrão requer o conhecimento de vários parâmetros essenciais, incluindo características de confiabilidade do sistema (distribuição Weibull para o tempo até falha maior) e do processo de chegada de falhas menores (processo de Poisson), além de parâmetros relacionados ao tempo de parada para manutenção. Embora não seja um conjunto extenso de parâmetros, antecipa-se a dificuldade de acesso a dados em quantidade e qualidade suficientes para uma estimativa precisa.

Para superar as barreiras impostas pela dificuldade no acesso a dados objetivos, propõe-se uma abordagem que envolve a elicitacão do conhecimento de especialistas e a consideracão da incerteza. A elicitacão de conhecimento de especialistas tem como objetivo obter dados subjetivos, que têm valor informativo na ausência de dados objetivos qualificados. Vários métodos têm sido discutidos na literatura como alternativas para conduzir o processo de elicitacão, enfatizando a busca por um método que demande menos esforço cognitivo por parte dos especialistas, contribuindo assim para uma participacão mais eficaz e confiável. Nesse contexto, observa-se que os especialistas acham mais fácil trabalhar com estimativas de faixas de valores possíveis em vez de estimativas pontuais para um parâmetro desconhecido (Morris *et al.*, 2014).

A abordagem de elicitacão proposta neste trabalho visa simplificar o trabalho dos especialistas, utilizando informacões sobre faixas de valores possíveis para os parâmetros de interesse. Uma vez definida essa faixa entre o valor mínimo e máximo esperado para cada parâmetro, o valor real do parâmetro é representado como uma variável aleatória uniformemente distribuída dentro dessa faixa específica. Utilizando as distribuições de probabilidade dos parâmetros e fazendo uso do método de simulacão de Monte Carlo para gerar amostras de combinações dos parâmetros, é possível obter uma distribucão de probabilidade empírica para o nível de referênciac de disponibilidade. Com isso, ao informar a disponibilidade real do sistema observada ao longo do tempo, obtém-se uma distribucão de probabilidade aproximada para o valor do indicador de desempenho relativo da manutenção ( $\theta$ ).

