



Amanda Fátima Ferreira e Sousa

Otimização da Periodicidade de Manutenção Preventiva de Ativos Ferroviários

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto

Rio de Janeiro
abril de 2023



Amanda Fátima Ferreira e Sousa

**Otimização da Periodicidade de Manutenção
Preventiva de Ativos Ferroviários**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Rafael Martinelli Pinto

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Orivalde Soares da Silva Júnior

IME

Prof. Marcos Costa Roboredo

UFF

Rio de Janeiro, 05 de abril de 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Amanda Fátima Ferreira e Sousa

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora e possui especialização em Análise de Dados. Trabalha na área de pesquisa visando identificar métodos para otimização da periodicidade de manutenções preventivas de ativos ferroviários.

Ficha Catalográfica

Sousa, Amanda Fátima Ferreira e

Otimização da Periodicidade de Manutenção Preventiva de Ativos Ferroviários / Amanda Fátima Ferreira e Sousa; orientador: Rafael Martinelli Pinto. – 2023.

61 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Pesquisa Operacional – Teses. 3. Manutenção Preventiva. 4. Otimização Discreta. 5. Planejamento Ferroviário. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

A Deus por toda força e perseverança concedida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador, professor Rafael Martinelli, pela orientação, paciência e colaboração na realização deste trabalho.

Ao CNPq e PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

Aos professores do Departamento de Engenharia Industrial que participaram da minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Sousa, Amanda Fátima Ferreira e; Pinto, Rafael Martinelli. **Otimização da Periodicidade de Manutenção Preventiva de Ativos Ferroviários**. Rio de Janeiro, 2023. 61p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A manutenção tem relevante participação estratégica em uma companhia, fundamental para o sucesso das organizações, a atuação deste setor envolve a redução do tempo de máquinas paradas, contribuindo com a eficiência do processo e diminuição dos custos operacionais. A intervenção preventiva é um importante tipo de manutenção, seu propósito é diminuir as falhas fundamentada em um planejamento com intervalos definidos de tempo, no entanto, determinar o melhor período não é uma atividade trivial. O intuito deste trabalho é utilizar dos conceitos de programação matemática para formular um modelo que auxilie na definição de um cronograma de manutenção preventiva, visando encontrar o melhor intervalo de tempo para intervenção na máquina baseado em informações de custos, tempo de atendimento e capacidade de mão de obra. O modelo matemático foi aplicado ao ambiente ferroviário com a finalidade de certificar a viabilidade de utilização dos métodos de Pesquisa Operacional, os resultados obtidos comprovaram se tratar de uma boa ferramenta para aplicação. Frente ao modelo atual, o cronograma de manutenção preventiva desenvolvido neste trabalho proporcionou uma economia de 40% para a companhia, além do aumento médio de 30% de disponibilidade a cada trimestre das máquinas de modelo Socadora.

Palavras-chave

Manutenção Preventiva; Otimização Discreta; Planejamento Ferroviário.

Abstract

Sousa, Amanda Fátima Ferreira e; Pinto, Rafael Martinelli (Advisor). **Optimization of the Periodicity of Preventive Maintenance of Railway Assets**. Rio de Janeiro, 2023. 61p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Maintenance has a relevant strategic role in a company, fundamental to the success of organizations, the performance of this sector involves reducing the time of machine downtime, contributing to the efficiency of the process and reduction of operating costs. Preventive intervention is an important type of maintenance, its purpose is to reduce failures based on planning with defined time intervals, however, determining the best period is not a trivial activity. The purpose of this work is to use mathematical programming concepts to formulate a model that helps define a preventive maintenance schedule, aiming to find the best time interval for machine intervention based on cost information, service time and hand capacity. of work. The mathematical model was applied to the railway environment in order to certify the feasibility of using Operational Research methods, the results obtained proved to be a good tool for application. Compared to the current model, the preventive maintenance schedule developed in this work provided savings of 40% for the company, in addition to an average increase of 30% in availability each quarter of Socadora model machines.

Keywords

Preventive Maintenance; Discrete Optimization; Railway Planning.

Sumário

1	Introdução	11
2	Revisão da Literatura	14
2.1	Importância da Manutenção	14
2.2	Tipos de Manutenção	15
2.2.1	Manutenção Corretiva	15
2.2.2	Manutenção Preventiva	16
2.2.3	Manutenção Preditiva	17
2.2.4	Manutenção Detectiva	18
2.3	Objetivos da Manutenção	19
2.4	Custos da Manutenção	20
2.5	Confiabilidade e Disponibilidade	22
2.6	Manutenção Centrada em Confiabilidade	23
2.7	A Manutenção associada à Pesquisa Operacional	24
3	Metodologia	27
4	Aplicação da Metodologia	30
4.1	Empresa	30
4.2	Equipamentos de Manutenção da Malha Ferroviária	30
4.3	Grupo de Máquinas Socadora	33
4.4	Definição e Coleta de Dados	37
4.5	Resultados e Discussões	42
4.6	Análise de Sensibilidade	48
5	Conclusão	50
A	Código-fonte	52

Lista de Figuras

Figura 2.1	Pilares da gestão de ativos (DUARTE, 2018)	15
Figura 2.2	Interação da manutenção com outras áreas numa organização (KOBACZY et al., 2008)	16
Figura 2.3	Evolução da manutenção (MORAES, 2019)	17
Figura 2.4	Custos diretos e indiretos da manutenção (CABRAL, 2009)	20
Figura 2.5	Lei de Sitter (SITTER, 1984)	21
Figura 2.6	Relação entre a confiabilidade e a probabilidade de falhas (SILVEIRA, 2022)	22
Figura 4.1	Defeitos na linha ferroviária (PLASSER, 2018)	33
Figura 4.2	Estrutura de uma Socadora (PLASSER, 2018)	34
Figura 4.3	Tecnologia da socaria (PLASSER, 2018)	35
Figura 4.4	Disponibilidade real vs. Disponibilidade ajustada	47
Figura 4.5	Relação entre os custos de manutenção e a capacidade de mão de obra	49

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Ativos responsáveis pela manutenção da malha ferroviária	32
Tabela 4.2	Informações dos itens críticos para máquinas de modelo Socadora	36
Tabela 4.3	Probabilidade de falhas corretivas nos componentes críticos a cada mês	38
Tabela 4.4	Probabilidade de falhas corretivas nos componentes críticos a cada 2 meses	38
Tabela 4.5	Probabilidade de falhas corretivas nos componentes críticos a cada 3 meses	38
Tabela 4.6	Custos associados à manutenção para os seis itens críticos das doze Socadoras considerando a periodicidade de manutenção preventiva mensal	42
Tabela 4.7	Custos associados à manutenção para os seis itens críticos das doze Socadoras considerando a periodicidade de manutenção preventiva bimestral	43
Tabela 4.8	Custos associados à manutenção para os seis itens críticos das doze Socadoras considerando a periodicidade de manutenção preventiva trimestral	43
Tabela 4.9	Periodicidades definidas de acordo com o item de cada máquina	43
Tabela 4.10	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 1	44
Tabela 4.11	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 2	44
Tabela 4.12	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 3	44
Tabela 4.13	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 4	44
Tabela 4.14	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 5	45
Tabela 4.15	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 6	45
Tabela 4.16	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 7	45
Tabela 4.17	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 8	45
Tabela 4.18	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 9	46
Tabela 4.19	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 10	46
Tabela 4.20	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 11	46
Tabela 4.21	Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 12	46

Lista de Abreviaturas

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade

1 Introdução

As empresas têm como principal desafio consolidarem-se no mercado com alto desempenho competitivo, para isso é necessário que seus serviços sejam realizados com qualidade e eficiência, visando reduzir ao máximo o número de falhas e as paradas emergenciais (SANTOS e OTHERS, 2022).

Há algum tempo o setor da manutenção deixou de ser um apoio aos processos produtivos e tornou-se parte estratégica das empresas, atuando na confiabilidade, disponibilidade, segurança e priorização de menores custos (DE SOUZA et al., 2022).

A manutenção é um conjunto de cuidados técnicos substanciais ao funcionamento regular e constante de máquinas, equipamentos, ferramentas e instalações, suas atividades são fatores determinantes no mercado competitivo, uma vez que o sucesso de uma organização está associado à boa condição dos seus ativos para operar (SILVA NETO, 2014).

Um dos mais conhecidos e importantes tipos de manutenção é a preventiva, investir neste modelo de intervenção é uma pertinente estratégia para garantir a eficiência dos equipamentos.

A manutenção preventiva apresenta grande representatividade no funcionamento absoluto da capacidade produtiva de uma organização, pois busca manter o desempenho dos ativos em condições originais aos de fábrica baseado em intervenções com intervalos definidos de tempo (DA ROSA et al., 2020).

A viabilização em executar a intervenção programada decorre de um planejamento periódico adequado, é a coerência da periodicidade nas manutenções que permite com que a empresa aumente a disponibilidade das máquinas além de assegurar custos equilibrados (RUSCHEL et al., 2017).

Sabe-se que a vida útil dos componentes pode ser apontada previamente por meio de histórico de falha, recomendação de fabricante, entre outras técnicas, no entanto, mesmo quando se considera a informação do término da vida útil, é complexo identificar o instante ótimo para realização da intervenção.

Baseado nessa condição é sugerido neste trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie na gestão de manutenção preventiva otimizada ao negócio.

Através do uso de Pesquisa Operacional é possível determinar o intervalo ótimo da manutenção preventiva, esta área de conhecimento é usada para construir modelos matemáticos conforme comportamento do sistema real com o intuito de atingir o máximo desempenho (MONTEIRO, 2016). A utilização da ferramenta está ganhando cada vez mais destaque, contribuindo com melhorias significativas em diferentes processos.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático para otimizar a periodicidade de execução dos planos de manutenção preventiva de ativos baseado nos tempos das intervenções preventiva e corretiva, custos incorporados ao processo e capacidade de mão de obra.

O modelo matemático proposto será aplicado ao ambiente logístico ferroviário, que apresenta impacto relevante na economia. A utilização de trens para viabilizar que os produtos adquiridos sejam entregues aos clientes é significativo, o transporte ferroviário permite encurtar longas distâncias e transportar grande quantidade de mercadorias com agilidade.

De acordo com a ANTF (2022) o setor ferroviário está em ascensão, comparando o ano de 2020 com o ano de 1997, época do início das concessões, houve o aumento do volume transportado em 93%, correspondente a um crescimento anual médio de 2,9%.

O pleno funcionamento de uma ferrovia depende de diversos fatores, a manutenção é um dos mais importantes. Muito se fala sobre os benefícios em implementar o transporte ferroviário, maior segurança, mais velocidade, sustentabilidade, menor custo, entre outros, mas é essencial lembrar que assim como todo processo o setor demanda cuidados.

Um dos maiores problemas que interfere no desempenho da logística ferroviária é a deterioração das linhas, os trilhos são muito usados durante a passagem dos trens e acabam sofrendo com o desgaste em função do uso e do tempo.

A correção dos trilhos da linha ferroviária conta com a utilização de máquinas próprias que atuam no alinhamento, nivelamento, regulação e esmerilhamento dos trilhos, entre outras funções. Estes equipamentos são primordiais no processo de manutenção da ferrovia e é imprescindível que estejam disponíveis para realização de suas atividades de manutenção de maneira confiável ao menor custo.

O trabalho tratará especificamente do grupo de máquinas Socadora, um dos principais e mais completos equipamentos responsáveis pela manutenção da via, o intuito é avaliar a confiabilidade destas máquinas buscando mantê-las operacionais para garantir a integridade do fluxo ferroviário, uma vez que estas máquinas são essenciais por manter a boa condição do principal recurso

da ferrovia, os trilhos.

Este documento está organizado da seguinte forma: o conteúdo é iniciado no Capítulo 1 com a introdução do estudo e posteriormente é realizada a revisão da literatura no Capítulo 2, que conta com diferentes referenciais bibliográficos visando elucidar o tema do trabalho, na sequência, Capítulo 3, é feita a descrição do problema e detalhado o modelo matemático, o Capítulo 4 contempla a aplicação do modelo matemático na ferrovia e para finalizar, Capítulo 5, o trabalho é concluído mediante os resultados obtidos.

2

Revisão da Literatura

Este capítulo apresenta o referencial bibliográfico visando acerrar o conhecimento que esteja diretamente envolvido na otimização da periodicidade de manutenções preventivas.

2.1

Importância da Manutenção

A manutenção é extremamente relevante para as empresas, seu intuito é manter as máquinas trabalhando, gerenciar os recursos e eliminar os defeitos dos ativos (WIREMAN, 2005). As atividades do setor visam a permanência dos equipamentos operando o mais próximo permitido de suas condições originais (SOUZA, 2013), as máquinas devem apresentar alta disponibilidade para que possam ser consideradas rentáveis (MIRSHAWKA, 1993).

ESPINOSA FUENTES e OTHERS (2006) afirmam que as ações de manutenção são usadas para supervisionar as falhas e restabelecer o equipamento conforme seu estado operacional. Uma das principais decisões na manutenção é definir os itens a serem submetidos à intervenção, o escopo de manutenção a ser realizado e o momento em que essas ações devem ser feitas.

