



Andréa Patrícia Castro Leite

PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO

para aparelhos de mudança de vias,
considerando possibilidade de erros



Atena
Editora
Ano 2023



Andréa Patrícia Castro Leite

PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO

para aparelhos de mudança de vias,
considerando possibilidade de erros



Atena
Editora
Ano 2023

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva da autora, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos a autora, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
 Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Prof^o Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
 Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
 Prof^o Dr^a Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
 Prof^o Dr^a Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof^o Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
 Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
 Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
 Prof^o Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
 Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
 Prof^o Dr^a Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
 Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
 Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
 Prof^o Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
 Prof^o Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
 Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
 Prof^o Dr^a Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
 Prof^o Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
 Prof^o Dr^a Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
 Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Planejamento de manutenção para aparelho de mudança de vias, considerando possibilidade de erros

Diagramação: Letícia Alves Vitral
Correção: Soellen de Britto
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: A autora
Autora: Andréa Patrícia Castro Leite

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
L533	<p>Leite, Andréa Patrícia Castro Planejamento de manutenção para aparelho de mudança de vias, considerando possibilidade de erros / Andréa Patrícia Castro Leite. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0890-1 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.901230202</p> <p>1. Manutenção e reparo de máquinas. I. Leite, Andréa Patrícia Castro. II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.816</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DA AUTORA

A autora desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

DEDICATÓRIA

Dedico este livro à minha família (paterna e materna), por todo amor, orações e gestos de carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força, sabedoria e calma nesta trajetória.

Aos meus familiares (mãe, pai, minha irmã, meus padrinhos João e Suzana) por todo amor, carinho.

Este livro tem como foco explorar o uso de um modelo de manutenção, para tornar apropriado seu uso para um sistema de prontidão em ferrovias. Existem vários componentes de prontidão, neste trabalho, o modelo de manutenção é ajustado para os aparelhos de mudança de vias (AMV's), que são utilizados em ferrovias. O estudo tem como objetivo avaliar como o desempenho deste sistema pode ser afetado por erros humanos. Erros humanos incorrem em ações executadas erroneamente, por exemplo: parte reparada errada, reparar parcialmente uma peça defeituosa, de modo a não a retirar da condição defeituosa, não perceber que um dispositivo está em estado defeituoso e acusar um estado de defeito quando o dispositivo está bom. Essas ações podem ser consequências da falta de treinamento do inspetor ou falta de experiência em uma atividade. Neste trabalho serão considerados, dentro do universo dos possíveis erros humanos, os erros de julgamento e os erros de instalação. Com a exploração e o entendimento do modelo dentro das particularidades no contexto do AMV, será analisado na aplicação numérica o comportamento das variáveis propostas à pesquisa e por fim, observar como possíveis erros humanos podem afetar o sistema de prontidão em termos de custos, disponibilidade e nas possíveis causas de acidentes.

Palavras-chave: Manutenção. Manutenção imperfeita. Inspeção imperfeita. Erro humano.

This book focuses on exploring the use of a maintenance model to make it appropriate for a rail readiness system. There are several components of readiness, in this work, the maintenance model is adjusted for the switches of tracks (AMV's), which are used in railways. The study aims to evaluate how the performance of this system can be affected by human errors. Human errors incur in erroneously executed actions, for example: wrong repaired part, partially repair a defective part, so as not to remove it from the defective condition, not realizing that a device is in a defective state and accusing a defective state when the device is Good. These actions may be consequences of the inspector's lack of training or lack of experience in an activity. In this work, within the universe of possible human errors, judgment errors and installation errors will be considered. With the exploration and understanding of the model within the particularities in the context of the AMV, the behavior of the variables proposed for the research will be analyzed in the numerical application and finally, observe how possible human errors can affect the readiness system in terms of costs, availability and possible causes of accidents.

Keywords: Maintenance. Imperfect maintenance. Imperfect inspection. Human error.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	1
JUSTIFICATIVA	2
OBJETIVOS.....	3
Objetivo geral	3
Objetivos específicos.....	3
METODOLOGIA.....	3
ESTRUTURA DO LIVRO.....	4
BASE CONCEITUAL E REVISÃO DE LITERATURA.....	6
MANUTENÇÃO	6
MANUTENÇÃO IMPERFEITA.....	6
TIPOS DE ERROS HUMANOS.....	8
MODELOS COM ERROS HUMANOS EM MANUTENÇÃO	10
Conceito de <i>delay time</i>	10
Inspeção e manutenção imperfeita	11
Modelos que consideram erros na manutenção	12
MODELOS <i>DELAY TIME</i> PARA SISTEMAS DE PRONTIDÃO	13
SISTEMA DE INTERESSE E DESCRIÇÃO DO MODELO COM A PRESENÇA DE ERROS HUMANOS	16
POLÍTICA DE MANUTENÇÃO ADOTADA.....	18
Distribuição Exponencial	20
Distribuição Weibull.....	20
Descrição do modelo	21
Primeiro Cenário.....	23
Segundo Cenário	23
Terceiro Cenário	24

Quarto Cenário	24
Quinto Cenário	25
Sexto Cenário	25
APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	28
CONCLUSÕES.....	36
TRABALHOS FUTUROS	37
REFERÊNCIAS	39
SOBRE A AUTORA	42

INTRODUÇÃO

Dhillon (1982) afirma que as interações humanas são importantes para projeto, instalação, operação e fases de manutenção de um equipamento, e que o grau de tais interações varia de um equipamento para outro, assim como entre suas fases de operação, logo, o erro humano pode levar a deterioração de equipamentos.

O campo de estudo sobre Fatores Humanos foi reconhecido em 1987 nos Estados Unidos e na Europa, e um campo profissional paralelo conhecido como Ergonomia, já vinha desenvolvendo há pelo menos uma década estudos na área.

Compreende-se assim, que este livro tem como escopo entender, através da exploração de um modelo de manutenção adaptado para o contexto de um sistema de prontidão em ferrovias, a influência dos erros humanos em atividades de manutenção que podem impactar financeiramente, gerar acidentes e influenciar na própria imagem da organização.

Este capítulo busca apresentar a descrição do problema, a justificativa, os objetivos, a metodologia e a estrutura do trabalho para avaliar a influência do fator humano em um modelo *delay time* para sistema de prontidão em ferrovias, mais especificamente, em aparelhos de mudança de vias com baixa frequência de demanda.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Diversos sistemas de produção envolvem a presença de equipamentos e homens. Os humanos têm como objetivo manter os equipamentos em estado operante através de atividades de manutenção, porém erros humanos podem influenciar estas atividades, tendo como consequências, por exemplo, acidentes.

Dhillon (1982) explica que o erro humano está presente desde o início da humanidade e que em algumas ocasiões os erros humanos podem estar relacionados com: erros de operação, erros de montagem, erros de projeto, erros de inspeção, erros de instalação, erros de manutenção e erros de julgamento.

Afirma Silva (2006) que os acidentes de trabalho são causados em sua maioria por erros humanos e análises históricas demonstraram que nas décadas de 70 e 80 as falhas humanas foram as principais causas de acidentes na época. As falhas humanas ficaram mais frequentes, mesmo havendo avanços tecnológicos em diversas áreas, que resultaram no aumento da confiabilidade dos equipamentos.

Entre os diversos acidentes registrados na história, estão os que ocorreram em ferrovias. De acordo com a Resolução nº 1431, 26 de abril de 2006, da Agência Nacional

de Transporte Terrestres - ANTT as principais causas de acidentes em ferrovias estavam relacionadas a vias permanentes. Nunes (2012) explica que vias permanentes são superestruturas da ferrovia e têm possibilidades de sofrer desgaste devido ao contato entre as rodas dos veículos e os trilhos, sendo assim, deve ser trocada assim que for necessário, de acordo com padrões de segurança e qualidade da ferrovia.

Um componente muito importante nas vias permanentes são os aparelhos de mudança de vias (AMV's) que têm como objetivo permitir a locomoção de trens em uma mesma linha de trilho, porém para direções diferentes com a função de evitar acidentes em modais ferroviários.

Devido ao grau de importância dos AMV's em ferrovias, a realização de inspeções devem ser constantes nesses aparelhos, porém se o inspetor não obtiver, por exemplo, um treinamento adequado ao realizar as atividades de manutenção, erros humanos podem acontecer e influenciar no funcionamento do sistema de prontidão, expondo o sistema a graves riscos e consequentemente gerando acidentes.

JUSTIFICATIVA

Menegon (2014) afirma que as áreas de Ergonomia, Segurança do Trabalho, Psicologia Organizacional e Sociologia do Trabalho destacam a importância do ser humano em um projeto de trabalho, gerando mais interesse sobre o conhecimento sobre o fator humano em organizações. E uma grande preocupação dentro das organizações é sobre a influência do fator humano, levando a um crescimento no campo de estudo na área.

Segundo Dhillon (1982) o erro humano na manutenção ocorre por muitas razões, podendo ser resultado de uma correlação negativa (sintomas de fadigas e nível de ansiedade), no que diz respeito à formação (experiência profissional) e o desempenho das tarefas de manutenção realizadas pelos técnicos. E para evitar as correlações negativas, existem melhorias que podem aumentar o desempenho do sistema e evitar a presença de erros humanos como: mais experiência de trabalho, menos fadiga ao realizar uma atividade, maior satisfação com o grupo de trabalho e aptidão superior que são consideradas correlações positivas.