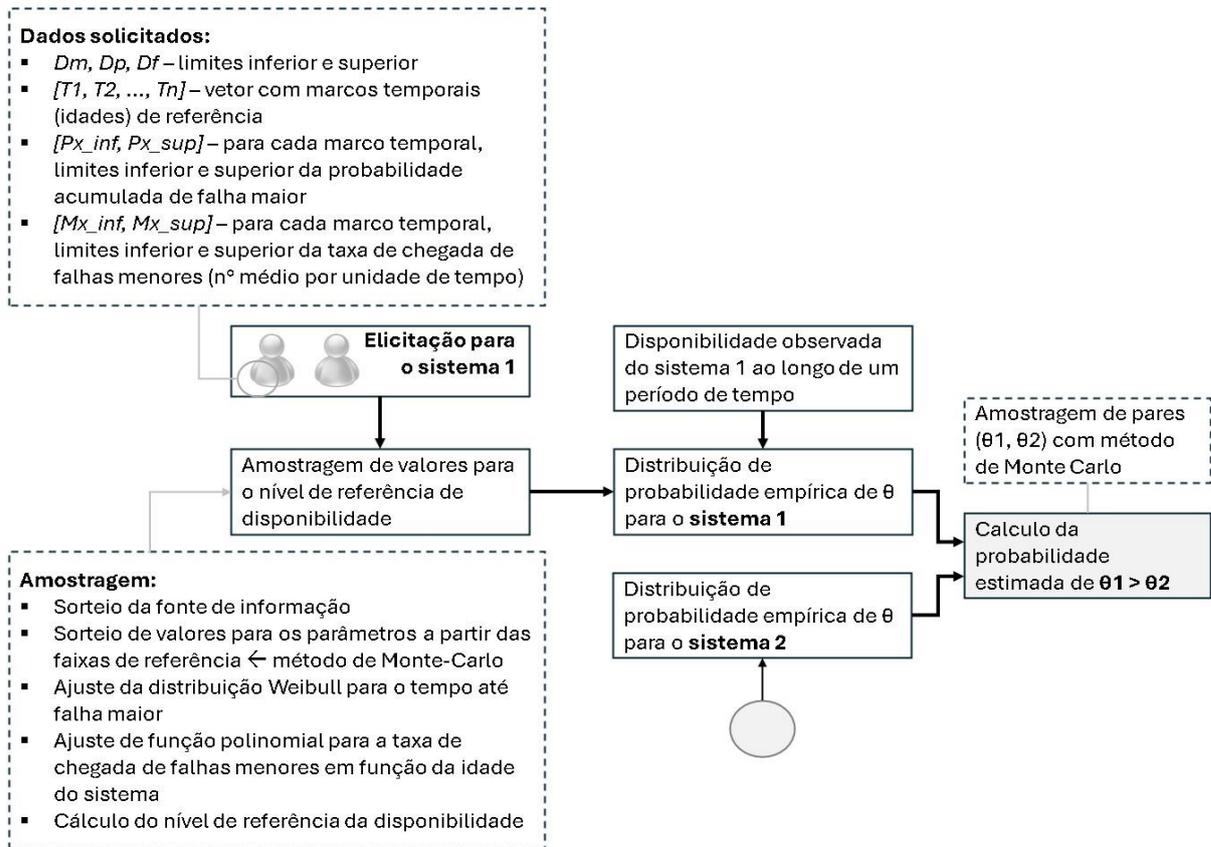
A estruturação do método de elicitación ocorre da seguinte maneira: inicialmente, os especialistas são solicitados a fornecer os limites inferior e superior para os valores possíveis de  $D_m$ ,  $D_p$  e  $D_f$ . Para avaliar os parâmetros característicos da confiabilidade do sistema, emprega-se uma abordagem indireta: os especialistas são questionados sobre os limites inferior e superior para a probabilidade de o sistema apresentar uma falha maior em diferentes níveis de idade do sistema. Os especialistas também são questionados sobre os limites inferior e superior para a taxa de ocorrência de falhas menores em cada ponto de referência. Essa abordagem indireta foi concebida com o objetivo de prevenir distorções que poderiam favorecer a avaliação do desempenho de um sistema.

Após obter as faixas de valores para os parâmetros de interesse, procede-se à obtenção de uma amostra de combinações de valores dos parâmetros para calcular o indicador  $\theta$ , utilizando o método de simulação de Monte Carlo (Fishman, 1995). É relevante destacar que o método permite o uso de informações obtidas a partir da elicitación de conhecimento de vários especialistas; no entanto, as combinações de não devem mesclar dados provenientes de especialistas distintos.

Com o método apresentado, é possível obter uma distribuição de probabilidade para o valor do indicador de desempenho relativo da manutenção para um sistema, em vez de uma estimativa pontual. Diante desse cenário, como realizar uma análise comparativa quando as distribuições de probabilidade para o indicador  $\theta$  de dois sistemas distintos se sobrepõem? Para essa situação, propõe-se a utilização do método de Monte Carlo novamente para obter uma amostra de combinações do valor de  $\theta$  para os dois sistemas que se deseja comparar. A partir dessa amostra, estima-se a probabilidade de que o indicador  $\theta$  para um sistema seja maior que para o outro. Se a probabilidade estimada de que  $\theta$  para o sistema 1 seja maior do que  $\theta$  para o sistema 2 for elevada (por exemplo, superior a 95%), tem-se um bom nível de confiança para afirmar que o desempenho relativo da manutenção do sistema 1 é superior ao da manutenção do sistema 2.

Uma esquematização do método proposto é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Esquematização do método proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

O método apresentado na Figura 01 foi implementado em linguagem *Python*, e uma aplicação chamada “FAIR – Sistema de Informação” foi disponibilizada gratuitamente por meio do link <https://drive.google.com/drive/folders/1a1H0tWxUErGNcytpaTTZ0hqsOXJzROG7?usp=sharing>. O sistema foi apresentado no evento INSID – *INnovation for Systems Information and Decision Meeting*, realizado entre 30 de novembro e 02 de dezembro de 2022, na cidade do Recife, com trabalho intitulado “Indicador de desempenho relativo da manutenção: implementação de um sistema para comparação justa do desempenho de equipes de manutenção atuando em diferentes condições” (Neves; Alberti, 2022). Avanços posteriores foram apresentados para discussão no evento 12th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (Alberti; Neves, 2023). No presente trabalho, os resultados de testes de validação e de uma aplicação em contexto prático são apresentados.