Uma gestão de ativos eficiente é aquela que conhece com detalhe a conjuntura organizacional em que o equipamento está inserido, apenas dessa maneira é factível definir estratégias que atendem aos objetivos individuais dos ativos baseado nos princípios gerais da organização (SHAHIDEHPOUR e FERRERO, 2005).

Faz parte das atividades de manutenção assegurar que ao longo de todo o ciclo da vida dos ativos, haja a minimização de custos, maximização do desempenho e minimização do risco, seja em caráter econômico, social e/ou ambiental (COUTINHO, 2017).

A Figura 2.1 representa os três pilares correspondentes à finalidade da gestão de ativos (DUARTE, 2018).

Realizar reparações e recondiçionamentos para compensar a deterioração ou perda de função das máquinas, materiais ou seus elementos protetores, está intimamente relacionado com as demais áreas de uma empresa. A manutenção integra um contexto de negócios para o qual contribui a partir de interações



Figura 2.1: Pilares da gestão de ativos (DUARTE, 2018)

estabelecidas com outros setores da organização, a Figura 2.2 expressa este cenário (CABRAL, 2009).

Gerir a manutenção é um dos mais importantes aspectos que influencia no crescimento de uma empresa, a ausência das tarefas deste setor pode acarretar em um dia de produção prejudicada, perda de matéria prima ou até mesmo sucateamento da máquina (MOUTA, 2011).

As estratégias das organizações estão vinculadas fortemente à área da manutenção, o setor impacta diretamente nos resultados operacionais e como consequência na rentabilidade, portanto apresentar práticas de manutenção mais eficazes diz respeito a melhores resultados (SOUZA, 2017).

2.2

Tipos de Manutenção

Em decorrência de tamanha proporção, diferentes modelos de manutenção foram surgindo ao longo do tempo, a Figura 2.3 aborda a evolução deste setor correlacionado às diferentes técnicas de intervenção.

Os tópicos a seguir abordam de forma detalhada os principais tipos de manutenção, neste trabalho o foco está direcionado para as manutenções corretiva e preventiva.

2.2.1

Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é caracterizada por permitir que os equipamentos operem até que haja a quebra (SLACK et al., 2002), esta intervenção possui maior impacto financeiro uma vez que a inatividade do equipamento durante sua recuperação deixa de gerar ganho para a organização (BELTRAME et al., 2020).



Figura 2.2: Interação da manutenção com outras áreas numa organização (KOBACY et al., 2008)

De forma concisa, a manutenção corretiva consiste em uma intervenção não planejada que ocorre de forma aleatória, é um tipo primitivo de manutenção que se baseia simplesmente na correção de uma falha, trata-se de uma atuação emergencial (FREITAS, 2016).

Esse tipo de intervenção não apresenta muitas vantagens, a não ser para equipamentos com baixo índice de criticidade, em que os consertos podem ser feitos após o ocasionamento da falha (OLIVEIRA, 2019).

2.2.2 Manutenção Preventiva

Definir todas as atividades durante o processo produtivo é muito importante para a organização, interromper a produção para realizar manutenção causa diferentes problemas, como atrasos no cronograma, máquina indisponível e a elevação dos custos. Por este motivo torna-se imprescindível o planejamento e a programação das intervenções, a realização de paradas apenas quando há uma programação predefinida consiste na principal característica da manutenção preventiva (MORO, 2007).

Baseada em critérios destinados a reduzir a possibilidade de falhas, a manutenção preventiva é executada em um intervalo predeterminado e consiste em procedimentos, ações, atividades ou diretrizes utilizadas para evitar manutenção corretiva. Intervir preventivamente envolve planejamento, programação, controle, organização e administração, trata-se de um trabalho

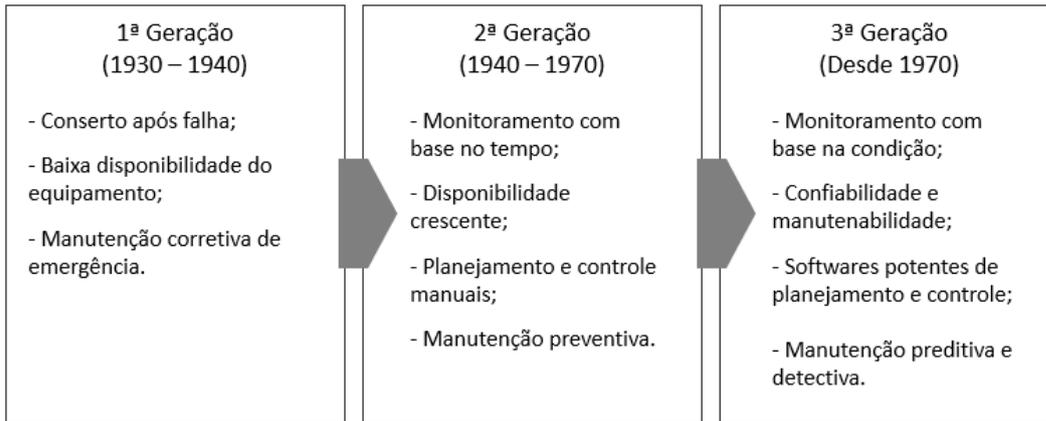


Figura 2.3: Evolução da manutenção (MORAES, 2019)

de precaução que permite a redução de paradas e o aumento do rendimento dos equipamentos em funcionamento. Esse tipo de manutenção é realizado a partir de análises estatísticas voltadas para o estado do equipamento, o local das instalações, as condições elétricas e as orientações do fabricante (SANTOS, 2009).

XAVIER (2021) reforça que a manutenção preventiva visa reduzir as falhas ou queda no desempenho do equipamento baseando em um planejamento com intervalos definidos de tempo, ALMEIDA (2000) indica que um dos principais desafios deste tipo de manutenção é a estipulação dos prazos estatísticos.

Em muitas empresas o período para execução da intervenção programada é determinado intuitivamente, sem utilizar uma estrutura lógica de análise. Balizar a periodicidade que melhor permite maximizar o tempo de vida útil de um equipamento não é uma atividade fácil, a grande maioria dos planejamentos de intervenção preventiva desaproveitam recursos, seja pela realização frequente de tarefas ou a falta de execução delas (PINTO, 2002).

Otimizar a periodicidade das inspeções é premissa básica para o sucesso da manutenção preventiva em uma empresa, correspondente ao aumento de durabilidade do equipamento e seu melhor desempenho operacional (CARVALHO et al., 2019).

2.2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva corresponde a um conjunto de atividades para acompanhar máquinas e equipamentos com a função de medir o desempenho dos mesmos e apontar quando será necessário intervir em seus processos. Seu objetivo é realizar ajustes necessários no tempo ideal, para não permitir sua

quebra ou falha (OTANI e MACHADO, 2008).

CARVALHO et al. (2019) reforça que a manutenção preditiva é executada através de técnicas de análise centralizadas, como o monitoramento e rendimento do sistema, buscando reduzir ao máximo manutenções preventiva e corretiva. O critério desta intervenção é evitar excessivos e antecipados reparos, além de falhas inesperadas, prezando pela melhoria econômica a partir de ciclos de manutenção otimizados.

Existem oito metas relacionadas à manutenção preditiva conforme TAKAHASHI e OSADA (1993):

- Definir o período ideal para manutenção;
- Diminuir a quantidade de trabalho de manutenção preventiva;
- Minimizar avarias abruptas e estreitar o trabalho de manutenção não planejado;
- Tornar a vida útil das máquinas, peças e componentes crescente;
- Aprimorar a taxa de operação eficaz do equipamento;
- Diminuir os custos de manutenção;
- Melhorar a qualidade do produto;
- Aperfeiçoar o nível de precisão da manutenção do equipamento.

Um dos principais aspectos dessa área da manutenção é maximizar o tempo de funcionamento do equipamento e a rentabilidade do processo (Martins, 2022). Atualmente estão sendo desenvolvidas técnicas de aprendizagem para apoiar a execução da manutenção preditiva, assim como mostra o trabalho de Alonso (2023), ele busca através de dados operacionais e registros de alarmes de uma usina de biogás, desenvolver um modelo de machine learning utilizando noções de redes neurais para o auxílio da manutenção preditiva em plantas de geração de energia elétrica.

2.2.4

Manutenção Detectiva

O termo manutenção detectiva decorre da palavra detectar, sua função é buscar falhas ocultas e que não são perceptíveis a operação. O intuito desta manutenção é aumentar a confiabilidade dos equipamentos através de sistemas de proteção (SOUZA e OTHERS, 2008).

Segundo KARDEC e NASCIF (2009), os sistemas de proteção são projetados para atuar de forma automática em processos críticos que possam comprometer os equipamentos ou a produção.

Parte-se do pensamento que o erro humano é inevitável e por isso é preciso de alertas para sinalizar operações inconformes. Para isso são usados dispositivos como sensores, interruptores, gabaritos, contadores digitais e listas de verificação (SLACK et al., 2002).

Oliveira (2022) apresenta o protótipo de um sistema de monitoramento contínuo por meio de IoT, a finalidade é obter parâmetros de vibração mecânica, condições ambientais, temperatura de óleo e aquecimento do bloco de um compressor em tempo real.

de Miranda Viana et al. (2022) também utiliza da tecnologia de IoT para acompanhar as escadas rolantes nas estações da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, o monitoramento é feito por meio de sensores que permitem detectar em tempo real interrupções de funcionamento, contribuindo para uma rápida atuação das equipes de manutenção.

2.3

Objetivos da Manutenção

De um modo geral os equipamentos estão sujeitos à degradação, consequência do seu funcionamento e de seu desgaste no decorrer do tempo (ANDRADE, 2012).

O intuito das atividades de manutenção é manter as máquinas em boas condições de uso, garantindo sua confiabilidade e disponibilidade. SLACK et al. (2009) menciona alguns dos objetivos desta área:

- Redução de custos: executar a manutenção preventiva diminui defeitos inesperados do sistema, assegurando menos ações corretivas, cuja despesa apresenta valor extremamente elevado;
- Maior Qualidade de produtos: máquinas em condição perfeita de funcionamento garantem a qualidade dos produtos e serviços finais;
- Maior segurança: setor produtivo limpo e em bom estado de operação acarreta em maior segurança e confiança dos trabalhadores;
- Melhor ambiente de trabalho: local de trabalho limpo, seguro e organizado elevam o nível de dedicação dos funcionários;
- Desenvolvimento profissional: o setor da manutenção propicia desenvolvimentos de novas habilidades e também crescimento profissional aos trabalhadores pelo seu envolvimento direto nas decisões da empresa;
- Maior vida útil dos equipamentos: as atividades de manutenção tem como finalidade aumentar a vida útil dos equipamentos, através de ações de prevenção e melhorias nos equipamentos;

- Maior confiabilidade dos equipamentos: máquinas bem cuidadas apresentam maior disponibilidade para produzir, seus intervalos de tempo são maiores de uma falha para outra;
- Instalações da produção com maior valorização: espaços de trabalho em boas condições têm maior valor de mercado;
- Maior poder de investimento: a redução de custos obtida a partir de ações preventivas de manutenção, se relacionam diretamente com o aumento de investimentos, proporcionando vantagens aos acionistas, os funcionários e a comunidade como um todo;
- Preservação do meio ambiente: o bom regulamento dos equipamentos leva a economia de recursos naturais e redução dos impactos ambientais.

2.4

Custos da Manutenção

São elevados os custos com a manutenção em função de perdas, falhas, depreciação do estoque e atrasos, diante disso ao longo do tempo diferentes métodos e técnicas surgiram com o intuito de tornar equilibrado as despesas com as intervenções, buscando apreciável custo benefício entre manutenção e lucro (XENOS, 1998).

Os custos de manutenção se dividem em gastos diretos e indiretos, conforme exibido na Figura 2.4. Os custos diretos englobam as despesas com as atividades de manutenção, materiais e peças de reserva, gastos com o serviço executado e o custo do equipamento parado para a companhia. Por outro lado, os custos indiretos decorrem das consequências da falha ocorrida, a perda de receita envolve atrasos na produção, eventuais acidentes, encargos com seguradoras, entre outros (CABRAL, 2009).

Custos diretos		
Materiais e energia consumida	Peças reserva	Equipamento parado

Custos indiretos		
Atrasos na produção	Possíveis acidentes	Encargos com seguradoras

Figura 2.4: Custos diretos e indiretos da manutenção (CABRAL, 2009)

As técnicas corretivas e preventivas estão intimamente associadas aos custos de manutenção. Na intervenção não planejada, denominada corretiva, não há tempo suficiente para a preparação do serviço imediato, acarretando elevados gastos, pois a quebra inesperada além de gerar perdas implica no atraso da produção. Já a manutenção programada, também conhecida como preventiva, busca de forma sistêmica métodos para evitar o acontecimento de falhas, estabelecendo um plano oportuno para atuação nos equipamentos, o que resguarda a empresa de qualquer imprevisto (COSTA, 2013).

OLIVATTO (2012) reforça através da Lei de Sitter, ilustrada na Figura 2.5, o aumento exponencial do custo da intervenção baseado no início da ação, a manutenção corretiva corresponde ao maior custo.