A evolução do conceito fator humano acabou por transformar as relações de trabalho, criando uma nova consciência para a importância entre a relação Homem – Meio Ambiente – Máquina e dos fatores organizacionais envolvidos.

O erro humano é consequência de uma ação humana e tem consequências inesperadas. Treinamentos, avaliações de risco e inspeções de segurança não devem ter seus objetivos restritos à tentativa de evitar erros, mas também devem buscar torná-los

mais visíveis e identificá-los antes que produzam consequências prejudiciais.

Este trabalho busca contribuir com o conhecimento sobre a influência do fator humano nas práticas de manutenção em um aparelho de prontidão presente em ferrovias. Busca-se avaliar como os erros humanos influenciam na performance de sistemas, em particular, com maior ênfase no custo total e na disponibilidade.

OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo geral é realizar uma abordagem quantitativa, ao adaptar um modelo *delay time* ao contexto de sistema de prontidão em ferrovias, na presença de componentes heterogêneos (componentes fracos e componentes fortes), observando como as variáveis do modelo podem ser influenciadas por erros humanos, e assim afetando o sistema de prontidão.

Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Fazer um estudo dos possíveis erros humanos que podem ocorrer na manutenção e analisar os seus efeitos;
- Adaptar um modelo de manutenção, tomando em consideração aspectos particulares do AMV;
- Descrever a operação e a consequência do mal funcionamento do AMV, devido à presença de erros humanos;
- Estudar os resultados e traduzir nos possíveis impactos práticos.

METODOLOGIA

Método científico, segundo Marconi e Lakatos (2005), é o conjunto de atividades organizadas de forma sistemática, buscando alcançar um objetivo de maneira econômica e segura, traçando um caminho, detectando erros e auxiliando as decisões do pesquisador. Para complementar o conceito anterior, Cervo, Bervian e Silva (2007) afirmam que método científico é uma lógica geral, tácita ou explicitamente empregada para apreciar os méritos de uma pesquisa.

A primeira parte deste trabalho é caracterizada por uma pesquisa bibliográfica. Cervo, Bervian e Silva (2007) explicam que pesquisa bibliográfica tem como objetivo explicar um problema a partir de referências teóricas publicadas e pode ser realizada de

forma independente ou ser parte de uma pesquisa descritiva ou experimental.

Severino (2007) conceitua pesquisa bibliográfica como aquela que se realiza a partir de um registro disponível, utilizando dados ou categorias teóricas utilizadas por outros pesquisadores, que acabam sendo fontes para futuras pesquisas. Neste trabalho, uma revisão da literatura disponível sobre erros humanos, manutenção imperfeita e sobre a importância dos AMV's para ferrovias permitiu consolidar o conhecimento necessário para avaliar a influência do fator humano em um modelo *delay time* para sistema de prontidão.

Afirma Severino (2007) que a abordagem quantitativa é o conhecimento dos fenômenos, que busca uma relação funcional entre causa e efeito que só pode ser mensurada através de uma função matemática. Este trabalho é considerado uma abordagem quantitativa, pois haverá uma avaliação de impacto e potenciais consequências, ao se considerar a possibilidade de erros, de diferentes naturezas, durante a realização de atividades de manutenção.

Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, que terá um estudo voltado para um contexto da realidade: os AMV's.

Partindo da premissa que o AMV é um dispositivo de difícil instalação e erros humanos (erros de instalação) podem ocorrer ao tentar instalá-lo, o modelo terá a presença de componentes heterogêneos (componente fraco e componente forte) para explicar que o inspetor, devido à falta de treinamento, ao tentar instalar um componente forte no sistema, pode danificá-lo fisicamente e consequentemente tornando-o fraco.

Scarf e Cavalcante (2012) afirmam que a diferença da qualidade entre componentes (componente fraco e componente forte) no estoque da organização, pode ter a influência dos fornecedores, o que incorre na possibilidade do inspetor errar na escolha do componente fraco para instalar no sistema.

Na presente pesquisa é feito um estudo sobre o impacto do erro de julgamento (falso positivo onde o inspetor acusa a presença de defeito, sem que ele exista, e o falso negativo em que o defeito presente não é diagnosticado pelo inspetor) e erros de instalação (o mal funcionamento do componente está relacionado com a má instalação realizada pelo inspetor), dois tipos de erros humanos de naturezas distintas e como ambos podem influenciar os custos, a disponibilidade e causar possíveis acidentes.

ESTRUTURA DO LIVRO

O presente trabalho é dividido em cinco Capítulos: Introdução, Base conceitual e Revisão de literatura, Descrição do modelo com a presença de erros humanos, Aplicação numérica, Discussão dos resultados e Conclusões.

A Introdução é a contextualização do assunto abordado e teve como divisão: descrição do problema, justificativa, objetivos (geral e específicos) e a metodologia para o desenvolvimento da pesquisa.

Na Base conceitual e Revisão de literatura, segundo capítulo, busca-se conceituar e classificar a manutenção, além de conceituar manutenção imperfeita, apresentar os principais tipos de erros humanos e posteriormente exemplificar os principais modelos *delay time* com erros humanos.

No terceiro capítulo explica-se os principais elementos e os cenários desenvolvidos no modelo de Cavalcante (2016).

No quarto capítulo, demonstra-se a aplicação numérica, onde através da adaptação deste modelo para sistema de prontidão em ferrovias, os resultados são obtidos e analisados, ficando evidente como possíveis erros humanos, em manutenção, podem afetar um sistema de prontidão, no que tange aos custos, disponibilidade e a ocorrência de acidentes.

Nas conclusões, quinto capítulo, apresenta-se como o desenvolvimento da pesquisa ajuda a entender a importância de um sistema de prontidão em ferrovias, onde as variáveis do modelo na presença de erros humanos, podem influenciar no funcionamento do AMV.

BASE CONCEITUAL E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo apresentar-se-ão os conceitos de manutenção, a classificação de suas estratégias de ação, e buscar-se evidenciar o conceito e algumas classificações em relação ao erro humano. Depois, expõe-se alguns modelos relacionados ao sistema de prontidão também serão apresentados para que haja entendimento de como erros humanos podem influenciar em seu funcionamento.

MANUTENÇÃO

Ações de manutenção estão no planejamento diário, semanal ou mensal de uma organização e precisam ser constantes, para manter o equipamento em bom estado de funcionamento (KODALI; CHANDRA, 2001). Segundo ABNT/NBR 5462:1993 as ações de manutenção podem ser classificadas e conceituadas da seguinte maneira:

- Manutenção Preventiva é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados e com critérios prescritos, com o objetivo de reduzir falhas ou a degradação de um item;
- Manutenção Corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida;
- Manutenção Preditiva é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base em técnicas de análises, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

Para qualquer tipo de manutenção, há situações em que a ação pode ser danosa, uma vez que erros humanos podem estar presentes durante a realização das atividades de manutenção, podendo repercutir em graves consequências.

A ligação entre as atividades de manutenção e os erros humanos podem estar presentes em diversos conceitos e podem estar relacionados a modelos. Nesse sentido, na sequência, apresentam-se os principais conceitos relativos à manutenção imperfeita e ao erro humano, além disso, serão detalhados alguns modelos na área de manutenção em que o fator humano, de alguma forma, está sendo considerado.

MANUTENÇÃO IMPERFEITA

Pham e Wang (1996) afirmam que manutenções preventivas (planejadas) são realizadas para reter o processo de deterioração ou restaurar um sistema para manter o mesmo em bom funcionamento. Sendo assim Pham e Wang (1996) classificam a manutenção de acordo com o grau em que o sistema é restaurado em:

- Manutenção Perfeita é a ação da manutenção que restaura o sistema opera-

cional para as condições de tão bom quanto novo, em termos de probabilidade de falha;

- Manutenção Imperfeita é a ação de manutenção que faz com que o sistema fique em um estágio intermediário entre tão bom quanto novo e tão ruim quanto velho.

As políticas de manutenção têm como função buscar uma melhor confiabilidade do sistema, além da disponibilidade e desempenho de segurança com baixo custo de manutenção e de acordo com Zhou, Xi e Lee (2007) um sistema que está sob a política de manutenção preventiva imperfeita acaba incorrendo em uma sequência decrescente de intervalos de tempo entre as manutenções, isso acontece devido ao aumento da idade e consequentemente haverá diminuição da confiabilidade do sistema.