### 3.4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Uma vez que o método foi implementado, passou por múltiplos refinamentos e teve sua eficácia validada, diversas simulações foram conduzidas para avaliar a capacidade do método em discriminar sistemas com desempenho superior, considerando um nível mínimo de relevância de 95% na análise probabilística.

Inicialmente, foi realizada uma comparação entre uma política de inspeção e uma política de manutenção preventiva simples baseada na idade, ambas otimizadas. Era esperado que a política de inspeção apresentasse um desempenho superior, pois leva em conta a possibilidade de tomar decisões sobre manutenção com base no estado de deterioração do sistema, permitindo um melhor aproveitamento da vida útil dos componentes e reduzindo paradas desnecessárias para manutenção. Por meio de simulações em cem cenários, o método foi capaz de apontar a melhor política com mais de 95% de probabilidade em todos os casos.

Posteriormente, uma comparação foi realizada entre políticas idênticas, primeiro considerando uma política de manutenção preventiva simples e, em seguida, uma política de inspeção. Nesse caso, a comparação foi entre uma política ótima e uma sub-ótima. Foram simulados cem cenários para cada política, e observou-se um baixo poder de discriminação da política mais efetiva. Esse poder de discriminação tende a aumentar apenas com horizontes de tempo mais longos. Em outras palavras, ao considerar duas equipes que mantêm as mesmas práticas de manutenção, é necessário um "lag" maior para obter algum poder de discriminação de desempenho, o que pode resultar em atrasos na obtenção de conclusões relevantes para orientar decisões.

## 4 ESTUDO DE CASO

A fim de verificar a validade do método proposto para análises na realidade prática, foi conduzido um estudo de caso que envolveu a análise comparativa do desempenho da manutenção sobre dois equipamentos distintos utilizados em uma fábrica de componentes de baterias.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DA EMPRESA

A planta industrial onde o estudo de caso foi conduzido é uma fábrica de baterias situada no agreste de Pernambuco. A empresa responsável pela planta possui múltiplas unidades de produção, distribuídas principalmente na região do Mercosul (Mercado Comum do Sul); entretanto, a produção dos conjuntos de componentes plásticos é concentrada em uma unidade em Pernambuco, denominada Unidade 05, com capacidade instalada para atender a uma demanda de 1.200.000 baterias por mês.

Além de baterias automotivas, a empresa inclui em seu portfólio baterias para motocicletas, trens, empilhadeiras, nobreaks, torres de celular, caixas eletrônicos, sistemas de armazenamento solar *Off Grid*, para além de baterias de alta capacidade para grupos geradores e armazenamento solar (BESS). Trata-se de uma empresa em posição de vanguarda na tecnologia de baterias.

Com um parque fabril que ocupa uma área de cerca de 16.000 m<sup>2</sup>, a Unidade 5 é subdividida em 5 Unidades Gerenciais Básicas (UGBs), sendo que as UGBs 1, 2 e 5 são responsáveis pela fabricação das caixas, tampas e sobre tampas, respectivamente. A UBG 3 é a recicladora de plásticos (a empresa recicla 100% das baterias que põe no mercado, recuperando assim o chumbo, o ácido e o Polipropileno). Já a UBG 4 fabrica os polos para todos os tipos de baterias que o grupo fornece aos seus clientes.

O processo produtivo conta com, ao todo, 37 injetoras de grande porte, 12 robôs, 6 prensas, 4 injetoras de chumbo, 4 fundidoras de terminais, 2 extrusoras de reciclagem de polipropileno, cada uma com capacidade de 1 tonelada por hora, além de uma ferramentaria de médio porte com 9 operatrizes.

Para dar suporte à operação, a unidade conta com os setores de apoio, como o controle de qualidade, a segurança industrial, a engenharia de instalações, a gestão de pessoas, a engenharia de processo e engenharia de manutenção.