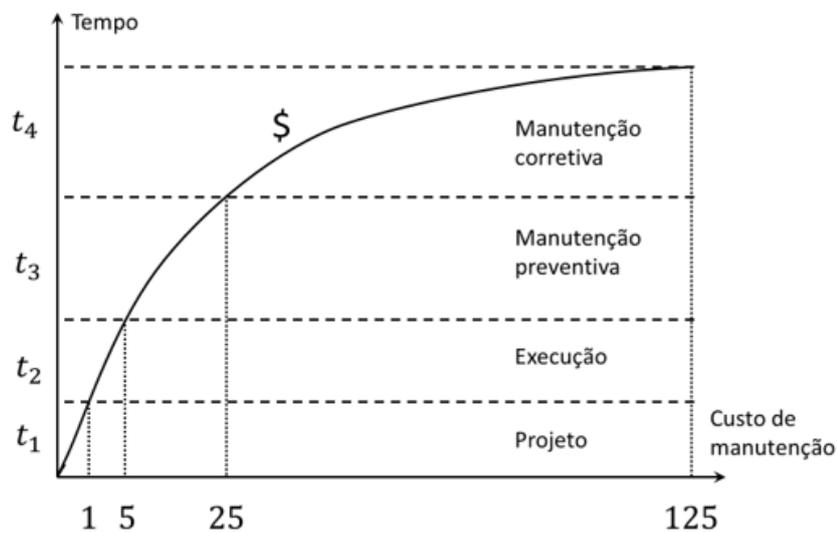


Figura 2.5: Lei de Sitter (SITTER, 1984)

A postergação de uma manutenção aumenta a possibilidade do equipamento ficar por mais tempo indisponível para operar e acarreta na elevação dos custos diretos, à medida que se prolonga a correção do item agrava o estado de degradação e acelera o fim da vida útil, que por consequência ocasiona maiores gastos no momento da intervenção (MUDUC, 2021).

O equilíbrio entre os custos diretos e indiretos deve ser encontrado pelas equipes responsáveis por gerir a manutenção, o intuito é identificar o percentual de intervenções preventivas e corretivas a serem realizadas de modo a identificar o cenário ótimo para a empresa, uma vez que estes tipos de manutenções têm impacto relevante nos custos (MARCORIN e LIMA, 2003).

Uma boa manutenção é aquela que realiza por um custo global mínimo a combinação entre tarefas de gestão, técnicas e econômicas, a serem aplicadas em bens ou equipamentos para otimização do seu ciclo de vida (PINTO, 2002).

2.5 Confiabilidade e Disponibilidade

O atendimento às demandas do mercado sugerem uma mudança na maneira de visualizar a função da manutenção. Se antes realizar uma atividade de manutenção para correção de algum equipamento era satisfatório, hoje o que se espera é que a manutenção seja eficaz, ou seja, a execução dos procedimentos devem evitar a necessidade de novas recuperações ou restaurações em um curto prazo de tempo, em resumo as máquinas devem ser confiáveis (LUCATELLI e OTHERS, 2002).

A confiabilidade é conceituada como a probabilidade de que uma máquina trabalhe corretamente e em bom estado, durante um período estabelecido ou de ainda estar em condições de operar após um determinado tempo de funcionamento. Ou seja, a aceitação de falhas durante o processo de trabalho do equipamento não é algo considerado ou mesmo esperado (SANTOS e OTHERS, 2022).

A Figura 2.6 ilustra as curvas de confiabilidade e de probabilidade de falhas, como pode ser visto tratam-se de medições inversamente proporcionais. A alta probabilidade do acontecimento de falhas acarreta em baixa confiabilidade na manutenção, para o caso contrário, o aumento de confiabilidade deduz na redução de falhas (ZAIIONS, 2003).

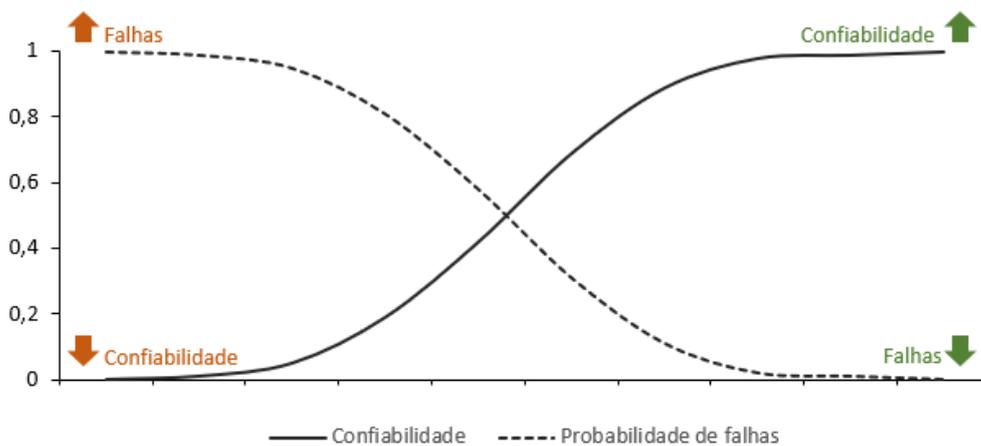


Figura 2.6: Relação entre a confiabilidade e a probabilidade de falhas (SILVEIRA, 2022)

Para melhor definir a estratégia de manutenção, é necessário que seja levado em consideração a probabilidade de falha do componente e sua confiabilidade ao longo do tempo, apenas desta maneira, os custos com a manutenção poderão ser analisados de forma real (VERZENHASSI, 2008).

Ações preventivas executadas de forma otimizada, ou seja, com periodicidades adequadas, resultam em maior confiabilidade, uma vez que devidamente estabelecidas e executadas, as rotinas da intervenção preventiva buscam manter os equipamentos em condições originais aos de fábrica, tornando-se uma das melhores alternativas para maximizar o aproveitamento do sistema e alcançar a confiabilidade (PASCHOAL et al., 2009).

O avanço da área de manutenção trouxe como requisito a confiabilidade dos equipamentos, essa estratégia visa evitar elevadas despesas durante a recuperação e manter a máquina disponível para operar num período definido de tempo. Paradas não planejadas geram gastos significativos para as empresas, pois envolvem atrasos na produção, despesas emergenciais e não programadas, além do custo da máquina parada, ou seja, ausência de disponibilidade para trabalhar (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Disponibilidade é a probabilidade de um equipamento estar disponível para ser utilizado em um determinado momento ou durante um certo período de tempo. Essa medida é uma maneira de avaliar a performance das máquinas reparadas, visando averiguar a confiabilidade e manutenção de um componente ou sistema (FABRO, 2003).

A confiabilidade e a disponibilidade se relacionam diretamente, buscar pela confiabilidade durante as atividades de manutenção leva à disponibilidade dos equipamentos para operar, estes fatores quando alcançados configuram uma excelente estratégia de manutenção (TELES, 2017).

2.6 Manutenção Centrada em Confiabilidade

A Manutenção Centrada em Confiabilidade, MCC, foi desenvolvida a partir da necessidade de reduzir os custos e assegurar a confiabilidade e a disponibilidade (DE SIQUEIRA, 2005).

Baseada em dados estatísticos das falhas, essa metodologia dimensiona a periodicidade, planos de manutenção preventiva e suas técnicas, inspeção, reparo, substituição ou modificação do projeto (CORRÊA e OTHERS, 2015).

A principal finalidade da Manutenção Centrada em Confiabilidade é diminuir os custos com a manutenção, priorizando as funções mais importantes do sistema e evitando ou removendo atividades que não são categoricamente necessárias. Ou seja, a MCC trata-se de uma política de manutenção estruturada para mapear as tarefas de manutenção imprescindíveis visando manter a confiabilidade e disponibilidade de um processo produtivo (RIGONE, 2009).

A Manutenção Centrada em Confiabilidade é uma filosofia americana que busca encontrar equipamentos críticos na conjuntura operacional e estruturar

planos de manutenção programada, de modo a evitar perdas de produtividade resultantes de avarias (YAVUZ et al., 2019).

Essa ferramenta de manutenção busca racionalizar e sistematizar a definição de ações propícias a serem adotadas no plano de manutenção, o intuito é criar rotinas de intervenção que preservem funções importantes dos sistemas e equipamentos (MOREIRA, 2010).

De acordo com TELES (2017), esse é um modelo de gestão que possibilita:

- Diminuir ou excluir a ocorrência de falhas com agilidade;
- Reduzir ou deletar potenciais causas de avaria;
- Diminuir ou eliminar a severidade de uma falha;
- Alterar os requisitos dos projetos para evitar indisponibilidade;
- Mapear falhas que possam ocorrer durante a produção;
- Aumentar a chance de detecção da falha em estágio inicial.

As máquinas são compostas por um número considerável de itens e acessórios, toda essa parcela tem possibilidade de falhar em determinado momento, contudo, algumas falhas apresentam consequências mais graves do que outras. Portanto, a estratégia de manutenção não deve estar orientada apenas para prevenção de falhas, mas primordialmente para bloquear ou minimizar as consequências dessas falhas (NUNES, 2001).

A MCC corresponde à junção de todas as manutenções, corretiva, preventiva, preditiva e detectiva, o que a torna uma excelente estratégia de manutenção quando realizada de forma adequada e otimizada. Esse sistema de gestão permite às empresas aumentar os rendimentos dos equipamentos e melhorar a confiabilidade (TELES, 2017).

Em termos de lucratividade, a Manutenção Centrada em Confiabilidade é uma das técnicas que absorve os maiores e melhores resultados financeiros e operacionais a longo e médio prazo (TELES, 2017).

2.7

A Manutenção associada à Pesquisa Operacional

As empresas buscam frequentemente por processos cada vez mais otimizados, eficientes e eficazes, maximizando ou minimizando os recursos disponíveis nas operações. A manutenção é uma das áreas apoiada por práticas de otimização que possibilita aprimorar sua execução e o uso dos equipamentos (LACHTERMACHER, 2016).

SANTOS e OTHERS (2022) sugere a Pesquisa Operacional como uma ferramenta para otimizar as tomadas de decisão no setor da manutenção

através da busca de intervalos de manutenção ótimos e do desenvolvimento de métodos que diminuem a ocorrência das falhas.

A Pesquisa Operacional contempla análises de recursos por meio de modelos matemáticos que são compostos por três elementos principais: função objetivo, variáveis de decisões e por fim parâmetros e restrições. A função objetivo é uma função matemática que representa a finalidade principal do problema, podendo ser de minimização ou maximização. As variáveis de decisões são as incógnitas que serão determinadas pela solução do modelo e podem ser classificadas como contínuas, discretas ou binárias. Os parâmetros são os valores fixos conhecidos do problema, como exemplo a capacidade. As restrições são as limitações do processo e afetam diretamente os valores das variáveis de decisões (FÁVERO, 2013).

Realizar a tomada de decisão no processo a partir de modelagem matemática tem como vantagem a definição clara das decisões, dado a facilidade de entendimento do conceito (LACHTERMACHER, 2016). A seguir são apresentados alguns trabalhos envolvendo Pesquisa Operacional no contexto da manutenção, para todos os casos a inserção da modelagem matemática originaram resultados satisfatórios de acordo com a necessidade indicada.

AZEVEDO (2007) desenvolveu um modelo de programação matemática para apoio às decisões relacionadas à programação da manutenção preventiva em linhas de produção, buscando minimizar a mão de obra empregada nestas atividades.

CHRISTER et al. (1998) estudou a otimização da periodicidade de manutenção preventiva através da taxa de falha dos equipamentos, aplicada na indústria de autopeças.

LEAL et al. (2006) realizaram uma análise de manutenção buscando otimizar o tempo de realização de manutenção preventiva de acordo com a taxa de falha dos equipamentos.

KOLUS et al. (2020) desenvolvem uma programação simultânea de atividades de produção e manutenção com o objetivo de minimizar o custo total de atraso esperado em uma única máquina.

VIANA et al. (2008) sugere que a programação da manutenção preventiva é um problema de otimização combinatória, o trabalho realizado por eles busca identificar as melhores datas para agendar a manutenção, minimizando os custos de interrupção na produção e quebra de maquinário.

DAMASCO et al. (2005) apresenta um estudo cujo objetivo é desenvolver uma modelagem matemática para o cálculo de disponibilidade de sistemas, em que são considerados fatores como: diferentes regimes de operação para os componentes do sistema, testes periódicos, manutenções preventivas e

corretivas, além da possibilidade de que as manutenções não retornem o componente a um estado tão bom quanto novo.

VIRGÍNIO CAVALCANTE et al. (2010) contemplou a modelagem matemática utilizando dos métodos multicritério e redes bayesianas para otimizar a utilização de técnicas de manutenção mais apropriadas a processos preventivos e corretivos.

KÜNZEL (2017) propôs um método para resolver um problema de manutenção pautado nas limitações de recursos e custos envolvidos, seu intuito era auxiliar na decisão de realizar a manutenção preventiva através da programação linear inteira.