Afirma Pham e Wang (1996) que as atividades de engenharia de manutenção estão sendo desenvolvidas e grande parte delas são em áreas de manutenção imperfeita e, portanto, modelos de manutenção imperfeitos, cada um com sua política, foram desenvolvidos para buscar uma manutenção ideal como são apresentados em alguns conceitos a seguir:

- Manutenção preventiva por idade ou baseada na idade: o sistema sofre manutenção em uma idade T ou reparado em caso de falha, o que ocorrer primeiro;
- Manutenção preventiva periódica: uma unidade é preventivamente mantida em intervalos de tempo fixos e reparada em falhas intervenientes.
- Política de controle de limite será apenas quando a taxa de falha ou a confiabilidade de um sistema atinge um nível pré-determinado;
- Manutenção preventiva sequencial é a mais prática porque a maioria dos sistemas têm de realizar a manutenção com mais frequência quando tem aumento da idade;
- Política de limite de reparação é quando o sistema falha, o custo do reparo é estimado e a reparação é realizada, caso o custo estimado seja inferior a um limite pré-determinado, caso contrário, o sistema é substituído;
- Para os sistemas multicomponentes, as políticas oportunistas têm destaque, onde as ações de manutenção de uma parte do equipamento dependem do estado do resto do equipamento.

Gasmi e Mannai (2014) explicam que a manutenção imperfeita é um assunto bastante amplo e que outros aspectos como erros humanos em atividades de manutenção podem estar relacionados, influenciando na confiabilidade do equipamento e na questão financeira na organização.

Sendo assim, possíveis erros humanos podem ser identificados na área da manutenção, Pham e Wang (1996) afirmam que os erros humanos em procedimentos

de inspeção estão relacionados ao conceito de manutenção imperfeita, nos seguintes aspectos:

- A parte reparada está errada;
- Reparar parcialmente a parte defeituosa;
- Reparar parcial ou totalmente a peça defeituosa e suas partes adjacentes;
- A condição da unidade controlada é avaliada incorretamente;
- Executar uma ação de manutenção fora da programação;
- Durante a manutenção não são detectados falhas e defeitos;
- Presença de erros humanos, como ajustes errados e mais danos durante a manutenção;
- Substituição por peças defeituosas.

No presente trabalho, os erros humanos serão considerados no que concerne a identificação do estado de um aparelho de prontidão, o AMV. O conceito de erro humano e alguns conceitos importantes são apresentados a seguir.

TIPOS DE ERROS HUMANOS

Almeida (2003) conceitua erro humano para referir-se às ações e/ou omissões de trabalhadores que estariam associadas, direta ou indiretamente, com a ocorrência de acidentes. Dhillon (1982) ainda cita que o erro humano é a incapacidade de realizar um trabalho ou então a execução de uma ação proibida, que poderia interromper as operações ou causar danos para bens e equipamentos.

Segundo Reason (1997) o erro humano pode ser visto por duas abordagens: a abordagem pessoal e a abordagem sistêmica. Cada uma destas abordagens tem o seu modelo e possuem diferentes filosofias de gerenciamento de erro: a abordagem sistêmica explica que os erros são esperados e que os seres humanos são passíveis de falha, os erros nesta abordagem são influenciados diretamente pelo local de trabalho e aos processos da organização, sendo assim, são considerados como consequências de um sistema.

A outra abordagem é a pessoal onde existem os atos inseguros que podem ser classificados como erros ou violações. (REASON, 2000). A diferença entre erros e violações é citada por Correa e Cardoso (2007) onde conceituam erros como atividades mentais ou físicas em que os indivíduos, ao buscar alcançar um objetivo pretendido, têm como resultado a falha. E as violações têm a denominação de desobediência a uma regra.

Reason (2000) classifica os erros humanos baseado no modelo proposto por Rasmussen (1983) onde são estabelecidos três níveis: Nível da habilidade (*skill-based*),

Nível de regras (*rule-based*) e Nível do conhecimento (*knowledge-based*). Cada um desses níveis possui conceitos próprios (Tabela 1).

Níveis	Conceitos
Nível de habilidade	Condução de tarefas rotineiras de modo automático. As pessoas costumam trabalhar na maior parte do tempo com essas atividades.
Nível de regras	Aplicação de rotinas memorizadas ou escritas de modo consciente, com o propósito de verificar se a solução é ou não adequada.
Nível do conhecimento	É um nível que está relacionado a situações novas, nos quais não se aplicam nem a rotina, nem as regras.

Tabela 1 – Níveis para classificação dos erros.
Fonte: Autor (2022).

Dentro de cada nível existem diferentes tipos de erros. Erros ligados ao nível de habilidade são chamados de lapsos (falhas de memória) e deslizes (falhas pré – intencional). Já os erros associados ao nível de regras podem ser classificados de acordo com o comportamento: má aplicação de boas regras ou aplicação de más regras, que neste caso podemos ter como exemplo os erros de instalação, ao se realizar uma substituição preventiva ou corretiva. E por fim erros associados ao nível de conhecimento que estarão relacionados a situações novas (COSTELLA; SAURIN, 2005).

Outros tipos de erros (Figura 1) são identificados como: erros de decisão, que representam um comportamento intencional que se mostra como pretendido, quando na verdade está de maneira inadequada ou inapropriada; erros de percepção, quando o que é percebido difere da realidade, neste caso são considerados os erros de julgamento, e por fim as violações que estão relacionadas à não realização das regras e regulamentos que governam a segurança (CORREA; CARDOSO, 2007).

Destaca-se que na realização de atividade de manutenção os erros de julgamento são bastante prováveis. Especificamente nas atividades de inspeção, quando o diagnóstico sobre o estado do dispositivo demanda habilidade e experiência do mantenedor, muitos erros relativos a percepção podem ocorrer. Dentre estes erros, os mais comuns, são os falsos positivos e os falsos negativos. Os quais serão detalhados posteriormente.

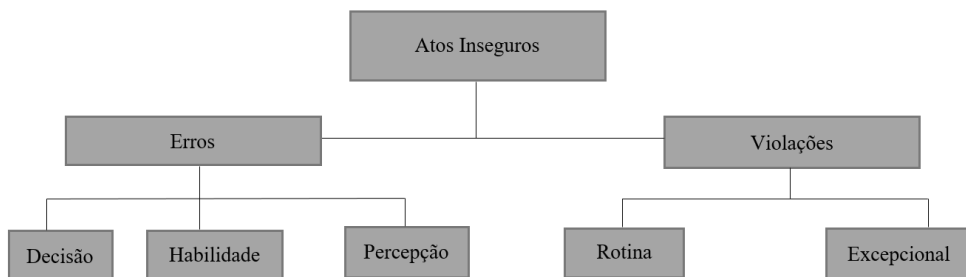


Figura 1 – Outros Tipos de Erros.
Fonte: Adaptado de Shappel e Wiegmann (2000, p.3).

Dentro de uma organização existem os erros latentes e erros ativos. O que os diferem é que os erros ativos estão ligados ao local de trabalho e os erros latentes estão relacionados aos erros gerencias. Em relação à manutenção, para identificar os erros ativos seria necessário fazer o mapeamento de todas as atividades e observar se tem possibilidade de ocorrer erro humano. Para identificar os erros latentes seria recomendada a utilização de auditorias para identificar os erros gerencias (COSTELLA; SAURIN, 2005).

Dunn (2015) afirma que admitir o erro humano é imprescindível e o correto é projetar sistemas e processos em torno desta premissa, por isso a importância do conhecimento sobre o conceito e suas classificações.

Sendo assim, ferramentas apropriadas devem ser utilizadas para garantir que não se tenham excessos de manutenção e o trabalho será executado de maneira correta, onde as atividades de manutenção sejam realizadas da melhor forma e uma verificação de erro esteja inclusa sempre que for necessário (DUNN, 2015).

MODELOS COM ERROS HUMANOS EM MANUTENÇÃO

Para qualquer programa de manutenção preventiva, a inspeção oferece informações sobre o estado da planta, para que atividades como verificação, determinação, execução de reparo e substituições sejam realizadas. Há dois conceitos fundamentais para o tratamento dos erros humanos em manutenção, considerados para este trabalho.

Conceito de *delay time*

Delay time é o tempo transcorrido entre a chegada do defeito e a ocorrência de falha. Modelos *delay time* propõem a realização de inspeções quando o estado de defeito é verificado, então o *delay time* é uma janela de oportunidade.

Wang (2012) afirma que *delay time* é aplicável a uma planta cujo processo de falha ocorre em dois estágios: o primeiro estágio corresponde a chegada do defeito e o segundo

estágio corresponde o tempo desde o defeito até a falha (Figura 2). A inspeção busca verificar se o sistema está operacional ou defeituoso. Em relação ao sistema de prontidão é necessário também as inspeções para identificar o estado de falha.

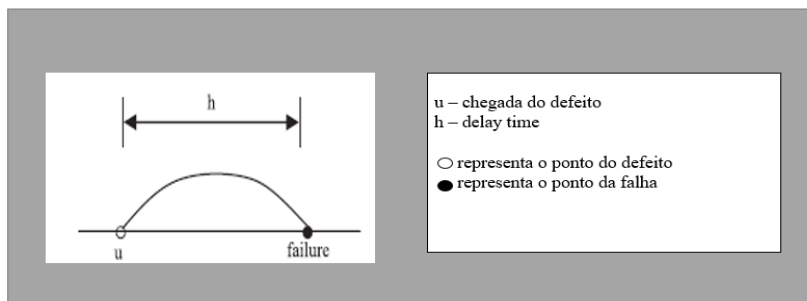


Figura 2 – Representação do Delay Time.
Fonte: Adaptado de Wang (2012, p.167).