A engenharia de manutenção da Unidade 5 apresenta uma configuração com os seguintes setores: a automação industrial, que fornece manutenção para todas as UGB's; a ferramentaria, que presta manutenção nos moldes de injeção de plástico e chumbo, se subdividindo em dois setores: ferramentaria caixa e ferramentaria tampas; a manutenção mecânica, que fornece manutenção para as injetoras, chiles, geladeiras e predial; e a ,manutenção RePla, que fornece serviços para a unidade recicladora e para a fábrica de polos. Com cinco oficinas, o setor de manutenção conta com 89 colaboradores, o que representa cerca de 35% do total de pessoas da fábrica.

## 4.2 EQUIPAMENTOS ESTUDADOS

No Estudo de Caso, foram avaliados dois equipamentos, com o objetivo de verificar em que caso a manutenção apresenta melhor desempenho. Vale ressaltar que os equipamentos estudados são mantidos por equipes distintas.

O primeiro equipamento considerado para análise foi uma prensa, aqui denominada Prensa 2 (Figura 03), utilizada na fabricação do polo (Figura 04) da bateria. O equipamento, da fabricante chinesa Yucry, está situado na UGB04 e em operação desde 2014, com uma capacidade de produção de 900 pares por hora.

O segundo equipamento considerado para análise foi uma injetora, aqui denominada Injetora 18 (Figura 04). O equipamento, de fabricação brasileira, da marca ROMI, chegou ao parque da empresa em 2007 e, a depende do produto que estiver produzindo, pode ter uma capacidade de pouco mais de 100.000 produtos por mês. A tampa de bateria automotiva, apresenta na Figura 05, é um dos produtos que podem ser produzidos neste equipamento.

O fato de os equipamentos serem muito diferentes entre si representa um grande desafio para a análise comparativa do desempenho da manutenção. Neste sentido, trata-se de um bom contexto para aplicação do método proposto no presente trabalho.

Figura 2 - Prensa Yucry 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3 - Pólo de bateria



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4 – Injetora de termoplásticos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5 - Tampa de bateria automotiva



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.3 COLETA DE DADOS PARA A ANÁLISE

A fim de se realizar a análise comparativa do desempenho da manutenção da Prensa 2 e da Injetora 18, primeiro verificou-se a disponibilidade dos equipamentos no intervalo de um mês. Com base em registros, estimou-se uma disponibilidade de 87% para a Prensa 2 e 94% para a Injetora 18.

A coleta dos demais dados necessários para a análise foi feita por meio da aplicação de questionários. A abordagem de elicitación do conhecimento de

especialistas foi necessária em face da ausência de dados objetivos em quantidade e qualidade suficientes para fazer uma análise de confiabilidade dos equipamentos.

As estimativas do tempo necessário para realização de intervenções de manutenção são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Estimativas do tempo necessário para manutenção

	Tempo necessário para manutenção - estimativa em horas					
	Reparo mínimo		Manutenção preventiva geral		Manutenção corretiva geral	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Prensa 2	0,25	1,75	27	51	31	55
Injetora 18	0,25	0,75	8	48	12	52

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se, na Tabela 3 (acima), que as estimativas do tempo necessário para a manutenção corretiva geral são iguais as estimativas do tempo necessário para a manutenção preventiva geral acrescidas de 4 horas, que seria o tempo necessário para organizar os recursos necessários para a realização da manutenção. Nota-se, também, que a Prensa 2 tende a demandar mais tempo para a manutenção geral do que a Injetora 18.

Para a coleta de dados relativos à confiabilidade dos equipamentos, foi considerado um intervalo de tempo máximo de 624 horas, o que equivale a aproximadamente 1 mês de produção. Com base nesse tempo máximo, foram definidos como marcos temporais para análise: 104, 208, 312, 416, 520 e 624 horas de operação. Para cada marco temporal, buscou-se estimar a probabilidade acumulada de falha maior (que só pode ser revertida com a renovação do sistema), e a taxa média de incidência de falhas menores (que podem ser revertidas por meio de mínimo reparo). As respostas obtidas dos mantenedores foram consideradas separadamente, sendo obtidas duas respostas válidas por equipamento. Os resultados obtidos para a Prensa 2 são apresentados na Tabela 4 e os resultados obtidos para a Injetora 18 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Prensa 2