BAKER (2010) desenvolveu uma modelagem matemática para determinar a melhor política de manutenção com aversão ao risco financeiro da empresa, visando identificar a estratégia de manutenção mais adequada para o momento.

LIMA et al. (2015) sugerem um modelo de programação matemática que seja capaz de propor um cronograma de manutenção preventiva que minimize os custos totais de manutenção e que, ainda assim, respeite as restrições de mão de obra impostas.

CORRÊA e DIAS (2016) criam um modelo de periodicidade dos planos de manutenção preventiva de ativos industriais por meio do estudo da vida útil dos sistemas, fundamentado pelo uso, tempo, condição e custos.

Para o estudo a ser realizado neste trabalho serão abordados os temas de confiabilidade, probabilidade de falhas, custos, capacidade de mão de obra e disponibilidade, todos estes assuntos estarão entrelaçados em uma modelagem matemática que tem como resultado um cronograma de manutenção preventiva dos itens críticos de um conjunto de máquinas, trazendo não apenas o cenário ótimo de custos da manutenção, mas também o momento ideal para execução das intervenções em cada equipamento.

3 Metodologia

Embora a utilização da manutenção preventiva permita a antecipação e correção de falhas antes da sua ocorrência, ela pode gerar custos e indisponibilidade para o processo de forma demasiada.

Determinar intervalos de manutenção preventiva maiores que o ideal acarreta na realização de ações corretivas em máquinas, ou seja, interrupções não planejadas que impactam no desempenho do processo produtivo e aumentam as despesas da empresa. Em contrapartida, definir intervalos preventivos em períodos menores que o essencial implica em paradas e substituições de peças desnecessárias, elevando o custo da intervenção.

A manutenção preventiva deve ser utilizada de forma estratégica, é necessário um planejamento robusto em que o principal desafio é encontrar a periodicidade ideal da intervenção no equipamento combinado à vida útil dos componentes instalados em máquina ao menor custo possível.

Neste trabalho busca-se reduzir os custos que estão associados à manutenção a partir de uma modelagem matemática que resulta no cronograma de intervenção preventiva ótimo de um conjunto de itens de um grupo de máquinas, considerando as restrições relacionadas à capacidade de mão de obra.

O modelo matemático desenvolvido foi inspirado no trabalho feito por LIMA et al. (2015), que contou com a criação de um cronograma de manutenção preventiva mensal com possibilidade de variar as periodicidades semanalmente para um grupo de componentes de forma fixada, ou seja, é um modelo único. O usuário não consegue definir conforme sua necessidade o horizonte de tempo para realização da manutenção, as periodicidades em que se é permitido realizar as intervenções e também não é possível inserir mais de um equipamento, condições essas flexibilizadas no modelo matemático apresentado neste estudo.

Os conjuntos do problema compreendem as máquinas (A), os itens (I), os meses (K) e as periodicidades (P). As máquinas se referem aos equipamentos que a empresa abrange, os itens contemplam os componentes críticos das máquinas, os meses fazem referência ao horizonte de tempo do cronograma de manutenção preventiva do equipamento e a periodicidade indica o intervalo de tempo para realização das manutenções em meses.

Este é um problema de programação inteira binária cujas variáveis recebem 1 caso o evento ocorra ou 0 se não acontecer. Neste modelo matemático duas variáveis são consideradas, $X_{a,i,k}$ representa o item i da máquina a realizando a manutenção no mês k e a variável $Y_{a,i,p}$ correspondente ao item i da máquina a realizando a manutenção com periodicidade p .

Os parâmetros do modelo estão detalhados a seguir:

- HC_k representa a capacidade de mão de obra em horas para a realização da manutenção preventiva em cada mês k ;
- $HD_{a,i}$ são as horas demandadas pelos itens i das máquinas a para a execução da manutenção preventiva;
- t_p corresponde aos meses k relacionados com as periodicidades p ;
- $C_{a,i,p}$ envolve o custo da decisão em realizar a manutenção preventiva do item i da máquina a na periodicidade p considerando todo o horizonte do tempo.

As Expressões (3-1)–(3-7) compõem o modelo matemático que visa auxiliar na elaboração de um cronograma de manutenção preventiva:

$$\text{Minimizar } \sum_{a \in A} \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} C_{a,i,p} Y_{a,i,p} \quad (3-1)$$

sujeito a:

$$\sum_{a \in A} \sum_{i \in I} HD_{a,i} X_{a,i,k} \leq HC_k \quad \forall k \in K \quad (3-2)$$

$$\sum_{p \in P} Y_{a,i,p} = 1 \quad \forall a \in A, i \in I \quad (3-3)$$

$$\sum_{k=1}^{t_p} X_{a,i,k} \geq Y_{a,i,p} \quad \forall a \in A, i \in I, p \in P \quad (3-4)$$

$$X_{a,i,k} \geq X_{a,i,k-t_p} - (1 - Y_{a,i,p}) \quad \forall a \in A, i \in I, p \in P, k \in \{t_p+1, \dots, |K|\} \quad (3-5)$$

$$X_{a,i,k} \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A, i \in I, k \in K \quad (3-6)$$

$$Y_{a,i,p} \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A, i \in I, p \in P \quad (3-7)$$

A Função Objetivo (3-1) busca minimizar os custos das manutenções preven-

tivas que estão baseados nas periodicidades considerando todo o horizonte de tempo. As demais expressões referem-se às restrições do problema, as Inequações (3-2) asseguram que para um mês não serão demandadas mais horas de manutenção preventiva do que foram definidas como capacidade; as Equações (3-3) definem que cada item de cada máquina deve receber uma periodicidade; as Restrições (3-4) indicam quais são os meses possíveis para iniciar a manutenção mediante a periodicidade; as Desigualdades (3-4) apontam os meses em que serão executadas as intervenções preventivas considerando todo horizonte de tempo de acordo com a periodicidade; por fim, as Restrições (3-6) e (3-7) definem os domínios aos quais as variáveis pertencem.

As expressões (3-4) e (3-5) são a base da modelagem matemática desenvolvida, elas se relacionam diretamente e são responsáveis por definir o cronograma de manutenção preventiva baseado nos valores de custo, capacidade, horizonte de tempo e periodicidades inseridos no modelo. A expressão (3-4) indica que o começo da manutenção deve acontecer nos meses iniciais do horizonte de tempo baseado na periodicidade definida pelo modelo, o intuito é que o período de manutenção não seja extrapolado, a exemplo, considerando a periodicidade de 2 meses a intervenção deve acontecer no primeiro ou segundo mês. Definido o início do ciclo de manutenção, a expressão (3-5) é responsável por determinar em quais meses no decorrer de todo horizonte de tempo haverá a execução da intervenção, nessa etapa é estabelecido o cronograma de manutenção baseado num cálculo parametrizado atrelado à periodicidade estabelecida.

Com o intuito de certificar a exequibilidade do modelo matemático desenvolvido, será realizado no Capítulo 4 uma aplicação do modelo voltado para equipamentos de uma empresa ferroviária que realiza transporte de cargas.

4

Aplicação da Metodologia

4.1

Empresa

A empresa estudada faz parte do segmento ferroviário, ela foi criada quando o governo transferiu à iniciativa privada a gestão do sistema ferroviário nacional. Nesse momento a companhia assumiu a concessão dos trechos do transporte ferroviário de cargas da antiga Estrada de Ferro Central do Brasil.

A malha ferroviária sob responsabilidade da empresa conecta os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, regiões mais desenvolvidas do país. São mais de 18 mil vagões e quase 800 locomotivas circulando nos trilhos da companhia, que tem se destacado pela renovação constante, desenvolvimento de novos ativos e níveis elevados de disponibilidade e confiabilidade.

A posição estratégica operacional da empresa permite que ela faça a ligação direta entre regiões produtoras de *commodities* minerais e agrícolas e alguns dos principais parques industriais do país aos maiores portos da região Sudeste. Dentre os principais produtos transportados pela empresa estão: minérios, produtos siderúrgicos acabados, cimento, bauxita, produtos agrícolas e containers.

Essa organização tem ocupado lugar de destaque no segmento de transporte ferroviário de carga, especialmente em função de seus índices expressivos de produtividade, o que, do ponto de vista comercial, são traduzidos em inúmeras vantagens competitivas.

4.2

Equipamentos de Manutenção da Malha Ferroviária

O movimento de ir e vir é o que transporta, que faz chegar e que entrega. Pelas ferrovias do país, o tráfego de trens de carga contribui no abastecimento, distribuição e movimentação da economia.

A efetivação do transporte pelas empresas ferroviárias está diretamente associada à boa condição dos trilhos, onde locomotivas e vagões circulam para realizar o fluxo logístico. É necessário que as estradas de ferro sejam bem

cuidadas para que o ciclo ferroviário seja cumprido, por este motivo é crucial realizar manutenções na malha férrea, o intuito é:

- Prevenir possíveis avarias;
- Diminuir paradas não planejadas durante o percurso;
- Assegurar condições seguras de uso;
- Reduzir as despesas com reparos;
- Garantir excelência na execução do transporte de cargas;
- Diminuir os riscos de acidentes de trabalho.

Como pode ser identificado as atividades da manutenção ferroviária são essenciais no processo logístico, baseado nessa necessidade, a companhia estudada comprou diferentes tipos de máquinas que são responsáveis por manter a linha férrea em bom estado de conservação e operacional.

O serviço de manutenção do trecho ferroviário é realizado pelos denominados equipamentos de via, máquinas importadas e complexas, com frota reduzida e grande demanda frente à necessidade de corrigir a extensa malha ferroviária.

A Tabela 4.1 mostra de forma resumida os equipamentos responsáveis pela manutenção da malha da empresa ferroviária abordada e suas funções.

Todo o conceito da manutenção ferroviária expressada, sinaliza a importância que estes equipamentos apresentam, é necessário que sejam preservados de forma preventiva para que possam cumprir os planos de produção programados visando manter o processo de circulação de trens em plenitude.

O ocasionamento de falhas não premeditadas nessas máquinas gera a necessidade de longas manutenções corretivas, seja por falta de materiais, lead times elevados, diagnósticos não assertivos, reparações incompletas, entre outros, tornando-as indisponíveis para operar e acarretando em elevados custos para a empresa.

Este cenário indica a necessidade de programar manutenções preventivas com prazos certos para as máquinas de via, de forma a conciliar os custos incorporados ao processo e mão de obra disponível para atendimento, visando manter a integridade do ciclo ferroviário.

Tabela 4.1: Ativos responsáveis pela manutenção da malha ferroviária

Equipamento	Função
Auto de Linha	Transporte de passageiros ou Batedor
Caminhão de Linha	Transporte de passageiros/cargas ou Batedor
Caminhão Rodoferroviário com Munck	Transporte de passageiros/cargas ou Batedor
Caminhão Rodoferroviário sem Munck	Transporte de passageiros/cargas ou Batedor
Caminhão Rodoferroviário de Solda	Soldagem elétrica de trilhos
Caminhão Rodoviário com Munck	Transporte de passageiros/cargas ou Batedor
Caminhão Rodoviário sem Munck	Transporte de passageiros/cargas ou Batedor
Caminhonete Rodoferroviária	Transporte de passageiros/cargas ou Batedor
Desguarnecedora de Ombro de Lastro	Desguarnecimento
Desguarnecedora de Lastro	Desguarnecimento
Desguarnecedora de Lastro a Vácuo	Desguarnecimento
Escavadeira	Escavação ou Transporte de cargas ou Rompedor
Frota Robel	Movimentação de cergas
Guindaste	Içamento de cargas
Tie Crane	Posicionamento de dormentes
Tripp	Substituição de dormentes
Pá Mecânica	Transporte de cargas
Reguladora de Lastro	Regulação e varredura de lastro
Retroescavadeira	Escavação ou Transporte de cargas
Socadora	Correção geométrica
Trator	Reboque de cargas ou laminação
Trem Esmerilhador	Esmerilhamento de trilhos

4.3 Grupo de Máquinas Socadora

O tráfego de cargas leva a malha ferroviária a grandes forças dinâmicas, causando deflexão em toda linha, como pode ser visualizado na Figura 4.1. Estes defeitos na via não retornam à sua condição original de forma involuntária, inclusive, ao longo do tempo, em decorrência da constância destes eventos, a geometria correta da linha perde sua posição ideal.