O conceito *delay time* pode ser caracterizado também como um processo de falha de três estágios, ou mais. Os estágios seriam: operacional, menor defeito, defeito grave e falha, que é uma extensão do *delay time* de duas fases.

De acordo com Ferreira, Almeida e Cavalcante (2009), o *delay time* é uma importante ferramenta para o processo de decisão na gestão da manutenção. Dada a estrutura de uma política de manutenção, as variáveis de decisão que a caracterizam podem ser decididas com base na avaliação de critérios diversos.

Conforme Wang *et al.* (2011) o *delay time* é mais utilizado para modelos com dois estágios e útil para definir planos de inspeção e manutenção de baixo custo. Todo modelo *delay time* é considerado um modelo que envolve a realização de inspeções e Zhao *et al.* (2007) afirmam que os modelos de inspeção em geral são específicos para cada aplicação, sendo assim, demanda de uma avaliação crítica para ser aplicado, porque erros humanos podem estar presentes nestas inspeções os quais podem trazer consequências gravíssimas para o sistema.

Inspeção e manutenção imperfeita

Pietruczuk, Nowakowski e Wojciechowska (2013) afirmam que a confiabilidade é influenciada pela frequência com que a inspeção e a manutenção são realizadas, e para modelar essa interação pode ser utilizado o conceito do *delay time*. Em situações práticas tanto a inspeção quanto a manutenção podem ser imperfeitas.

Inspeções e manutenções imperfeitas são bastante comuns em indústrias podendo ser modeladas de diversas maneiras diferentes (WANG, 2012). Dentro deste conceito Pietruczuk, Nowakowski e Wojciechowska (2013) explicam que existe uma probabilidade,

que pode ser constante ou não, que estará relacionado a não detecção do defeito durante uma atividade de inspeção. Portanto, as chances de encontrar um defeito podem ter relação com o tempo da presença dos defeitos.

Inspeções imperfeitas podem ocorrer no monitoramento do estado do sistema, e manutenção imperfeita pode ocorrer em procedimentos de reparo, que visam reduzir a “idade” do sistema. Considerando que inspeção é uma ação de manutenção, ambas podem ter relação aos erros de julgamento e erros de instalação.

Muitos modelos na área de manutenção estão voltados para o estudo do comportamento de falha de equipamentos. Atualmente, modelos na área de inspeção estão abordando os erros humanos na manutenção, pois o homem não apenas opera o equipamento, mas, através de ações de manutenção, também oferece as condições para que o equipamento tenha êxito na operação.

Por outro lado, admitindo-se a possibilidade da existência de erros, esta intervenção ao invés de trazer benefícios, pode levar o sistema para uma de baixa performance.

Modelos que consideram erros na manutenção

Alguns modelos propostos incorporam os conceitos de *delay time* e inspeções imperfeitas. O primeiro exemplo é o modelo proposto por Scarf e Cavalcante (2012), que define uma política híbrida de inspeções e substituição por idade para uma população de itens heterogêneos. Os autores explicam que a heterogeneidade pode relacionar-se com a qualidade dos componentes (componentes fortes e fracos), ou também pode ser resultante de erros de instalação, além disso mostram que o fator de heterogeneidade (p), que define a percentual de itens fracos no sistema, que pode influenciar na definição da política ótima de manutenção.

A confiabilidade e o custo podem sofrer impactos ao mudar de componente ou de fornecedor de manutenção. Segundo Scarf e Cavalcante (2012) os termos manutenção e qualidade são vistos nos seguintes aspectos respectivamente: na qualidade do componente (fraco ou forte) e na qualidade de uma substituição preventiva (com erro ou não de instalação) e, no caso da inspeção, pode ser diagnosticado o falso positivo e negativo.

Dentro dos modelos de inspeção ainda são observados os falsos positivos e falsos negativos. Berrade *et al.* (2013) propuseram um modelo com três estados possíveis: operacional, defeituoso, falho. No modelo proposto o defeito será detectado se houver a inspeção, porém estas inspeções são sujeitas a erros: falso positivo, em que o sistema é desnecessariamente substituído e falso negativo, onde o defeito presente não é revelado, ambos os erros podem ser caracterizados como resultante de uma inspeção imperfeita.

Os modelos com falsos positivos e negativos buscam mostrar como uma inspeção imperfeita pode influenciar nos resultados da manutenção. Berrade *et al.* (2013) afirma ainda que a finalidade da inspeção é detectar defeitos para então justificar ações para impedir a falha e evidencia que uma baixa qualidade de inspeção gera o aumento de custos, como no caso dos falsos negativos e falsos positivos.

Os custos e a confiabilidade do sistema são influenciados pela qualidade da inspeção (no sentido de detectar defeitos) e pela qualidade da substituição (no sentido de renovar o equipamento para tão bom quanto novo, e não inserir defeitos na manutenção).

MODELOS *DELAY TIME* PARA SISTEMAS DE PRONTIDÃO

Jia e Christer (2002) explicam que os sistemas de prontidão são inativos em períodos normais e são apenas utilizados em casos emergenciais ou quando estes são demandados com intuito de proteger o sistema quando o mesmo falha.

Tendo em vista a irregularidade do regime de funcionamento destes sistemas, falhas podem ocorrer entre as demandas de uso dos mesmos. Em relação aos sistemas de prontidão as falhas podem ser classificadas de duas formas: evidentes e ocultas. Falha evidente quando se torna aparente para equipe de manutenção ou para a operação em que a função é prevenir uma falha simples (MOUBRAY, 2000).

As falhas, quando ocultas, estão presentes em um equipamento, porém não evidenciam nenhuma anormalidade, a menos que seja feita alguma inspeção ou teste. Neste caso, uma estratégia da manutenção é a prevenção para evitar uma falha múltipla, caracterizada por uma falha do sistema principal que ocorre posterior à falha do sistema de prontidão.

Devido à irregularidade da demanda destes sistemas e que possíveis falhas podem ocorrer, é importante que testes sejam realizados para assegurar a disponibilidade desses sistemas. Tais testes são chamados de testes periódicos, os quais consistem na realização de inspeções, considerando que este sistema só pode apresentar um de três possíveis estados: operacional, defeituoso ou falho.

Na maior parte dos modelos de manutenção dedicados à sistemas de prontidão, a sistemática de ação consiste em realizar inspeções por um certo número de vezes (M) e depois substituir preventivamente (MT) em dado momento (Figura 3).

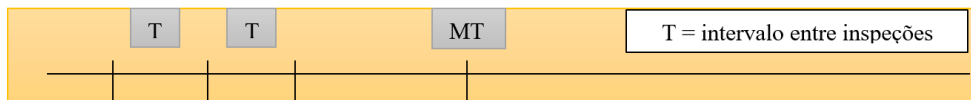


Figura 3 – Sistemática de um sistema de prontidão.

Fonte: Autor (2023).

Nesse sentido, as inspeções têm o objetivo de revelar uma falha ou detectar o item em estado defeituoso, caso em que uma reparação ou uma substituição será feita imediatamente, caso contrário, o sistema estará operacional e nada será feito.

Abaixo alguns modelos descritos são dedicados a sistemas de prontidão, a fim de proporcionar o entendimento dos principais elementos presentes nestes modelos, que posteriormente são incorporados ao modelo que foi escolhido para ser utilizado para a definição da política de manutenção para AMV's.

Berrade, Scarf e Cavalcante (2012) afirmam que sistemas de prontidão com apenas um componente pode ser instalado para uso em casos de emergência, por exemplo, áreas de controle de qualidade, triagem em hospitais e tecnologia automotiva (monitoramento de níveis de óleos e pressão de pneus), nestes casos, o estado do sistema só será conhecido em caso de demanda, ou se houver um teste de inspeção. Para apoio a definição de políticas de inspeção e substituição, modelos matemáticos buscam avaliar a influência da manutenção/inspeção imperfeita no desempenho do sistema.

Jia e Christer (2002) desenvolveram um modelo para estimar o nível de disponibilidade de um sistema de prontidão. Para este modelo, a indisponibilidade do sistema é decorrente de: tempo com o equipamento em estado de falha, tempo de duração do teste de verificação de estado, tempo de reparo. O modelo também incorpora a possibilidade de erro humano (erros de julgamento). Conforme mencionado anteriormente, um dos problemas encontrados neste tipo de sistema são as falhas ocultas, visto isso, é comum a adoção de políticas de manutenção preditiva.

Berrade, Scarf e Cavalcante (2013) apresentaram um modelo de uma política de inspeção para um sistema de prontidão, que prevê a restauração do sistema em uma idade S , diferentemente de modelos que consideram apenas a execução de inspeções.

Este modelo apresentado pode considerar que o operador, por um erro de julgamento (falso positivo), ao realizar a inspeção no alarme, detectará um defeito e resultará em um custo adicional ao proprietário que precisará renovar o sistema sem necessidade, onde através de um erro de julgamento o sistema que estava bom, foi considerado falho.