Idade (horas)	Mantenedor 1				Mantenedor 2			
	Probabilidade acumulada de falha maior (%)		Taxa de falhas menores (falhas menores por hora)		Probabilidade acumulada de falha maior (%)		Taxa de falhas menores (falhas menores por hora)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
104	15	20	0,1	0,15	20	30	0,1	0,2
208	25	35	0,15	0,2	40	50	0,2	0,3
312	30	45	0,3	0,35	60	70	0,3	0,4
416	40	55	0,45	0,5	80	90	0,4	0,5
520	60	80	0,6	0,65	95	99	0,5	0,6
624	85	95	0,7	0,75	99	99,99	0,6	0,7

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 - Injetora 18

Idade (horas)	Mantenedor 1				Mantenedor 2			
	Probabilidade acumulada de falha maior (%)		Taxa de falhas menores (falhas menores por hora)		Probabilidade acumulada de falha maior (%)		Taxa de falhas menores (falhas menores por hora)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
104	10	15	0,01	0,1	10	15	0,1	0,2
208	20	28	0,1	0,15	15	20	0,2	0,3
312	25	40	0,2	0,3	20	25	0,3	0,4
416	35	50	0,3	0,45	25	35	0,4	0,5
520	50	75	0,4	0,6	30	50	0,5	0,6
624	80	85	0,5	0,7	70	80	0,6	0,7

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos dados obtidos, pode-se concluir que o nível de dificuldade imposto pela Prensa 2 para a manutenção é maior, de modo que é factível esperar um nível mínimo de desempenho inferior ao nível mínimo esperado para a Injetora 18. Sendo assim, tendo como base somente a diferença de 7% no nível de disponibilidade, poderia ser injusto considerar a manutenção da Injetora 18 como superior à manutenção da Prensa 2. Então, os dados obtidos foram inseridos no sistema FAIR com o objetivo de se fazer a análise comparativa.

#### 4.4 APLICAÇÃO NO SISTEMA FAIR

O “FAIR – Sistema de Informação” é um software em fase de protótipo, apresentado como resultado da implementação do método apresentado no presente

trabalho. O software pode ser utilizado para comparar o desempenho relativo da manutenção de dois sistemas técnicos de cada vez. O logo e cabeçalho do sistema são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Logo e cabeçalho do sistema FAIR



**Sistema de Informação**

**Análise Comparativa do Desempenho Relativo da Manutenção de Sistemas Técnicos**

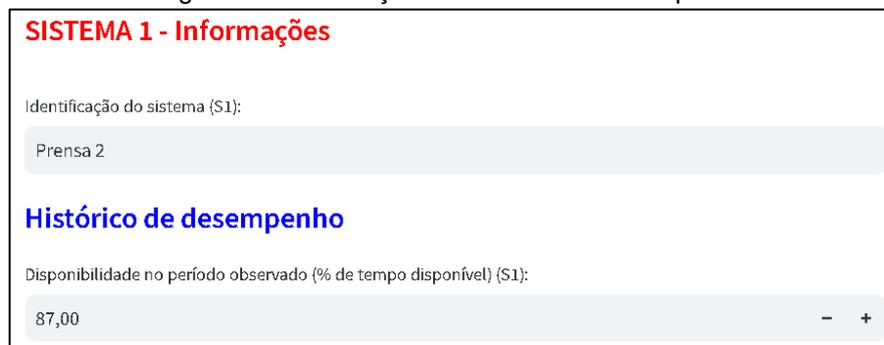
Insira as informações solicitadas nos campos abaixo

Email para envio dos resultados:

Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada sistema considerado na análise é solicitada a sua identificação e o histórico de desempenho em termos de disponibilidade, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Identificação e histórico de desempenho



**SISTEMA 1 - Informações**

Identificação do sistema {S1}:  
Prensa 2

**Histórico de desempenho**

Disponibilidade no período observado (% de tempo disponível) {S1}:  
87,00 - +

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, são solicitadas informações a respeito das estimativas do tempo de manutenção, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Estimativas do tempo de manutenção