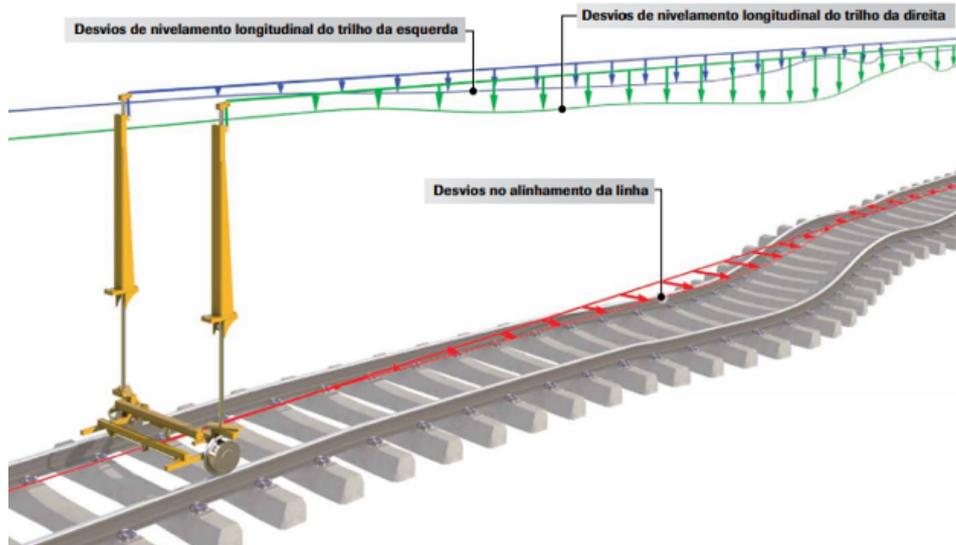


Figura 4.1: Defeitos na linha ferroviária (PLASSER, 2018)

Quando a geometria da linha atinge um nível de qualidade inferior ao valor estabelecido torna-se necessário desempenhar trabalhos de manutenção. Visando restabelecer a geometria ideal, a linha é levantada, nivelada, puxada, alinhada e socada com uma máquina Socadora. O intuito desta intervenção mecanizada é garantir a circulação segura dos trens e, com isso, obter a satisfação dos clientes.

Este trabalho tratará especificamente da Socadora, uma das principais e mais complexas máquinas, ela é utilizada para corrigir a geometria da linha férrea, de forma resumida nivelar os trilhos e alinhá-los.

Este equipamento de via é um dos mais modernos do mundo, ao todo a empresa possui doze Socadoras trabalhando em locais estratégicos da malha ferroviária visando a padronização dos trilhos com intuito de assegurar a qualidade da via e o bom desempenho dos trens.

Na sequência são detalhados os motivos pelos quais a empresa adquiriu as máquinas de modelo Socadora para utilização na manutenção da malha ferroviária:

- Eliminação de falhas geométricas de nivelamento e alinhamento para restabelecer a segurança operacional e o conforto na circulação dos trens;
- Exclusão de espaços vazios na malha para que a carga possa ser distribuída uniformemente sobre os dormentes e seja desviada para o subsolo;
- Estabelecimento de camadas de apoio definidas para evitar instabilidades;
- Garantia da qualidade da linha antes que aconteça uma deterioração irreversível da via;
- Realização de trabalhos de manutenção de forma ágil e em tempo oportuno.

A Figura 4.2 ilustra a Socadora contemplando seus principais compartimentos, em média a máquina apresenta 56 toneladas e mede 35 metros de comprimento e 4 metros de altura.

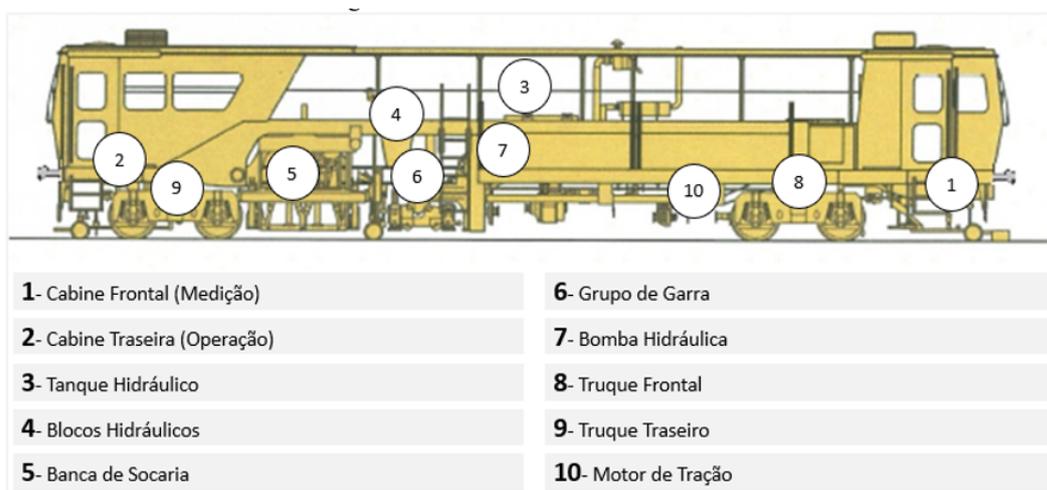


Figura 4.2: Estrutura de uma Socadora (PLASSER, 2018)

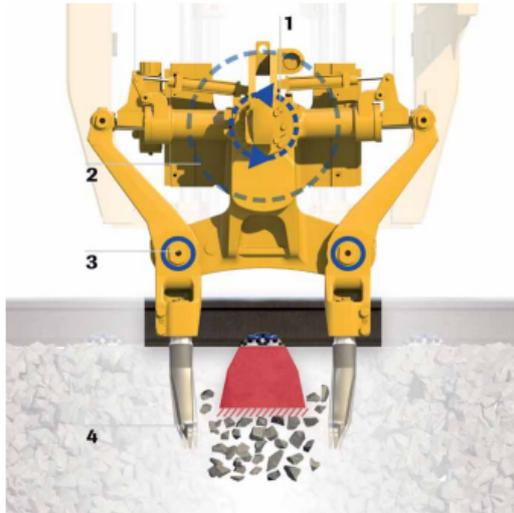
O funcionamento de uma Socadora é baseado em compactar o lastro debaixo do dormente, assegurando-lhe uma camada de apoio estável, onde se obtém um plano longitudinal duradouro da via. A Imagem 4.3 ilustra o ciclo de socaria.

A operação das Socadoras é fundamental para a continuidade do processo ferroviário, por este motivo mantê-las com confiabilidade é extremamente importante para a organização, que apresenta uma estrutura de manutenção para administração dos seus ativos conforme está detalhado a seguir.

- Planejamento e Controle da Manutenção: a função da área é planejar, programar e controlar os principais recursos para a execução da manutenção.

BANCA DE SOCARIA DESCIDA, NA POSIÇÃO DE TRABALHO

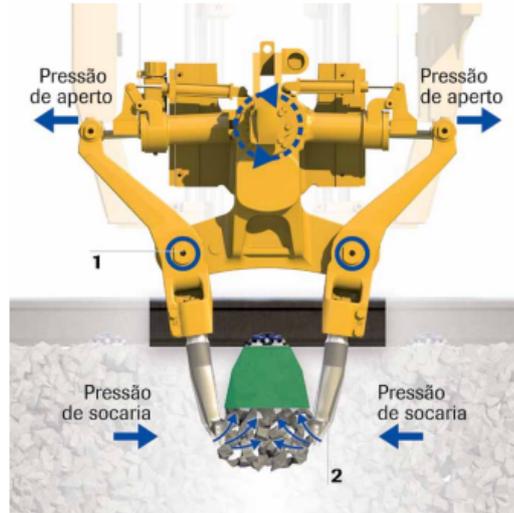
Em decorrência do levantamento da via surge um espaço vazio debaixo do dormente.



- 1 Vibração através do eixo excêntrico
- 2 Reserva de força decorrente da massa centrifuga
- 3 Centro de rotação fixo
- 4 Amplitude estável

BANCA DE SOCARIA NA OPERAÇÃO DE COMPACTAÇÃO

Durante o processo de aperto é gerada uma camada de apoio estável ao dormente.



- 1 Centro de rotação fixo
- 2 Princípio da pressão uniforme e assíncrona de socaria

Figura 4.3: Tecnologia da socaria (PLASSER, 2018)

- Engenharia de Manutenção: define as diretrizes, normas e regulamenta o serviço de manutenção com o propósito de viabilizar o cumprimento dos prazos.
- Execução de Manutenção: trata-se dos responsáveis pela realização da manutenção de acordo com as determinações da Engenharia.

Para as Socadoras, a Engenharia de Manutenção determinou dois tipos de intervenções preventivas, a primeira, chamada de A, acontece todo trimestre, a segunda, denominada B, é realizada anualmente.

A manutenção preventiva A contempla os itens a serem substituídos em menores períodos, baseado no tempo de vida útil dos componentes conforme modelo de operação da Socadora. A intervenção B acontece de forma mais demorada, pois considera toda a máquina, trata-se de uma manutenção robusta e complexa, por este motivo é terceirizada.

De acordo com o histórico levantado pela área de Confiabilidade da empresa ferroviária, alguns dos componentes a serem substituídos durante a manutenção preventiva A apresentam altos índices de falha, o número de ocorrências excede a previsão feita pela empresa, evidenciando que a periodicidade da manutenção preventiva não é assertiva. Estes itens estão inseridos em sistemas críticos deste modelo de máquina, extremamente expostos durante a operação do equipamento.

O elevado número de falhas não previstas na Socadora indica a necessidade da realização de manutenções corretivas, acarretando em máquinas paradas em momentos que elas deveriam estar produzindo.

O custo operacional de uma Socadora é extremamente caro, são aproximadamente 5.000 reais por hora, permitir o ocasionamento de falhas de forma exacerbada e não programada gera um gasto muito alto para a empresa. Em média os intervalos de produção duram 5 horas por dia, isso significa que o custo de uma máquina parada para a empresa são 25.000 reais no dia, na semana 125.000 reais.

É importante ressaltar que o custo operacional para todas as Socadoras da empresa é o mesmo, 5.000 reais para cada uma das doze máquinas.

Baseado neste cenário, o trabalho busca redimensionar os períodos de manutenção preventiva dos itens críticos das Socadoras contemplados na intervenção A, o intuito é amenizar os custos incorporados ao processo e disponibilizar estes equipamentos para realizar a recuperação da malha ferroviária de maneira mais confiável.

Os componentes críticos podem ser visualizados na Tabela 4.2, que traz informações de quantidade, custo e tempos de manutenção, a base de consulta contempla os anos de 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022 e os valores informados foram ajustados com um parâmetro em comum para preservar as informações reais.

Tabela 4.2: Informações dos itens críticos para máquinas de modelo Socadora

Itens	Quantidade de itens	Custo	Tempo de preventiva	Tempo de corretiva
Item 1	2	R\$ 2.200,00	2 horas	10 horas
Item 2	2	R\$ 2.000,00	3 horas	15 horas
Item 3	4	R\$ 1.500,00	2 horas	10 horas
Item 4	2	R\$ 2.500,00	3 horas	30 horas
Item 5	2	R\$ 700,00	1 hora	10 horas
Item 6	3	R\$ 900,00	1 hora	10 horas

Cada linha refere-se a um item e a quantidade de itens trata-se do número total de componentes instalados na máquina e que precisam ser substituídos; o custo está associado ao valor de mercado em relação à quantidade completa de itens; o tempo de preventiva está relacionado ao somatório de horas necessárias para a substituição da quantidade total de cada modelo de item; e o tempo de corretiva envolve a duração da substituição da quantidade completa de cada modelo de item somado à espera da aquisição destes componentes pela empresa ferroviária baseado na produção diária da máquina. É importante reforçar que

para este trabalho a troca de um componente implica na substituição dos demais.

4.4

Definição e Coleta de Dados

A finalidade do modelo matemático é determinar para o grupo de itens crítico das máquinas Socadoras o cronograma da manutenção preventiva que resulte no menor custo, visando manter as máquinas operacionais conforme planejamento feito pela empresa ferroviária. O problema possibilita que as manutenções preventivas que inicialmente eram realizadas no trimestre sejam feitas por mês, a cada dois meses ou permaneça trimestralmente, conforme restrições de capacidade de mão de obra, prazo viabilizado pela organização. O resultado mostrará para cada item de cada máquina a periodicidade a ser adotada e em quais meses deve acontecer.

O modelo matemático proposto está baseado nos seis itens críticos para as doze Socadoras, periodicidades de 1, 2 e 3 meses, alinhado à manutenção preventiva A, e horizonte de tempo de 12 meses, conforme planejamento da empresa. O parâmetro t_p recebe os mesmos valores da periodicidade, pois está atrelado a este conjunto.

Em alinhamento com a companhia ferroviária foi determinado que a cada mês a capacidade a ser ofertada para realização das intervenções preventivas seriam três dias de trabalho, lembrando que um dia de serviço corresponde a 8 horas, e três colaboradores em atuação, totalizando a 72 horas. É importante indicar que para este grupo de máquinas não existem oficinas de manutenção, os atendimentos são feitos em trecho, portanto a capacidade de mão de obra considerada foi especificamente direcionada para a equipe de manutenção.

O tempo em horas para fazer a intervenção programada em cada um dos seis componentes críticos são 2, 3, 2, 3, 1 e 1, respectivamente, conforme sinalizado na Tabela 4.2.

A definição do parâmetro de custo foi feita através do histórico de falhas dos componentes críticos das Socadoras a partir do ano de 2018 até o ano de 2022, visando estimar os valores que a empresa gastaria em todo horizonte de tempo para realizar a manutenção preventiva conforme periodicidades possíveis.

Para os casos em que o número de falhas é de apenas um por periodicidade estabelecida, a realização da manutenção preventiva bloqueia a falha mapeada naquele período, portanto foi considerado como gasto somente a despesa desta atuação, que engloba o preço do item somado ao custo das horas trabalhadas no equipamento.