Em outros modelos apresentados por Berrade, Scarf e Cavalcante (2013) considera-se que a ocorrência de um falso positivo incorrerá em custo adicional e haverá situações

em que, se o estado de defeito permanecer, será solicitada uma opinião secundária, onde através de uma inspeção mais detalhada, o dispositivo poderá ficar em funcionamento, caso contrário será retirado de serviço.

Zequeira e Bérenguer (2006) afirmam que a determinação das políticas de manutenção ideais é muito importante para a engenharia de confiabilidade e que ações de manutenção preventiva aumentam a vida útil do equipamento. Para modelar ações de manutenção imperfeita é necessário observar que o comportamento de um componente depois de ação de manutenção é análogo a antes da ação da manutenção.

Na prática, erros humanos podem ser decorrentes de falta de treinamento ou quaisquer outras razões que interfiram no desempenho do mantenedor durante a realização da atividade de manutenção que repercute negativamente, onde seria melhor para o sistema não sofrer intervenção preventiva do que estar sujeito aos erros decorrentes da ação de manutenção.

SISTEMA DE INTERESSE E DESCRIÇÃO DO MODELO COM A PRESENÇA DE ERROS HUMANOS

O modal ferroviário é de grande importância econômica e é caracterizado por contar com um sistema de prontidão chamado Aparelho de Mudança de Vias (AMV's), visto que os veículos não têm a capacidade de definir a direção de seu movimento, que então é definido pelos trilhos da ferrovia.

O Sistema Ferroviário Brasileiro (2013) afirma que o serviço de transporte ferroviário terá retornos crescentes de escala, devido à expansão das operações de transporte. A existência de retornos de escala dependerá da extensão da malha, do quanto as operações serão abrangentes e da utilização de outros modais de transporte por parte das pessoas e dos transportes de cargas.

Portanto, o aumento dos derivados devido a extensão da malha e do uso frequente do serviço ferroviários, fará o sistema ferroviário ter ganhos em três tipos de economias:

- Economias de rede – a diferença entre os pontos de carga e descarga irão definir os retornos de escala;
- Economias de densidade – se o transporte ferroviário permanece em áreas densamente populosas, então os custos unitários de serviço se tornam inferiores.
- Economias de escopo – a produção de produtos ou serviços em conjunto tem mais vantagem, do que manter uma produção dissociada.

Barros (2013) explica que as vias permanentes em sistemas ferroviários são dimensionadas em função da velocidade dos trens que irão circular por ela. Os elementos de uma via permanente que possibilitam aos trens diferentes velocidades baseado em características técnicas próprias são: trilhos, fixação, dormentes, lastro e (AMV's).

Quando um veículo muda de uma linha para outra, surge a necessidade do AMV e por ser formado por vários componentes e devido à própria fragilidade dos mesmos, os aparelhos acabam sendo partes críticas da via, por isso tornam-se necessárias intervenções constantes para manutenção e lubrificação (MÁXIMO; LORENCETTE, 2006).

Barros (2013) explica que AMV's têm como função a mudança de trajeto ou passagem do um trem de uma linha para outra, isso é considerado um ponto crítico já que o próprio aparelho provoca no trem uma mudança rápida de trajeto, existem vários tipos de AMV's e a velocidade de cada um é definida pela rapidez da mudança de curso. Velocidade e mudança de curso são inversamente proporcionais, ou seja, quanto mais rápida a mudança de curso, menor a velocidade admissível.

O funcionamento dos AMV's (Figura 4) depende da seguinte composição:

- Agulhas – são peças de aço que se adaptam aos trilhos de encosto, de acordo com que o veículo irá transitar;
- Trilho de encosto – são peças usinadas dos próprios trilhos e servem como “batente” de agulha;
- Aparelho de manobra – é aparelhagem que permite manobrar as agulhas;
- Trilhos intermediários – faz ligação das agulhas com o jacaré do AMV’s;
- Jacaré – possibilita o cruzamento entre duas direções de uma mesma linha de trilhos;
- Calços – são peças de ferro fundido, aparafusadas entre os trilhos e os contra-trilhos;
- Placas de deslizamentos – são chapas colocadas sob as agulhas;
- Contratrilhos – trilhos colocados na parte interna dos trilhos.

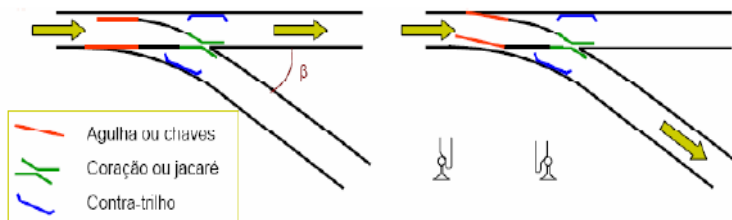


Figura 4 – Funcionamento do AMV.
Fonte: Máximo e Lorencette (2006, p.42).

Os AMVs podem ser considerados sistemas de prontidão instalados no cruzamento de linhas (Figura 5) e uma manutenção eficiente, visando seu funcionamento eficaz, poderá contribuir para a prevenção de acidentes. Do contrário, erros humanos na execução das tarefas de manutenção poderão ocasionar incidentes ou mesmo acidentes graves, com repercussões que podem ir além de perdas materiais, sobretudo quando se trata do transporte de pessoas.



Figura 5 – Cruzamento de linhas (necessidade de AMV’s).
Fonte: <http://www.revistaferroviaria.com.br/>. Acesso em: 12 de fev. 2017.

Os acidentes em ferrovias, quanto à natureza da colisão, podem ser relacionados com as seguintes situações: choque (quando a colisão de veículos ferroviários ou trens estão no mesmo sentido, na mesma via, porém um está parado), encontro (colisão de veículos ferroviários ou trens que estão em sentidos contrários, na mesma via) e esbarro (colisão de veículos ou trens circulando ou manobrando em vias distintas, podendo um deles estar parado (MÁXIMO; LORENCETTE, 2006).

A necessidade de um aparelho de mudança de vias é fundamental para que haja viabilidade de uma ferrovia. É um dispositivo criado há muito tempo; anteriormente estes aparelhos eram manuais, atualmente normalmente são utilizados aparelhos automatizados. Isso ressalta a importância da manutenção dos AMV's. Vários acidentes aconteceram em ferrovias devido a falhas presentes nestes aparelhos e falhas humanas podem estar associadas (MÁXIMO; LORENCETTE, 2006).

No contexto de sistemas de prontidão, alguns modelos foram desenvolvidos, com o objetivo de avaliar o impacto de erros humanos em áreas de manutenção. No caso do presente trabalho, busca-se avaliar como o desempenho de sistemas de prontidão podem ser afetados por inspeções imperfeitas.

Neste capítulo, será apresentado o modelo *delay time*, para modelar uma política de manutenção considerando a possibilidade de erros de julgamento em inspeções em AMV's. Serão estabelecidos cenários para possíveis casos em que ocorram falso positivo e falso negativo, e serão considerados componentes heterogêneos.

POLÍTICA DE MANUTENÇÃO ADOTADA

O modelo *delay time* em estudo é aplicado em sistema de prontidão usado em ferrovias, o aparelho de mudança de vias (AMV's).

O modelo proposto por Cavalcante (2016) e que será ajustado na pesquisa, no contexto do AMV, teve como inspiração o modelo de Berrade, Scarf e Cavalcante (2012). Algumas modificações foram realizadas a fim de melhor retratar o contexto de um sistema de ferrovias e mais particularmente uma política de manutenção para um AMV.

Originalmente o modelo de Berrade, Scarf e Cavalcante (2012) considera (Tabela 2) 4 variáveis de decisão ($M1$, $T1$, $M2$, $T2$). O modelo apresenta duas fases, a fase 1 ($M1$, $T1$) e a fase 2 ($M2$, $T2$), onde será considerado um sistema de proteção de um único componente que será submetido a uma inspeção ou teste para detectar falha. Se o sistema falhar entre inspeções e a falha não for revelada, a única maneira desta falha ser detectada será através de inspeções.

Variáveis	Definições
M1	Número de inspeções da fase 1
T1	Intervalo entre inspeções da fase 1
M2	Número de inspeções da fase 2
T2	Intervalo entre inspeções da fase 2
j	Inspeções

Tabela 2 – Variáveis de decisão do modelo Berrade, Scarf e Cavalcante. (2012).
Fonte: Autor (2023).

Sendo assim as inspeções são agendadas para quando o sistema atinge uma idade $jT1$, onde $j = 1, 2, \dots, M1$ e idades $M1T1 + jT2$, onde $j = 1, 2, \dots, M2$. Na idade $M1T1 + M2T2$ (a inspeção final), uma substituição do componente também está agendada, onde haverá a substituição de componentes e o sistema será renovado com a idade redefinida.

Além da dificuldade em determinar os valores ótimos para tais variáveis, os próprios autores mostram que em algumas circunstâncias uma política equivalente, que considera apenas duas variáveis alcança resultados muito bons, em termos de custo e de disponibilidade.