<b>Tempo estimado de atividades de manutenção</b>		
Tempo médio para manutenção corretiva de falhas críticas (estimativa mínima em horas) (S1):		
31,00	-	+
Tempo médio para manutenção corretiva de falhas críticas (estimativa máxima em horas) (S1):		
55,00	-	+
Tempo médio para manutenção preventiva geral (estimativa mínima em horas) (S1):		
27,00	-	+
Tempo médio para manutenção preventiva geral (estimativa máxima em horas) (S1):		
51,00	-	+
Tempo médio para reparo pontual (estimativa mínima em horas) (S1):		
0,25	-	+
Tempo médio para reparo pontual (estimativa máxima em horas) (S1):		
1,75	-	+

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, devem ser inseridos os dados relativos à confiabilidade do sistema. Nessa etapa, é necessário informar o número de especialistas consultados, e preencher os dados relativos às respostas de cada especialista, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Dados relativos à confiabilidade do sistema

### Análise de Confiabilidade

Número de especialistas consultados (S1):

2

Medida de tempo para análise de confiabilidade (S1)

Hora ▼

#### Especialista 1

Marcos temporais de referência (S1.E1):

104, 208, 312, 416, 520, 624

Probabilidade acumulada de falha crítica (% mínimo) (S1.E1):

15, 25, 30, 40, 60, 85

Probabilidade acumulada de falha crítica (% máximo) (S1.E1):

20, 35, 45, 55, 80, 95

Taxa de falhas menores (mínimo) (S1.E1):

0.1, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.7

Taxa de falhas menores (máximo) (S1.E1):

0.15, 0.2, 0.35, 0.5, 0.65, 0.75

Fonte: Elaborado pelo autor

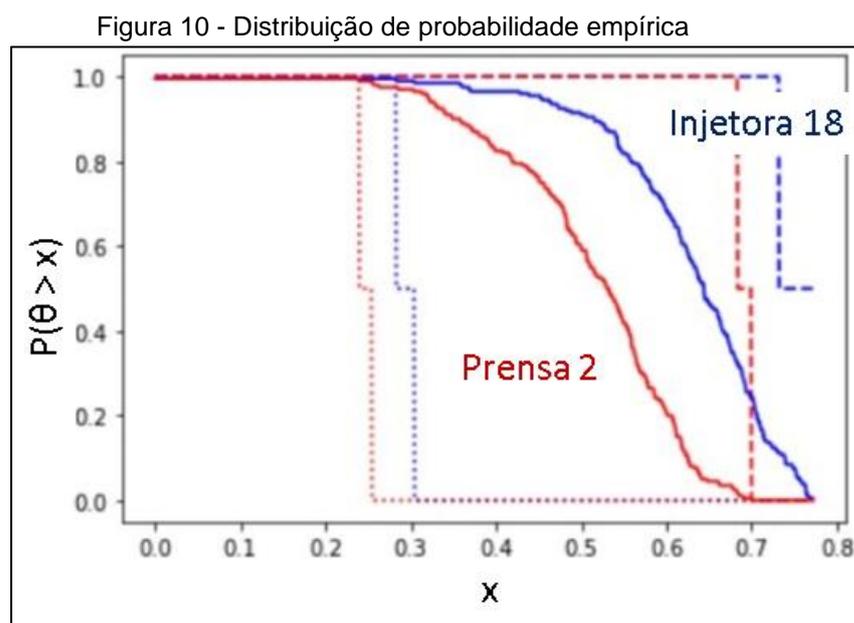
Uma vez inseridos os dados devidamente, o usuário pode clicar no botão “Análise Comparativa” e esperar pelo resultado. O processo pode levar algumas horas, devido ao esforço computacional requerido para fazer a análise com incertezas.

#### 4.5 RESULTADOS DA APLICAÇÃO

Uma vez feita a análise comparativa, o sistema FAIR informou que há uma probabilidade de 79,38% de a manutenção da Injetora 18 apresentar um desempenho relativo superior a manutenção da Prensa 2. Importante ressaltar que uma nova rodada da aplicação pode ter um resultado ligeiramente diferente, visto que o método possui um importante componente estocástico. Uma outra aplicação apresentou um resultado próximo: 81,58%, evidenciando a robustez do método. Essa análise dá uma evidência mais significativa para afirmar que a manutenção da Injetora 18 é superior, apesar de a probabilidade não ser superior a 90%, nível este que o gestor de

manutenção considera suficiente para incluir um sistema como *benchmarking* para outros.