Nos demais cenários em que se tem mais de uma falha no período, entende-se que apenas a manutenção preventiva não evitaria o ocasionamento de todos os eventos, com possibilidade da empresa intervir corretivamente. Nesta situação além da despesa com a manutenção preventiva foi acrescentado ao custo os gastos esperados com a manutenção corretiva, correspondente ao valor total da intervenção multiplicado ao percentual de acontecimento de novos eventos.

As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 contemplam a probabilidade de ocorrer mais de uma falha, episódios corretivos, nos componentes críticos das Socadoras baseado no conjunto de periodicidades definido no problema.

Tabela 4.3: Probabilidade de falhas corretivas nos componentes críticos a cada mês

Número de falhas corretivas	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 5	Item 6
1	0%	0%	0%	2%	0%	7%

Tabela 4.4: Probabilidade de falhas corretivas nos componentes críticos a cada 2 meses

Número de falhas corretivas	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 5	Item 6
1	32%	43%	57%	29%	100%	79%
2	0%	0%	0%	4%	0%	4%

Tabela 4.5: Probabilidade de falhas corretivas nos componentes críticos a cada 3 meses

Número de falhas corretivas	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 5	Item 6
1	58%	32%	32%	42%	0%	21%
2	21%	32%	53%	21%	100%	68%
3	0%	0%	0%	5%	0%	5%

Os valores mostrados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 foram usados para estimar os custos de manutenção que estão associados à frequência da intervenção preventiva, para melhor entendimento foi exemplificado os cálculos de custo do item 1 contido na máquina 1 conforme periodicidades possíveis.

O custo do componente para a empresa são 2.200 reais e o tempo de atuação em preventiva e corretiva são 2 horas e 10 horas, respectivamente, conforme indicando na Tabela 4.2, além disso é importante lembrar que o custo operacional da máquina são 5.000 reais por hora.

Na sequência são listadas as siglas e feitas suas definições para melhor organização e entendimento dos cálculos matemáticos.

- $CP_{a,i}$: custo do item i contido na máquina a
- CM_a : custo da máquina a parada por hora
- $HD_{a,i}$: horas de manutenção preventiva do item i contido na máquina a
- $HC_{a,i}$: horas de manutenção corretiva do item i contido na máquina a
- $MP_{a,i}$: custo da manutenção preventiva do item i contido na máquina a
- $MC_{a,i}$: custo da manutenção corretiva do item i contido na máquina a
- $CE_{a,i}$: custo esperado da manutenção corretiva do item i contido na máquina a
- $FC_{a,i,p}$: número de falhas corretivas do item i contido na máquina a com periodicidade p
- $PC_{a,i,p}$: probabilidade de acontecer falha corretiva no item i da máquina a com periodicidade p
- $CI_{a,i,p}$: custo de um determinado período considerando o item i da máquina a com periodicidade p
- $C_{a,i,1}$: custo total do item i contido na máquina a com periodicidade p considerando o horizonte de tempo de 12 meses

Antes de iniciar as contas referentes às despesas com a manutenção do item 1, é importante destacar as equações correspondentes aos custos da manutenção preventiva, (4-1), e manutenção corretiva, (4-2). Ambas correspondem ao custo do componente somado à despesa da companhia com o tempo de máquina parada de acordo com a intervenção a ser realizada.

$$MP_{a,i} = CP_{a,i} + (HD_{a,i} \times CM_a) \quad (4-1)$$

$$MC_{a,i} = CP_{a,i} + (HC_{a,i} \times CM_a) \quad (4-2)$$

O método de cálculo para os custos esperados de manutenção corretiva estão compreendidos na Equação (4-3), nela foi realizada a multiplicação entre o custo da manutenção, a probabilidade de ocasionamento do evento e o número de falhas corretivas. O intuito é garantir pesos distintos conforme a quantidade de ocorrências não planejadas, afinal o impacto de dois eventos, por exemplo, em termos de despesa, é mais custoso para a companhia do que os gastos com apenas um evento corretivo.

Ressalta-se que a equação (4-3) conta com a variável genérica PC , que envolve a probabilidade de acontecer a falha corretiva, este número varia conforme a periodicidade considerada nos cálculos de custo.

$$CE_{a,i} = MC_{a,i} \times \left(\sum_{n=1}^{FC_{a,i,p}} FC_{a,i,p} \times PC_{a,i,p} \right) \quad (4-3)$$

O primeiro cenário refere-se ao custo da manutenção preventiva do item 1 com periodicidade a cada mês baseado na Tabela 4.3.

$$CI_{1,1,1} = MP_{1,1} + CE_{1,1} \quad (4-4)$$

$$CI_{1,1,1} = ((CP_{1,1} + (HD_{1,1} \times CM_1)) \times ((CP_{1,1} + (HC_{1,1} \times CM_1)) \times \left(\sum_{n=1}^{FC_{1,1,1}} FC_{1,1,1} \times PC_{1,1,1} \right))) \quad (4-5)$$

$$CI_{1,1,1} = (2.200 + (2 \times 5.000)) + ((2.200 + (10 \times 5.000)) \times (1 \times 0\%)) \quad (4-6)$$

$$CI_{1,1,1} = 12.200 + 0 \quad (4-7)$$

$$CI_{1,1,1} = 12.200 \quad (4-8)$$

Por fim foi realizado o cálculo considerando o horizonte de tempo de 12 meses.

$$C_{1,1,1} = 12.200 \times 12 \quad (4-9)$$

$$C_{1,1,1} = 146.400 \quad (4-10)$$

No segundo cenário é detalhado o custo da manutenção preventiva do item 1 com periodicidade a cada 2 meses baseado na Tabela 4.4.

$$CI_{1,1,2} = MP_{1,1} + CE_{1,1} \quad (4-11)$$

$$CI_{1,1,2} = ((CP_{1,1} + (HD_{1,1} \times CM_1)) \times ((CP_{1,1} + (HC_{1,1} \times CM_1)) \times \left(\sum_{n=1}^{FC_{1,1,2}} FC_{1,1,2} \times PC_{1,1,2} \right))) \quad (4-12)$$

$$CI_{1,1,2} = (2.200 + (2 \times 5.000)) + ((2.200 + (10 \times 5.000)) \times (1 \times 32\% + 2 \times 0\%)) \quad (4-13)$$

$$CI_{1,1,2} = 12.200 + (52.200 \times 32\%) \quad (4-14)$$

$$CI_{1,1,2} = 12.200 + 16.778,6 \quad (4-15)$$

$$CI_{1,1,2} = 28.978,6 \quad (4-16)$$

Por fim foi realizado o cálculo considerando o horizonte de tempo de 12 meses.

$$C_{1,1,2} = 28.978,6 \times 6 \quad (4-17)$$

$$C_{1,1,2} = 173.871,4 \quad (4-18)$$

O último cenário detalha o custo da manutenção preventiva do item 1 com periodicidade a cada 3 meses baseado na Tabela 4.5.

$$CI_{1,1,3} = MP_{1,1} + CE_{1,1} \quad (4-19)$$

$$CI_{1,1,3} = ((CP_{1,1} + (HD_{1,1} \times CM_1)) \times ((CP_{1,1} + (HC_{1,1} \times CM_1)) \times (\sum_{n=1}^{FC_{1,1,3}} FC_{1,1,3} \times PC_{1,1,3}))) \quad (4-20)$$

$$CI_{1,1,3} = (2.200 + (2 \times 5.000)) + ((2.200 + (10 \times 5.000)) \times (1 \times 58\% + 2 \times 21\% + 3 \times 0\%)) \quad (4-21)$$

$$CI_{1,1,3} = 12.200 + (52.200 \times 100\%) \quad (4-22)$$

$$CI_{1,1,3} = 12.200 + 52.200 \quad (4-23)$$

$$CI_{1,1,3} = 64.400 \quad (4-24)$$

Por fim foi realizado o cálculo considerando o horizonte de tempo de 12 meses.

$$C_{1,1,3} = 64.400 \times 4 \quad (4-25)$$

$$C_{1,1,3} = 257.600 \quad (4-26)$$

Os cálculos exemplificados acima foram realizados para todos os itens críticos mapeados (item 1, item 2, item 3, item 4, item 5 e item 6) associado à cada periodicidade permitida (periodicidade 1/mensal, periodicidade 2/bimestral e periodicidade 3/trimestral). As Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 indicam os custos finais em reais para cada cenário, em que as linhas correspondem às máquinas e as colunas fazem referência ao itens.

É necessário lembrar que para este trabalho o conjunto de Socadoras apresentam o mesmo modelo, portanto os custos dos itens são equivalentes para as doze máquinas.

Tabela 4.6: Custos associados à manutenção para os seis itens críticos das doze Socadoras considerando a periodicidade de manutenção preventiva mensal

$C_{a,i,1}$	1	2	3	4	5	6
1	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
2	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
3	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
4	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
5	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
6	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
7	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
8	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
9	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
10	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
11	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663
12	146.400	204.000	318.000	242.105	68.400	113.663

4.5

Resultados e Discussões

Finalizada a etapa de coleta dos dados, o modelo matemático foi executado utilizando o software Jupyter, que conta com a extensão da linguagem de programação Julia, e o solver HiGHS em detrimento de sua performance frente aos demais pacotes de otimização gratuitos. O computador usado apresenta processador Intel® Core™ i7-9700 CPU @ 3GHz, sistema operacional Ubuntu Linux 20.04 e 16GB de memória RAM. O código-fonte completo encontra-se no Apêndice A.

A execução do modelo resultou nas periodicidades de manutenções preventivas conforme mostra a Tabela 4.9, em que as colunas representam as máquinas e as linhas são os itens. Em 39% dos casos foi definida a periodicidade 1, execução da manutenção preventiva a cada mês, 28% a manutenção acontece bimestralmente, periodicidade 2, e 33% dos eventos é representado pela periodicidade 3, intervenção acontecendo trimestralmente. É importante ressaltar que não houve sobra de capacidade no decorrer dos períodos, o modelo conseguiu utilizar a mão de obra disponibilizada pela empresa de maneira completa.

A seguir, nas Tabelas 4.10–4.21, são contemplados os cronogramas de manutenção preventiva para cada máquina em todo horizonte de tempo, 12 meses.

De forma geral é percebido através das Tabelas 4.10–4.21, que trazem os cronogramas de manutenção, que para os itens 5 e 6 de todas as máquinas é realizada manutenção preventiva mensal, periodicidade 1, isso se justifica pelo significativo acréscimo de custo na manutenção ao alongar o período de

Tabela 4.7: Custos associados à manutenção para os seis itens críticos das doze Socadoras considerando a periodicidade de manutenção preventiva bimestral

$C_{a,i,2}$	1	2	3	4	5	6
1	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
2	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
3	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
4	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
5	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
6	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
7	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
8	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
9	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
10	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
11	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171
12	173.871	300.000	335.571	431.785	338.400	297.171

Tabela 4.8: Custos associados à manutenção para os seis itens críticos das doze Socadoras considerando a periodicidade de manutenção preventiva trimestral

$C_{a,i,3}$	1	2	3	4	5	6
1	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
2	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
3	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
4	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
5	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
6	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
7	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
8	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
9	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
10	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
11	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221
12	257.600	359.789	327.894	680.000	428.400	377.221

Tabela 4.9: Periodicidades definidas de acordo com o item de cada máquina

$Y_{a,i,p}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 4.10: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 1

$X_{1,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1	x		x		x		x		x		x	
2			x			x			x			x
3			x			x			x			x
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.11: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 2

$X_{2,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2		x			x			x			x	
3		x			x			x			X	
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.12: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 3

$X_{3,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2	x			x			x			x		
3	x			x			x			x		
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.13: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 4

$X_{4,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		
2			x			x			x			x
3		x			x			x			x	
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.14: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 5

$X_{5,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2		x			x			x			x	
3	x			x			x			x		
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.15: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 6

$X_{6,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2	x			x			x			x		
3			x			x			x			x
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.16: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 7

$X_{7,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2	x			x			x			x		
3			x			x			x			x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.17: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 8

$X_{8,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		
2		x			x			x			x	
3	x			x			x			x		
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.18: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 9

$X_{9,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2			x			x			x			x
3		x			x			x			x	
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.19: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 10

$X_{10,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2			x			x			x			x
3			x			x			x			x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.20: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 11

$X_{11,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1		x		x		x		x		x		x
2		x			x			x			x	
3	x			x			x			x		
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4.21: Cronograma de manutenção preventiva anual dos itens críticos da máquina 12

$X_{12,i,p}$	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1	x		x		x		x		x		x	
2	x			x			x			x		
3		x			x			x			x	
4	x		x		x		x		x		x	
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

intervenção destes componentes, sendo priorizados pelo modelo matemático.

O cronograma de manutenção preventiva atualmente utilizado pela organização, em que todos os componentes críticos das Socadoras realizam a intervenção programada A a cada trimestre, apresenta o custo total de aproximadamente 30.000.000,00 reais, já o valor para execução do cronograma de manutenção obtido através do modelo matemático é de 16.946.187,50 reais para as doze Socadoras. Mediante a este número fica evidente a redução das despesas da organização ao realizar o modelo proposto no trabalho, aproximadamente 40%.