Por essa razão, uma das variações adotadas pelo modelo de Cavalcante (2016) é a consideração de duas variáveis apenas, T e M , que respectivamente representam o número de inspeções e o tempo entre inspeções. Observa-se que a substituição preventiva é realizada no tempo MT . Nesse sentido, a política consiste em realizar M inspeções, com o intervalo T , e ao final da M (ésima) inspeção substituir preventivamente o AMV.

O modelo proposto por Cavalcante (2016) é um modelo *delay time*, o que difere do modelo proposto por Berrade, Scarf e Cavalcante (2012), onde tais autores não consideraram o *delay time*, sendo assim o dispositivo pode visitar apenas dois estados: operacional e falho.

Tais modificações impactam substancialmente na aplicabilidade do modelo. Em primeiro lugar a consideração de sistemática de uma política de dois estágios pode ser difícil gerenciar. Em segundo lugar, na prática, uma grande quantidade de dispositivos apresenta um estado de defeito que antecede a falha, o que torna mais efetivo a realização de ações de verificação de estado (inspeções).

As premissas do modelo proposto por Cavalcante (2016) são apresentadas a seguir:

- Modelo *delay time* com inspeção imperfeita e com horizonte infinito;
- Modelo com três estados possíveis para o sistema: operacional (funcionamento normal), defeituoso (não está em funcionamento ideal) e falho (encontra-se inoperante);

- Presença de componentes heterogêneos (fraco e forte).

Considerando que a inspeção é imperfeita, os erros humanos incorporados ao modelo são: falso positivo e falso negativo. A presença do parâmetro de mistura entre componentes fracos e fortes pode significar que, todos os dispositivos em estoque são fortes, contudo, há uma probabilidade de que durante a instalação o dispositivo seja danificado, apresentado um comportamento de falha prematura. Tal erro pode ocorrer durante a atividade de manutenção preventiva (que consiste na substituição do sistema).

Nesse sentido, o modelo de Cavalcante (2016) incorpora dois problemas de naturezas diferentes: os erros de julgamentos (Falso positivo e Falso Negativo) e os erros cometidos na instalação, que comprometem a confiabilidade do dispositivo, que em vez de apresentar um comportamento esperado, comporta-se como um dispositivo fraco, com uma vida característica bem menor do que a vida de um dispositivo que não foi comprometido durante a instalação. As variáveis de decisão do modelo são: T e M .

Distribuição Exponencial

Considera-se que duas variáveis se comportam segundo uma distribuição exponencial: O delay time (H) e a demanda pelo sistema de prontidão (μ).

Doane e Seward (2014) afirmam que a distribuição exponencial tem como foco o tempo de espera até o próximo evento. Almeida e Souza (2001), por sua vez, explicam que é uma distribuição muito aplicada em confiabilidade. É importante para modelar a fase operacional quando a taxa de falha $\lambda(t)$ é constante.

A função da confiabilidade e a função densidade de probabilidade para esta distribuição são apresentadas nas equações (1) e (2), considerando t uma variável aleatória:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1)$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2)$$

Distribuição Weibull

Assume-se que o tempo até a chegada do defeito (X) é uma variável aleatória que pode ser modelada pela distribuição Weibull.

Almeida e Souza (2001) afirma a Distribuição Weibull é muito aplicada em confiabilidade, sua função confiabilidade e a função relativa a taxa de falhas são representadas pelas equações (3) e (4):

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t}{\eta}\right]^\beta} \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta}\right]^{\beta-1} \quad (4)$$

Descrição do modelo

Conforme mencionado anteriormente, Cavalcante (2016) na elaboração do modelo, considerou-se uma política de inspeção de uma fase com uma substituição preventiva programada, para um sistema de prontidão composto por um soquete e um dispositivo. A interação entre os dois componentes provê ao sistema uma determinada função. Nesse sentido o AMV proporciona a um trecho de linha ferroviária a função de modificação de vida. Percebe-se que a linha não depende do AMV para que os trens transitem por ela, contudo, em circunstâncias especiais, que exigem a modificação de via ou manobras, o AMV é demandado para funcionar. A irregularidade da demanda, bem como a especificidade da função demandada, é uma característica peculiar de sistemas de prontidão.

Na Tabela 3, em relação a variável que descreve o tempo até a chegada do defeito (X), a variável da distribuição de densidade de probabilidade tem relação com as seguintes equações: Distribuição de densidade de probabilidade de X para componentes fracos (Equação 5) e fortes (Equação 6), Distribuição da densidade total da probabilidade de X envolvendo o parâmetro da mistura (Equação 7).

As variáveis da distribuição de densidade de probabilidade, da distribuição acumulada e a confiabilidade em relação ao *delay time* têm como equações: Distribuição de densidade de probabilidade de H (Equação 8), Distribuição acumulada de H (Equação 9) e a Confiabilidade de H (Equação 10).

Funções/parâmetros	Definições
$f_x(x)$	Distribuição de densidade de probabilidade de X
$F_x(x)$	Distribuição acumulada de X
$f_h(h)$	Distribuição de densidade de probabilidade de H
$F_h(h)$	Distribuição acumulada de H
$R_x(x)$	Confiabilidade de X
$R_h(h)$	Confiabilidade de H
$\eta 1$	Parâmetro de escala do componente fraco
$\eta 2$	Parâmetro de escala do componente forte
$\beta 1$	Parâmetro da forma do componente fraco
$\beta 2$	Parâmetro da forma do componente forte

Tabela 3 – Notação para as fórmulas.
Fonte: Autor (2023).

$$f_x(x1) = [(\frac{\beta 1}{\eta 1}) (\frac{x}{\eta 1})^{\beta 1-1} e^{- (\frac{x}{\eta 1})^{\beta 1}}$$

(5)

$$f_X(x_2) = \left[\left(\frac{\beta^2}{\eta^2}\right)\left(\frac{x}{\eta^2}\right)^{\beta^2-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta^2}\right)^{\beta^2}}\right] \quad (6)$$

$$f_X(x) = (1-p)f_X(x_2) + pf_X(x_1) \quad (7)$$

$$f_H(h) = \lambda \exp(-\lambda h) \quad (8)$$

$$F_H(h) = 1 - \exp(-\lambda h) \quad (9)$$

$$R_H(h) = 1 - F_H(h) \quad (10)$$

O conhecimento destas fórmulas e de todas as variáveis (Tabela 4) têm como objetivo o entendimento dos cenários a seguir.

	Variáveis de entrada
X	Tempo até a chegada do defeito
$Y = X + H$	Tempo até a ocorrência da falha
H	<i>Delay time</i>
j	Denota o índice do intervalo em que o defeito surgiu
i	Denota o índice em que a substituição ocorre em i
η	Parâmetro de escala (Distribuição Weibull)
β	Parâmetro da forma (Distribuição Weibull)
λ	Tempo médio de <i>delay time</i>
MT	Tempo em que ocorre a substituição preventiva
s	Probabilidade de falso positivo
q	Probabilidade de falso negativo
$1-s$	Probabilidade de um verdadeiro negativo
$1-q$	Probabilidade de um verdadeiro positivo
p	Parâmetro da mistura (percentual de itens fracos ou de itens danificados durante a instalação)
c_i	Custo de inspeção
c_p	Custo da manutenção preventiva
cf	Custo da manutenção corretiva
μ	Demanda do sistema pelo funcionamento do AMV
CUD	Custo de indisponibilidade do AMV
dF	<i>downtime</i> decorrente da falha
dD	<i>downtime</i> decorrente do defeito
dP	<i>downtime</i> decorrente da substituição da preventiva
EC	Custo esperado
EL	Tempo de Ciclo esperado
ED	<i>Downtime</i> esperado

Variáveis de decisão

T	Intervalo entre inspeções
M	Número de inspeções

Tabela 4 – Notação das variáveis do modelo.
Fonte: Autor (2023).

Primeiro Cenário

Observando o modelo de Cavalcante (2016), o primeiro cenário corresponde a probabilidade de que ocorra a substituição após um verdadeiro positivo (PPVP). Considerando que o defeito chega no j -ésimo intervalo entre inspeções, e que é detectado na i -ésima inspeção ($i > j$), a probabilidade é representada pela Equação (11), para cada possível valor de i .

$$PPVP(T, i) = \sum_{j=1}^i (1-s)^{j-1} (q)^{i-j} (1-q) \int_{(j-1)T}^{iT} f(x) R_h(iT-x) dx \quad (11)$$

Tempo de ciclo esperado é representado pela equação 12:

$$EL_{PPVP}(T, i) = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^i (dP + iT)(1-s)^{j-1} (q)^{i-j} (1-q) \int_{(j-1)T}^{iT} f(x) R_h(iT-x) dx \quad (12)$$

O custo esperado é representado pela equação 13:

$$EC_{PPVP}(T, i) = \sum_{i=1}^{M-1} (ici + cp) \sum_{j=1}^i (1-s)^{j-1} (q)^{i-j} (1-q) \int_{(j-1)T}^{iT} f(x) R_h(iT-x) dx \quad (13)$$

O Downtime esperado é representado pela equação 14:

$$ED_{PPVP}(T, i) = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^i (dD)(1-s)^{j-1} (q)^{i-j} (1-q) \int_{(j-1)T}^{iT} f(x) R_h(iT-x) dx \quad (14)$$

Segundo Cenário

Observando o modelo de Cavalcante (2016) o 2º cenário corresponde à probabilidade de substituição por falha dentro do mesmo intervalo, chamaremos aqui de probabilidade de substituição após um verdadeiro negativo. Para cada possível valor de i , a probabilidade é representada pela equação 15:

$$PFVN(T, i) = (1-s)^i \int_{iT}^{(i+1)T} f(x) F_h((i+1)T-x) dx \quad (15)$$

Como o dispositivo é de prontidão, então a falha é observada na inspeção posterior, ou seja, em $(i+1)$. Nesse sentido o número de inspeções, nesse cenário, é sempre $(i+1)$. Sendo assim, o verdadeiro negativo ocorre em i , a falha é observada em $(i+1)$.