O sistema FAIR também apresenta um gráfico com a distribuição de probabilidade empírica do valor do índice de desempenho relativo da manutenção para cada sistema, como apresentado na Figura 10.



Conforme apresentado na Figura 10 (acima), nos dois casos o Índice de Desempenho Relativo da Manutenção ( $\theta$ ) é superior a 0,2, o que indica que, em ambos os casos, a manutenção tem sido capaz de obter um desempenho superior ao mínimo esperado. Além disso, observa-se que a curva da distribuição de probabilidade do índice  $\theta$  para a Injetora 18 (em azul) se mantém consistentemente à direita da curva da distribuição relativa à Prensa 2 (em vermelho), o que corrobora com a hipótese de que a manutenção da primeira é superior à da segunda. Entretanto, como as regiões de valores possíveis de  $\theta$ , que são delimitadas pelas linhas tracejadas coloridas, se sobrepõem, não é possível afirmar com certeza que a manutenção da Injetora 18 tem melhor desempenho.

Para um maior poder de discriminação das melhores práticas de manutenção, recomenda-se observar os sistemas e a sua disponibilidade ao longo de um período de tempo maior. Como se trata de um indicador do tipo *lagging*, um maior *lag* viabiliza uma melhor análise.

#### 4.6 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

O software “FAIR – Sistema de Informação”, no qual o método proposto foi implementado, foi utilizado para comparar o desempenho relativo da manutenção em duas máquinas utilizadas em setores distintos da empresa: Prensa 2 e Injetora 18. A partir da análise realizada, identificou-se que a manutenção da Injetora 18 apresenta um desempenho relativo superior à manutenção da Prensa 2, com uma probabilidade estimada em 79,38%.

A partir do resultado obtido, a equipe responsável pela manutenção da Injetora 18 foi convidada a compartilhar suas práticas de manutenção, com o objetivo de melhorar a gestão da manutenção na Prensa 2. Práticas relacionadas ao planejamento de manutenção preventiva e gestão de estoques de sobressalentes foram colocadas em análise, para que os bons resultados possam ser reproduzidos. Espera-se uma melhoria da ordem de 5 a 10% no indicador de desempenho relativo da manutenção para a Prensa 2 (a diferença média no indicador de desempenho relativo da manutenção entre a Injetora 18 e a Prensa 2 é de 0,098), o que pode implicar em um ganho de disponibilidade de 2% para a Prensa 2. Entretanto, dada a natureza das atividades envolvidas na gestão da manutenção, será necessário aguardar um período de pelo menos um ano para se observar mudanças consistentes no indicador de desempenho.

O método foi incorporado a rotina de avaliação de desempenho da manutenção, com o objetivo de estabelecer um *benchmarking* interno para a gestão da manutenção. Espera-se que, assim, a empresa seja capaz de conduzir políticas melhores para incentivo a bons resultados na gestão da manutenção.

## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi proposto um indicador para análise do desempenho relativo da manutenção de sistemas técnicos. Este indicador foi desenvolvido com o objetivo de viabilizar uma análise comparativa do desempenho da manutenção, em termos justos, mesmo considerando contextos distintos. Então, considerou-se como princípio básico que, para cada sistema técnico, é possível estabelecer um nível mínimo esperado de desempenho, e com base na comparação com este obtêm-se uma métrica de desempenho relativo, passível de comparação. O desempenho, no âmbito deste trabalho, é avaliado em termos de disponibilidade do sistema.

Uma vez proposto o indicador, foram identificados desafios para a sua utilização na prática. Os principais desafios estão relacionados à incerteza e a dificuldades na obtenção de dados para análise da confiabilidade dos sistemas. A fim de superar tais desafios, foi proposto um *framework* que envolve a coleta de dados por meio da elicitación do conhecimento de especialistas e um método para tratamento de incertezas. O *framework* foi implementado em um software, nomeado “FAIR – Sistema de Informação”, com o objetivo de facilitar a aplicação do método por parte de gestores de manutenção.