A economia dos custos de manutenção que o modelo matemático oferta para a empresa ferroviária é extremamente expressiva, fazendo com que os gastos adicionais com os três funcionários em três dias do mês para realização das intervenções sejam irrisórios.

Além de diminuir os gastos da empresa, o novo cronograma de manutenção preventiva assegura maior disponibilidade das Socadoras para operar, uma vez que parte dos itens críticos destes equipamentos apresentaram ajuste na periodicidade de intervenção, consequentemente reduzindo as manutenções corretivas, grandes causadoras da indisponibilidade das máquinas.

A Figura 4.4 apresenta em cinza o histórico de disponibilidade média do conjunto das doze Socadoras e para as barras em azul o valor foi ajustado baseado no cronograma de manutenção proposto, em que as intervenções corretivas foram desconsideradas conforme diminuição da periodicidade de manutenção preventiva. A atuação com antecedência nestes componentes críticos reduz o número de dias em que os equipamentos ficaram parados em função de atendimento não previsto, acarretando no aumento da disponibilidade das máquinas para operar, cerca de 30% a cada trimestre, traduzidos num melhor desempenho no processo produtivo em função da melhor utilização do equipamento.

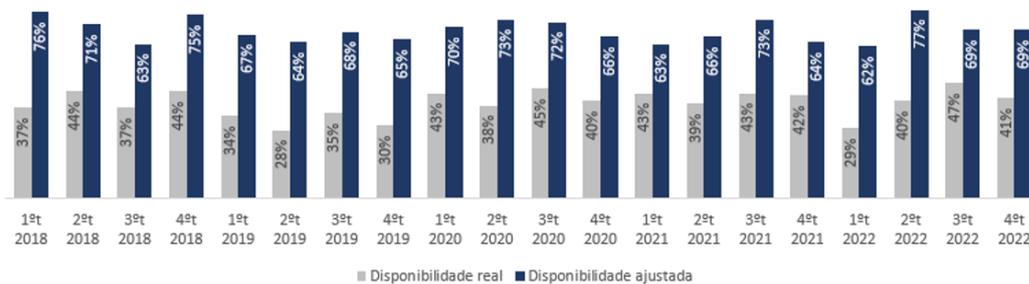


Figura 4.4: Disponibilidade real vs. Disponibilidade ajustada

4.6

Análise de Sensibilidade

Com o intuito de explorar o modelo matemático desenvolvido e entender o comportamento dos custos de manutenção com a variação da capacidade de mão de obra, foram feitas rodadas envolvendo a redução e o aumento do total de horas disponíveis para correção dos itens. Este critério é decisivo para realização das intervenções preventivas, pois é fator limitante na execução das manutenções.

A primeira avaliação conta com o mínimo de horas em que se é possível realizar a manutenção em todos os itens de todas as máquinas, trata-se de uma capacidade de 44 horas por mês. Para este cenário o modelo retornou o custo total de 29.170.891,95 reais e todas as intervenções devem acontecer trimestralmente, apresentam periodicidade 3. Este resultado valida o modelo matemático desenvolvido, uma vez que o custo encontrado se aproxima do valor que a empresa informou que gasta com manutenção atualmente, cerca de 30.000.000 reais.

Num segundo momento foi acrescentado um colaborador na equipe de manutenção, mantendo três dias de trabalho no mês com quatro pessoas atuando, totalizando 96 horas. Esta condição acarretou em custos com manutenção de 14.107.810,20 reais, em que 60% dos casos o modelo determinou a periodicidade 1, 24% dos eventos periodicidade 2 e os demais, 17%, foi definida a periodicidade 3.

Por fim o parâmetro de capacidade de mão-de-obra inicialmente ofertado pela empresa foi dobrado, correspondendo a 144 horas, neste panorama o custo total com as manutenções preventivas foi de 13.110.907,45 reais e todos os seis itens das doze Socadoras devem realizar mensalmente a intervenção, periodicidade 1. Considerando esta hipótese, as despesas da empresa ferroviária reduziriam em 56% comparado ao modelo atual de manutenção preventiva, condizendo ao menor custo.

Ainda que se tenha encontrado o menor custo de manutenção baseado nas condições estabelecidas, é importante avaliar se há oportunidade de otimizar a capacidade de mão-de-obra. Mediante aos números alcançados, buscou-se encontrar o melhor cenário de custos de manutenção para companhia, em que se tem a menor despesa, 13.110.907,45 reais, e capacidade de mão de obra suficiente para suprir as correções necessárias, 132 horas.

A Figura 4.5 retrata a redução dos custos associados à manutenção, eixo Y, a partir do aumento da capacidade de mão de obra, eixo X. A parte sombreada indica a estabilização da despesa em 13.110.907,45 reais, menor custo, quando a capacidade atinge 132 horas.

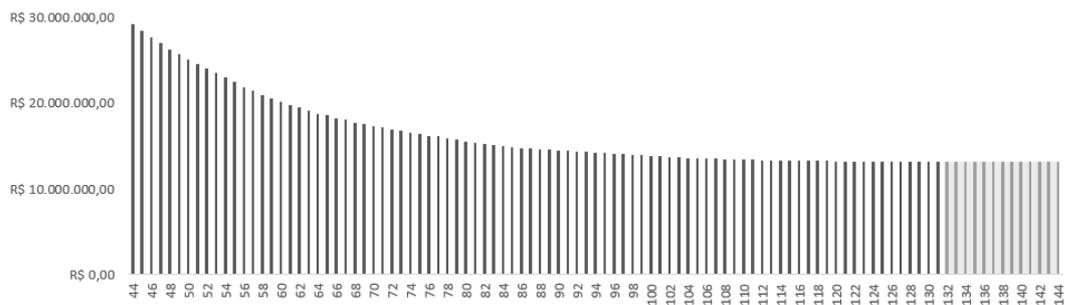


Figura 4.5: Relação entre os custos de manutenção e a capacidade de mão de obra

Os resultados vistos através da análise de sensibilidade envolvendo o parâmetro de capacidade, apontam que o ideal para diminuição dos custos com manutenção é realizar as intervenções num menor espaço de tempo, condição que demanda mais horas disponíveis para execução das atividades de manutenções.

5 Conclusão

Este trabalho propôs um modelo matemático para a elaboração de um cronograma de manutenção preventiva de ativos baseado em informações de custo, tempo de atendimento e capacidade de mão-de-obra. Os resultados encontrados foram satisfatórios, indicando que a utilização de programação matemática para definição dos intervalos de manutenção é viável.

A aplicação do modelo matemático envolveu alguns itens críticos do modelo de máquina Socadora, um dos equipamentos responsáveis por realizar a manutenção na malha ferroviária, o intuito foi encontrar uma solução que minimizasse os custos incorporados ao processo e garantisse maior disponibilidade do equipamento para operar.

O modelo matemático permitiu evidenciar através dos cálculos de custo da manutenção, que se baseiam nas periodicidades executáveis, o impacto real das despesas que a companhia tem ao decidir por adiar as correções nas máquinas. Comparado ao cenário atual, o cronograma sugerido neste trabalho é cerca de 40% mais econômico, além disso foi constatado o aumento de disponibilidade de 30% a cada trimestre, assegurando a maior utilização das Socadoras pela empresa.

Além da vantagem econômica e melhoria de disponibilidade comprovadas numericamente, a modelagem matemática desenvolvida é dinâmica e permite inúmeras análises, possibilitando que a empresa avalie diferentes panoramas e determine a melhor estratégia de manutenção dos equipamentos de manutenção da via, visando conciliar seus custos e condição da companhia, dado as constantes mudanças do mercado.

Um outro benefício da ferramenta é a possibilidade de ajustar as regras da manutenção preventiva no decorrer do horizonte de tempo, apesar do planejamento de manutenção da empresa ferroviária ser realizado no final do ano anterior em relação ao ano em que as intervenções serão executadas, a nova técnica para determinar o cronograma de intervenção programada facilita alterações de variáveis e/ou valores conforme novas necessidades e estratégias da organização.

Neste estudo também foram realizadas análises a partir do aumento da capacidade de mão-de-obra da organização para atuar em intervenção

preventiva, que resultou na redução do custo de manutenção associado à diminuição das periodicidades das correções, sinalizando o benefício em realizar ajustes preventivos nos equipamentos. Foi verificada uma redução considerável do custo da manutenção da Socadora, comprovando inclusive que as despesas com mão-de-obra por parte da companhia são mínimas frente à vantagem financeira ofertada.

A empresa determinou que o estudo fosse iniciado pelo grupo de máquinas Socadora, por se tratar de um modelo de equipamento complexo com escopo imprescindível na manutenção da malha férrea. Esse tipo de equipamento apresenta um dos processos mais completos e maduros frente às demais máquinas, justificando a motivação em tê-las como piloto, o intuito foi certificar resultados sólidos.

Baseado nos bons resultados obtidos, a finalidade imediata da companhia é expandir o trabalho recriando cronogramas de manutenção preventiva para as demais máquinas da frota dos equipamentos de manutenção de via, com o objetivo de reduzir os custos da empresa e utilizá-las da melhor forma, com o objetivo de manter a plenitude do ciclo ferroviário.

Todos os avanços apresentados fizeram com que a empresa ferroviária optasse por usar a ferramenta desenvolvida não só para os equipamentos de manutenção de via, mas também para a definição da periodicidade de outros ativos ferroviários, assim como vagões e locomotivas.

De forma concisa, ficou evidenciada a facilidade e a flexibilidade do modelo matemático apresentado, o método ampliou as oportunidades de atuação da empresa levando-a a otimização do seu negócio.

Para este trabalho o modelo matemático sugerido foi ilustrado no ambiente ferroviário, no entanto pode ser adaptado a diferentes panoramas, sua utilização é ampla e parte estratégica na otimização dos processos de manutenção, que atualmente ocupam posição de destaque nas empresas, e como foi verificado, trata-se de uma formidável ferramenta.

A

Código-fonte

A seguir é contemplado o código-fonte referente ao modelo matemático desenvolvido neste trabalho para otimizar a periodicidade de manutenção preventiva de ativos ferroviários.

```
1 using JuMP, HiGHS
2
3 itens = [1,2,3,4,5,6]
4 maquinas = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12]
5 periodicidades = [1,2,3]
6 horizonte = 12
7 meses = collect(1:12)
8 demanda = [2 3 2 2 1 1]
9 capacidade = 72
10 tempo = periodicidades
11 custo = cat(
12 [146400 204000 318000 242105.2632 68400 113663.1579;146400
    204000 318000 242105.2632 68400 113663.1579;146400 204000
    318000 242105.2632 68400 113663.1579;146400 204000 318000
    242105.2632 68400 113663.1579;146400 204000 318000
    242105.2632 68400 113663.1579;146400 204000 318000
    242105.2632 68400 113663.1579;146400 204000 318000
    242105.2632 68400 113663.1579;146400 204000 318000
    242105.2632 68400 113663.1579;146400 204000 318000
    242105.2632 68400 113663.1579],
13 [173871.4286 300000 335571.4286 431785.7143 338400 297171.4286;
    173871.4286 300000 335571.4286 431785.7143 338400
    297171.4286;173871.4286 300000 335571.4286 431785.7143
    338400 297171.4286;173871.4286 300000 335571.4286
    431785.7143 338400 297171.4286;173871.4286 300000
    335571.4286 431785.7143 338400 297171.4286;173871.4286
    300000 335571.4286 431785.7143 338400
    297171.4286;173871.4286 300000 335571.4286 431785.7143
    338400 297171.4286;173871.4286 300000 335571.4286
    431785.7143 338400 297171.4286;173871.4286 300000
    335571.4286 431785.7143 338400 297171.4286;173871.4286
```

```

300000 335571.4286 431785.7143 338400
297171.4286;173871.4286 300000 335571.4286 431785.7143
338400 297171.4286;173871.4286 300000 335571.4286
431785.7143 338400 297171.4286],
14 [257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526;257600 359789.4737 327894.7368 680000 428400
377221.0526],
15 dims=3)
16
17 m = Model(HiGHS.Optimizer)
18
19 # item i da maquina a realizando a manutencao no mes k
20 @variable(m, X[maquinas, itens, meses], Bin)
21
22 # item i da maquina a realizando a manutencao com periodicidade
    p
23 @variable(m, Y[maquinas, itens, periodicidades], Bin);
24
25 # funcao objetivo
26 @objective(m, Min, sum(custo[a,i,p] * Y[a,i,p] for a in
    maquinas, i in itens, p in periodicidades)+sum(0.1*X[a,i,k]
    for a in maquinas, i in itens, k in meses));
27
28 # restricao de capacidade
29 @constraint(m, Capacidade[k in meses], sum(demanda[i] * X[a,i,k]
    ] for a in maquinas, i in itens) <= capacidade);
30
31 # restricao para que cada item de cada maquina receba apenas
    uma periodicidade
32 @constraint(m, Periodicidade[a in maquinas, i in itens], sum(Y[
    a, i, p] for p in periodicidades) == 1);
33
34 # restricao indicando o mes em que se inicia a manutencao
35 @constraint(m, Inicio_Manutencao[a in maquinas, i in itens, p
    in periodicidades], sum(X[a,i,k] for k in 1:tempo[p]) >= Y[a
    ,i,p]);
36