O tempo de ciclo esperado é representado pela equação 16:

$$EL_{PFVN}(T, i) = \sum_{i=1}^{M-1} ((i+1)T + dF) PFVN(T, i) \quad (16)$$

O custo esperado é representado pela equação 17:

$$EC_{PFVN}(T, i) = \sum_{i=1}^{M-1} ((i+1)c_i + cf) PFVN(T, i) \quad (17)$$

O *Downtime* esperado é representado pela equação 18:

$$ED_{PFVN}(T, i) = \sum_{i=1}^{M-1} (1-s)^i \int_{iT}^{(i+1)T} f(x) \int_0^{(i+1)T-x} dF + (i+1)T - (x+h)fh(h)dh dx \quad (18)$$

Terceiro Cenário

Observando o modelo de Cavalcante (2016) o 3º cenário consiste da falha antes da primeira inspeção. A probabilidade é representada pela equação 19:

$$PF0(T) = \int_{iT}^{(i+1)T} f(x) Fh((i+1)T - x) dx \quad (19)$$

Só é possível para $i = 0$ representada pela equação 20:

$$PF0(T) = \int_0^T f(x) Fh(T - x) dx \quad (20)$$

O tempo esperado será representado pela equação 21:

$$EL_{PF0}(T) = (dF + T) \int_0^T f(x) Fh(T - x) dx \quad (21)$$

O custo esperado será representado pela equação 22:

$$EC_{PF0}(T) = (c_i + cf) \int_0^T f(x) Fh(T - x) dx \quad (22)$$

O *Downtime* esperado será representado pela equação 23:

$$ED_{PF0}(T) = (dF + T) \int_0^T f(x) \int_0^{T-x} (T - (x+h))f(h)dh dx \quad (23)$$

Quarto Cenário

Observando o modelo de Cavalcante (2016) o 4º cenário é quando a substituição ocorre devido a um falso positivo. A probabilidade de substituir devido a um falso positivo, para cada possível i é representada pela Equação 24:

$$PPFP(T,i) = (1-s)^{(i-1)} s \int_{iT}^{\infty} f(x)dx \quad (24)$$

Não é necessário índice j , pois o defeito não surge antes da substituição. O ciclo esperado é representado pela equação 25 e o custo é representado pela equação 26:

$$EL_{PPFP}(T,i) = \sum_{i=1}^{M-1} (iT + dP)(1-s)^{i-1} s \int_{iT}^{\infty} f(x)dx \quad (25)$$

$$EC_{PPFP}(T,i) = \sum_{i=1}^{M-1} (ici + cp)(1-s)^{i-1} s \int_{iT}^{\infty} f(x)dx \quad (26)$$

O *Downtime* é dado pela equação 27:

$$ED_{PPFP}(T,i) = \sum_{i=1}^{M-1} (dP)(1-s)^{i-1} s \int_{iT}^{\infty} f(x)dx \quad (27)$$

Quinto Cenário

Observando o modelo de Cavalcante (2016) o 5º cenário é a probabilidade de substituir por falha após um falso negativo é dada pela equação 28:

$$PFFN(T,i) = \sum_{j=1}^i (1-s)^{j-1} (q)^{i-j+1} \int_{(i-1)T}^{iT} f(x) \int_{iT-x}^{(i+1)T-x} f(h)dhdx \quad (28)$$

Observe que similar ao que ocorre no 2º Cenário, o número de inspeções é $(i+1)$ uma vez que a falha só será observada na próxima inspeção. O ciclo esperado é representado pela equação 29 e o custo será dado por 30:

$$EL_{PFFN}(T,i) = \sum_{i=1}^{M-1} ((i+1)T + dF) \sum_{j=1}^i (1-s)^{j-1} (q)^{i-j+1} \int_{(j-1)T}^{iT} f(x) \int_{iT-x}^{(i+1)T-x} f(h)dhdx \quad (29)$$

$$EC_{PFFN}(T,i) = \sum_{i=1}^{M-1} ((i+1)ci + cf) \sum_{j=1}^i (1-s)^{j-1} (q)^{i-j+1} \int_{(j-1)T}^{iT} f(x) \int_{iT-x}^{(i+1)T-x} f(h)dhdx \quad (30)$$

O *Downtime* é representado pela expressão 31:

$$ED_{PFFN}(T,i) = \sum_{i=1}^{M-1} ((i+1)T + dF) \sum_{j=1}^i (1-s)^{j-1} (q)^{i-j+1} \int_{(j-1)T}^{iT} f(x) \int_{iT-x}^{(i+1)T-x} (i+1)T - (x+h)f(h)dhdx \quad (31)$$

Sexto Cenário

Observando o modelo de Cavalcante (2016) o 6º Cenário representa a substituição preventiva. A probabilidade de substituir preventivamente é representada pela equação 32.

A substituição preventiva pode ocorrer em três circunstâncias:

Primeira circunstância é quando o defeito surge antes de $M-1$ e ocorrem falsos negativos até $M-1$, e não ocorre falha entre $(M-1)T$ e MT . A segunda circunstância diz respeito a situação em que o defeito surge no intervalo $[(M-1)T, MT]$ e o *delay time* é superior ao tempo remanescente para MT , nesse sentido, anterior a MT só há verdadeiro negativo, sendo o item substituído em MT . A terceira e última circunstância diz respeito à

situação em que a chegada do defeito só ocorre posterior a MT .

$$PPMT(T, M) = \sum_{j=1}^{M-1} (1-s)^{j-1} (q)^{(M-j)} \int_{(j-1)T}^j f(x) \int_{MT-x}^{\infty} f(h) dh dx + (1-s)^{M-1} \int_{(M-1)T}^{MT} f(x) \int_{MT-x}^{\infty} f(h) dh dx + (1-s)^{M-1} \int_{MT}^{\infty} f(x) dx \quad (32)$$

O ciclo esperado é representado pela equação 33 e o custo é representado pela equação 34.

$$EL_{PPMT}(T, M) = (dP + MT)PPMT(T, M) \quad (33)$$

$$EC_{PPMT}(T, M) = (cp + Mci)PPMT(T, M) \quad (34)$$

Finalmente o *Downtime* é representado pela equação (35):

$$ED_{PPMT}(T, M) = (dP)PPMT(T, M) \quad (35)$$

Logo, para uma política com as variáveis de decisão T e M temos a demonstração analítica dos cenários com a função de obter o ciclo esperado total (EL), custo esperado total (EC) e downtime esperado total (ED), representados a seguir pelas equações 36, 37 e 38 respectivamente:

$$EL_{total}(T, M) = EL_{PF0}(T) + \sum_{i=1}^{M-1} (EL_{PPVP}(T, i) + EL_{PFFN}(T, i) + EL_{PFVN}(T, i) + EL_{PPFP}(T, i)) + EL_{PPMT}(T, M) \quad (36)$$

$$EC_{total}(T, M) = EC_{PF0}(T) + \sum_{i=1}^{M-1} (EC_{PPVP}(T, i) + EC_{PFFN}(T, i) + EC_{PFVN}(T, i) + EC_{PPFP}(T, i)) + EC_{PPMT}(T, M) \quad (37)$$

$$ED_{total}(T, M) = ED_{PF0}(T) + \sum_{i=1}^{M-1} (ED_{PPVP}(T, i) + ED_{PFFN}(T, i) + ED_{PFVN}(T, i) + ED_{PPFP}(T, i)) + ED_{PPMT}(T, M) \quad (38)$$

Ao obter os resultados do ciclo esperado total e custo esperado total, a função objetivo é minimizar o custo total em relação a unidade de tempo: (EC_{total}/EL_{total}) , onde o menor valor desta relação será obtido a partir das variáveis de decisão T e M .

Além disso é importante frisar que as consequências relacionadas às perdas, por não atendimento da demanda, podem influenciar os custos, por exemplo, uma falha no sistema prontidão impossibilita o transporte de pessoas no sistema ferroviário e consequentemente diminuindo o lucro da organização.