Um estudo de caso foi conduzido, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do método na realidade prática. O desempenho relativo da manutenção de duas máquinas distintas, sendo uma injetora de plástico e uma prensa, foi avaliado, sendo o sistema capaz de apontar a manutenção da primeira como superior, podendo servir como uma referência de boas práticas. O resultado obtido está em consonância com o esperado pelo gestor da área. Assim, foi demonstrado o potencial de aplicação do indicador e método de análise proposto no presente trabalho.

Entre as principais dificuldades, destaca-se a dificuldade encontrada no processo de coleta de dados por elicitación do conhecimento de especialistas. Assim, para trabalhos futuros, sugere-se o aperfeiçoamento do sistema a fim melhorar este aspecto do processo.

Entre as limitações, destaca-se que o software desenvolvido permite a comparação do desempenho de somente dois sistemas por vez, e exige um elevado tempo de processamento (algo na ordem de horas) para a obtenção de resultados. Assim, para trabalhos futuros, sugere-se o aperfeiçoamento do sistema para viabilizar uma análise mais abrangente e em menos tempo.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTI, A.R.; NEVES, B.P. A framework for evaluation and fair comparison of the performance of maintenance teams. In: 12th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR), 2023, Nottingham. 12th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR) Abstract Book, 2023.
- ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, R. J. P.; CAVALCANTE, C. A. V. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 1, p. 1–23, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462/1994**: Confiabilidade e Mantenabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BAKRI, A.; ALKBIR, M. F. M.; AWANG, N. et al. Addressing the Issues of Maintenance Management in SMEs: Towards Sustainable and Lean Maintenance Approach. **Emerging Science Journal**, v. 5, n. 4, p. 367-379, 2021.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Estatísticas**. 2020. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/estatisticas/>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- DING, S. H.; KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization - literature review and directions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, p. 1263–1283, 2015.
- FISHMAN, G. S. **Monte Carlo**: Concepts, Algorithms and Applications. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1995.
- JONGE, B.; SCARF, P. A. A review on maintenance optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 285, n. 3, p. 805-824, 2020.
- LOFSTEN, H. Measuring maintenance performance in search for a maintenance productivity index. **International Journal of Production Economics**, v. 63, n. 1, p. 47–58, 2002.
- MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive Maintenance**. 2. ed. Butterworth-Heinemann: Woburn, 2002.
- MORRIS, D. E.; OAKLEY, J. E.; CROWE, J. A. A web-based tool for eliciting probability distributions from experts. **Environmental Modelling & Software**, v. 52, p. 1-4, 2014.
- MUCHIRI, P.; PINTELON, L.; GELDERS, L.; et al. Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. **International Journal of Production Economics**, v. 131, p. 295-302, 2011.
- MUCHIRI, P. et al. Empirical analysis of maintenance performance measurement in Belgian industries. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 20, p. 5905-5924, 2010.

NEELY, A.; GREGORY, M.; PLATTS, K. Performance measurement system design: A literature review and research agenda. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 12, p. 1228-1263, 2005.

NEVES, B.P.; ALBERTI, A.R. Indicador de desempenho relativo da manutenção: *implementação de um sistema para comparação justa do desempenho de equipes de manutenção atuando em diferentes condições*. In: INnovation for Systems Information and Decision meeting 2022, 2022. INSID 202 Proceedings, 2022.

PARIDA, A.; CHATTOPADHYAY, G. Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement (MPM). **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 13, n. 3, p. 241-258, 2007.

PARIDA, A.; KUMAR, U.; GALAR, D. et al. Performance measurement and management for maintenance: a literatura review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 21, n. 1, p. 2-33, 2015.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. 8. Ed. Harlow: Pearson, 2016.

VAN HORENBEEK, A.; PINTELON, L. Development of a maintenance performance measurement framework—using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicator selection. **Omega**, v. 42, p. 33-46, 2014.

WIREMAN, T. **Developing performance indicators for managing maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2005.