```

```

37 # restricao apontando em quais meses a manutencao sera feita
    baseado em todo horizonte de tempo
38 @constraint(m, Definicao_Meses[a in maquinas, i in itens, p in
    periodicidades, k in (tempo[p]+1):horizonte], X[a,i, k] >= X
    [a,i, k - tempo[p]] - (1 - Y[a,i, p]));
39
40 optimize!(m)
41 println(termination_status(m))
42 println("z = ", objective_value(m))
43
44 for i in Y
45     if value(i) > 1e-6
46         println("$i = $(round(value(i), digits = 2))")
47     end
48 end
49
50 for i in X
51     if value(i) > 1e-6
52         println("$i = $(round(value(i), digits = 2))")
53     end
54 end
55
56 sol=[value(X[a,i,k]) for a in maquinas, i in itens, k in meses]
57 for k in meses
58     sobra=capacidade
59     for a in maquinas, i in itens
60         sobra=sobra-(demanda[i] * sol[a,i,k])
61     end
62     println(sobra)
63 end

```

Listing A.1: Código-fonte em Julia

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, M. T. (2000). Manutenção preditiva: Confiabilidade e qualidade. <https://mtaev.com.br/wp-content/uploads/2018/02/mnt1.pdf>. Acesso em: Maio de 2022.
- Alonso, M. E. (2023). Proposta de aplicação de métodos de machine learning em manutenção preditiva.
- ANDRADE, B. M. M. D. S. (2012). *Implementação de melhorias na gestão da manutenção da Seara-Indústria de Carnes*. PhD thesis.
- ANTF, A. N. D. T. F. (2022). Informações gerais. <https://www.antf.org.br>. Acesso em: Janeiro de 2022.
- AZEVEDO, A. A. (2007). Otimização da manutenção preventiva em linhas de montagem: estudo de caso em uma empresa de manufatura contratada do setor eletroeletrônico. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- BAKER, R. (2010). Risk aversion in maintenance: a utility-based approach. *IMA Journal of Management Mathematics*, 21(4):319–332.
- BELTRAME, J. O., GUZZO, M. V. P., SILVA, R. B., e DE SOUZA MARTINS, D. (2020). Análise da eficiência da manutenção através de indicadores chave de desempenho.
- CABRAL, J. P. S. (2009). Gestão da manutenção de equipamentos, instalações e edifícios. *Biblioteca Industria & Serviços, LIDEL*.
- CARVALHO, T. P., SOARES, F. A., VITA, R., FRANCISCO, R. D. P., BASTO, J. P., e ALCALÁ, S. G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137:106024.
- CHRISTER, A., WANG, W., CHOI, K., e SHARP, J. (1998). The delay-time modelling of preventive maintenance of plant given limited pm data and selective repair at pm. *IMA Journal of Management Mathematics*, 9(4):355–379.

- CORRÊA, R. F. e DIAS, A. (2016). Modelagem matemática para otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva. *Gestão & Produção*, 23:267–278.
- CORRÊA, R. F. e OTHERS (2015). Otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva: uma modelagem matemática.
- COSTA, M. D. A. (2013). Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)*. Juiz de Fora: UFJF.
- COUTINHO, R. (2017). Gestão de ativos físicos aplicada às infraestruturas. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 3(4):113–118.
- DA ROSA, S. C. F., DE MOURA LEITÃO, J. O., SILVA, A. L. E., e THIER, F. (2020). Análise da gestão da manutenção em uma empresa de transformação de polímeros. volume 6, pages 0377–0382.
- DAMASCO, V. C., PEREIRA, C. M. N. A., e MELO, P. F. F. F. (2005). Uma modelagem matemática para o cálculo da disponibilidade de componentes de sistemas. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*.
- de Miranda Viana, C. C., de Souza, C. B., de Lucena, D. A., da Costa, T. D., da Silva, C. V. R., dos Santos, A. L., e Rossato, D. B. (2022). lot em sistemas metroferroviários: Monitoramento de escadas rolantes. *Revista Científica SENAI-SP-Educação, Tecnologia e Inovação*, 1(1):16–36.
- DE SIQUEIRA, I. P. (2005). *Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação*. Qualitymark.
- DE SOUZA, V. C., DE SOUZA MARCHI, C., BUENO, N. V., FAUSTINO, T. S., e BARREIRO, T. A. (2022). Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. *Brazilian Journal of Development*, 8(1):7063–7083.
- DUARTE, R. P. (2018). Definição de um sistema de gestão de ativos: um caso de estudo na rede de distribuição de gás natural.
- ESPINOSA FUENTES, F. F. e OTHERS (2006). Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial.
- FABRO, E. (2003). Modelo para planejamento de manutenção baseado em indicadores de criticidade de processo. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- FOGLIATO, F. e RIBEIRO, J. L. D. (2009). *Confiabilidade e manutenção industrial*. Elsevier Brasil.
- FREITAS, L. F. (2016). Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de juiz de fora com base nos conceitos da manutenção preventiva e preditiva. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- FÁVERO, L. P. (2013). *Pesquisa Operacional para cursos de engenharia*. Elsevier, Rio de Janeiro, 1ed edition.
- KARDEC, A. e NASCIF, J. (2009). *Manutenção: função estratégica*. Qualitymark, Rio de Janeiro, 3ed edition.
- KOBBACY, K. A., MURTHY, D. P., RAUSAND, M., e VATN, J. (2008). Reliability centred maintenance. *Complex system maintenance handbook*, pages 79–108.
- KOLUS, A., EL-KHALIFA, A., AL-TURKI, U. M., e DUFFUAA, S. O. (2020). An integrated mathematical model for production scheduling and preventive maintenance planning. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 37(6/7):925–937.
- KÜNZEL, E. E. (2017). Modelagem matemática aplicada na gestão de manutenção: um estudo feito em uma indústria do setor de borracha. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná.
- LACHTERMACHER, G. (2016). *Pesquisa operacional na tomada de decisões*. LTC, Rio de Janeiro, 5ed edition.
- LEAL, O. P., BAFFA, P., e GARCIA, H. L. (2006). Otimização da frequência na manutenção preventiva. In *XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, pages 1–9, Fortaleza, Ceará.
- LIMA, P. N., CALDERARO, D. R., GOLDMEYER, D. B., RODRIGUES, L. H., e MORANDI, M. I. W. M. (2015). Minimizando custos de manutenção: uma alternativa para o nivelamento de recursos de um cronograma de manutenção preventiva utilizando programação linear e a engenharia de confiabilidade. In *XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, pages 1–18, Fortaleza, Ceará.
- LUCATELLI, M. V. e OTHERS (2002). Proposta de aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em equipamentos médico-hospitalares.

- MARCORIN, W. R. e LIMA, C. R. C. (2003). Análise dos custos de manutenção e de não-manutenção de equipamentos produtivos. *Revista de ciência & tecnologia*, 11(22):35–42.
- Martins, R. B. (2022). Desenvolvimento de solução computacional baseada em machine learning para apoio à manutenção preditiva.
- MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N. L. (1993). *Manutenção combate os custos da não-eficácia –A vez do Brasil*. Makron Book, São Paulo.
- MONTEIRO, E. A. (2016). Pesquisa operacional aplicada à logística. In *Anais do VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe*, pages 1–10, São Cristovão, Sergipe.
- MORAES, P. H. D. A. (2019). *Manutenção Produtiva Total: estudo de caso em uma empresa automobilística. 2004. 90 f.* PhD thesis, Dissertação (Mestrado em Gestão e Desenvolvimento Regional)–Departamento de
- MOREIRA, L. A. C. F. (2010). *Aplicação veicular da manutenção centrada em confiabilidade*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- MORO, NORBERTO; AURAS, A. P. (2007). Introdução à gestão da manutenção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis.
- MOUTA, C. S. P. (2011). Gestão da manutenção. Tese de doutorado, Universidade da Beira Interior, Portugal.
- MUDUC, S. (2021). Análise de custo-benefício da manutenção corretiva versus manutenção preventiva das infraestruturas da guarda nacional republicana. Tese de doutorado, Academia Militar, Lisboa.
- NUNES, L. E. (2001). Análise de implementação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- OLIVATTO, A. C. (2012). Tratamento de estruturas de concreto: opções para o aumento da vida útil do concreto aparente no pós-obra. Dissertação pós-graduação, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.
- OLIVEIRA, A. P. A. (2019). A evolução da manutenção industrial. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade Pitágoras, São Luís.

- Oliveira, B. S. d. (2022). Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento remoto via iot aplicado a um compressor pneumático. B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- OTANI, M. e MACHADO, W. V. (2008). A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. *Revista Gestão Industrial*, 4(2).
- PASCHOAL, D., MENDONÇA, M. A., MORAIS, R. D., GITAHY, P., e LEMOS, M. (2009). Disponibilidade e confiabilidade: aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade. *Revista da Engenharia de Instalações no mar da FSMA*, pages 1–14.
- PINTO, C. V. (2002). *Organização e gestão da manutenção*. Monitor, Lisboa, 2ed edition.
- PLASSER, D. B. (2018). Máquinas socadoras. <https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/socaria.html>. Acesso em: Outubro de 2022.
- RIGONE, E. (2009). Metodologia para manutenção centrada na confiabilidade: sistema baseado na lógica fuzzy. *Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*.
- RUSCHEL, E., SANTOS, E. A. P., e LOURES, E. D. F. R. (2017). Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 45:180–194.
- SANTOS, L. M. A. e OTHERS (2022). A importância da manutenção industrial e seus indicadores. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano, 4:108–128.
- SANTOS, M. J. M. F. D. (2009). Gestão de manutenção do equipamento. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- SHAHIDEHPOUR, M. e FERRERO, R. (2005). Time management for assets: chronological strategies for power system asset management. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(3):32–38.
- SILVA NETO, U. A. D. (2014). A qualidade da manutenção: estudo de caso em tratores jhon deere. Dissertação de mestrado, Universidade de Rio Verde, Curso de Engenharia Mecânica, Goiás.

- SILVEIRA, C. B. (2022). Confiabilidade e disponibilidade de máquinas: um exemplo prático. <https://www.citisystems.com.br/confiabilidade-disponibilidade-maquinas>. Acesso em: Maio de 2022.
- SITTER, W. R. (1984). Costs for service life optimization the “law of fives”. In *CEB-RILEM Workshop on Durability of Concrete Structures*, pages 131–134, Copenhaga, Dinamarca.
- SLACK, N., CHAMBERS, S., e JOHNSTON, R. (2002). *Administração da Produção*. Atlas, São Paulo, 2ed edition.
- SLACK, N., CHAMBERS, S., JOHNSTON, R., e OTHERS (2009). *Administração da produção*, volume 2. Atlas São Paulo.
- SOUZA, J. B. D. e OTHERS (2008). Alinhamento das estratégias do planejamento e controle da manutenção (pcm) com as finalidades e funções do planejamento e controle da produção (pcp): uma abordagem analítica. *Orientador: Prof. Dr. Rui Francisco Martins Marçal*, 169.
- SOUZA, R. F. DE; BRITO, J. N. (2017). Plano de manutenção de ativos físicos como parte estratégica do negócio. In *XVII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial*, pages 1–11, Aracajú, Sergipe.
- SOUZA, V. C. (2013). *Organização e Gerência da Manutenção*. All Print, São Paulo, 5ed edition.
- TAKAHASHI, Y. e OSADA, T. (1993). *Manutenção Produtiva Total*. Instituto Iman, São Paulo, 1ed edition.
- TELES, J. (2017). Como calcular disponibilidade de equipamentos industriais.
- VERZENHASSI, C. C. (2008). *Otimização de risco estrutural baseada em confiabilidade*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- VIANA, A. A., MIRANDA JÚNIOR, G., e CONCEIÇÃO, S. V. (2008). Otimização de custos e planejamento da manutenção preventiva. In *XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pages 1–9, João Pessoa, Paraíba.
- VIRGÍNIO CAVALCANTE, C. A., PIRES FERREIRA, R. J., e DE ALMEIDA, A. T. (2010). A preventive maintenance decision model based on multicriteria method promethee ii integrated with bayesian approach. *IMA Journal of Management Mathematics*, 21(4):333–348.
- WIREMAN, T. (2005). *Developing performance indicators for managing maintenance*. Industrial Press Inc, New York, 2nd edition.

- XAVIER, J. N. (2021). Manutenção - tipos e tendências. <http://claudemiralves.weebly.com/uploads/3/8/6/2/3862918/tendencia.pdf>. Acesso em: Março de 2022.
- XENOS, H. (1998). Gerenciando a manutenção preventiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade. *Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial*, page 149.
- YAVUZ, O., DOĞAN, E., CARUS, E., e GÖRGÜLÜ, A. (2019). Reliability centered maintenance practices in food industry. *Procedia Computer Science*, 158:227–234.
- ZAIONS, D. R. (2003). Consolidação da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade em uma planta de celulose e papel.