Pelo fato da demanda ser um fator importante e a ser uma influência sobre os custos, a fórmula do custo total tem relação do *downtime* esperado total e do custo total com as variáveis de entrada CUD e μ , tem a função de analisar como a indisponibilidade do AMV influência na ocorrência de catástrofes e no aumento dos custos, por exemplo, perdas

humanas em função do choque de trens. A equação 39 mostra a relação das variáveis envolvidas com o custo da política adotada (Min C_2).

$$C_2 (T,M) = \frac{EC_{total}(T,M) + \mu * CUD * ED_{total}(T,M)}{EL_{total}(T,M)} \quad (39)$$

Além dos custos, a disponibilidade (A) também será calculada como forma de avaliar a influência do fator humano na disponibilidade do sistema. A equação 40 tem a relação da disponibilidade com *downtime* esperado e o ciclo esperado total.

$$A (T,M) = 1 - \frac{ED_{total}(T,M)}{EL_{total}(T,M)} \quad (40)$$

A partir da relação dos cenários com as fórmulas acima, a aplicação do modelo será feita no próximo capítulo, para demonstrar como possíveis erros humanos podem influenciar nas variáveis de um sistema de prontidão.

APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para aplicação numérica serão admitidos valores para cada parâmetro do modelo *delay time* para sistema de prontidão. O modelo é composto por componentes heterogêneos, conforme dito nas premissas, sendo assim serão admitidos os valores de $\eta_1 = 2$ e $\beta_1 = 2,5$ para o componente fraco e $\eta_2 = 18$ e $\beta_2 = 5$ para o componente forte.

Em função também da heterogeneidade do sistema, para o parâmetro da mistura será considerado o parâmetro p , no percentual de 0.10, ou seja, 10% do total de componentes são danificados durante a instalação, comportando-se como itens fracos, que apresentam falhas prematuras.

No modelo será considerada a presença dos erros de julgamento, considerou-se a probabilidade do falso positivo (s) e a probabilidade do falso negativo (q), onde a variação destas probabilidades pode influenciar o custo.

No modelo é considerado o custo de inspeção, $c_i = 1$ unidade monetária, incorrido pela implementação de uma política que inclui manutenção preditiva, na qual, as inspeções feitas no sistema têm o objetivo de monitorar o estado do componente. Os outros custos são: o custo da preventiva $c_p = 12$ unidades monetárias, podendo estar presente em três cenários (verdadeiro positivo, falso positivo ou na substituição preventiva) e o custo da corretiva $c_r = 18$ unidades monetárias, está em outros três cenários como: verdadeiro negativo, falso negativo e falha antes da primeira inspeção.

E com o auxílio de um software, buscando sempre uma convergência dos valores, a partir das variáveis de decisão T e M e das variáveis de entrada, a disponibilidade e o custo foram obtidos. O estudo da influência de todos os parâmetros do modelo foi realizado com intuito de analisar se as variações em torno desses parâmetros contribuem para um aumento ou redução dos custos e/ou disponibilidade.

O estudo de todas variáveis foi realizado no intuito de analisar se haverá maximização ou minimização dos custos e/ou disponibilidade para devidas análises. Sendo que além destas variáveis, outras serão citadas no decorrer das análises feitas a seguir.

Observando a Tabela 5, na primeira linha as probabilidades de falso positivo e falso negativo são nulas e o custo tem um valor de 3,14. Analisando da primeira até a terceira linha, o aumento da probabilidade do falso positivo fez o número de inspeções (M) diminuir e o intervalo entre as inspeções (T) aumentar, isso acontece para evitar que o inspetor incorra em mais erros, como a substituição antecipada de um item em estado operacional devido a um falso positivo.

É possível observar que os resultados são consistentes com o que é esperado,

nesse sentido, ao se aumentar as chances de erro de julgamento (falso positivo) que resulte na decisão de substituir componentes que estão bons, o modelo indica que para evitar tal distorção é importante reduzir os eventos em que tais erros de julgamento podem ocorrer, ou seja, diminuir a frequência das inspeções.

	Parâmetros da mistura					Custos					downtimes			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)					
Linha	β_1	η_1	β^2	η_2	p	λ	c_i	c_p	c_f	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.83	0.997	3.14
2	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0	min C ₂	13	0.98	0.9957	3.95
3	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0	min C ₂	12	1.17	0.994	4.79

Tabela 5 – Variação do número de inspeções e intervalo entre inspeções em relação ao falso positivo.
Fonte: Autor (2023).

E ao observar a linha 4 e a linha 5 (Tabela 6) houve um aumento do q (probabilidade do falso negativo), neste caso em vez de diminuir o número de inspeções até uma substituição preventiva, houve um aumento do número de inspeções para reduzir as chances de um defeito permanecer no sistema, gerando assim o aumento do custo.

	Parâmetros da mistura					Custos					downtimes			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)					
Linha	β_1	η_1	β_2	η_2	p	λ	c_i	c_p	c_f	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.83	0.997	3.14
2	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0	min C ₂	13	0.98	0.9957	3.95
3	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0	min C ₂	12	1.17	0.994	4.79
4	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.1	min C ₂	13	0.86	0.9966	3.23
5	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.2	min C ₂	14	0.81	0.9965	3.32

Tabela 6 – Variação do número de inspeções e intervalo entre inspeções em relação ao falso negativo.
Fonte: Autor (2023).

Observa-se que a variação de probabilidades de falso positivo e/ou falso negativo, resultou no aumento do custo, isso pode ser consequência de uma substituição preventiva desnecessária, no primeiro caso, ou um defeito não detectado, na segunda situação, levando à falha do sistema.

Aumento da probabilidade de falso positivo e/ou falso negativo acabam influenciando uma das funções do AMV que é evitar a interdição de vias, para que o deslocamento dos vagões de cargas com materiais e de trens de passageiros sejam realizados de maneira eficaz.

Levando em consideração a outra premissa do modelo, a presença de três estados (operacional, defeituoso e falho), o λ é o inverso do tempo médio de permanência no estado defeituoso. Neste sentido, a medida em que se aumenta o λ menos tempo o dispositivo sustentará o defeito, ou seja, mais rápido entrará em estado de falha.

Na Tabela 7 da linha 1 até a linha 3, mantendo o mesmo número de inspeções $M = 14$, o aumento do λ fará com que o custo tenha um aumento, mesmo não havendo erros de julgamento, isso aconteceu porque o intervalo entre as inspeções diminui e, consequentemente, mantendo o sistema menos disponível, com o objetivo de identificar o defeito e evitar o estado de falha do componente, consequentemente, repercutindo em um aumento de custo.

	Parâmetros da mistura						Custos				downtimes			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)					
Linha	g1	g1	g2	g2	p	λ	ci	cp	cf	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C2	14	0.83	0.997	3.14
2	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C2	14	0.77	0.9957	3.68
3	2.5	2	5	18	.10	12	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C2	14	0.75	0.995	3.92

Tabela 7 – Variação do λ .
Fonte: Autor (2023).

Mantendo o valor do λ igual a 6 (Tabela 8), observa-se a linha 8 e a linha 9, o comportamento do número de inspeções e o aumento do intervalo entre as inspeções em relação ao falso positivo é o mesmo da linha 1 e 2 quando o λ é igual a 2, ou seja, houve um aumento de T e redução de M , ao aumentar s . E observando as linhas 11 e 12 (Tabela 8) a probabilidade do falso negativo aumentou, número de inspeções aumentaram e o intervalo entre elas diminuíram, mesmo comportamento referente a linha 4 e 5 quando o λ é igual a 2.

	Parâmetros da mistura						Custos					downtimes			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)				
Linha	g1	g1	g2	g2	p	λ	ci	cp	cf	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.83	0.997	3.14
2	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0	min C ₂	13	0.98	0.9957	3.95
3	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0	min C ₂	12	1.17	0.994	4.79
4	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.1	min C ₂	13	0.86	0.9966	3.23
5	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.2	min C ₂	14	0.81	0.9965	3.32
6	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0.1	min C ₂	13	0.97	0.9953	4.07
7	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0.2	min C ₂	12	1.15	0.9931	5.10
8	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.77	0.9957	3.68
9	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0	min C ₂	13	0.91	0.9938	4.65
10	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0	min C ₂	12	1.09	0.9916	5.65
11	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.1	min C ₂	13	0.81	0.9953	3.74
12	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.2	min C ₂	14	0.76	0.9954	3.78
13	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0.1	min C ₂	13	0.91	0.9936	4.72
14	2.5	2	5	18	.10	6	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0.2	min C ₂	12	1.09	0.991	5.81

Tabela 8 – Relação do λ com os erros de julgamento.
Fonte: Autor (2023).

Outro parâmetro muito importante é o *downtime*, que significa o tempo de inatividade. No modelo são estabelecidos três tempos de inatividade: *downtime* da falha *dF* (tempo que fica fora de operação para substituir um componente em estado de falha), *downtime* do defeito *dD* (tempo que fica fora de operação para substituir um componente com defeito)

e o *downtime* da substituição preventiva *dP* (tempo que fica fora de operação para uma substituição programada), cada um deles, foram associados aos cenários representados no capítulo anterior.

A Tabela 9 mostra o comportamento dos custos incorridos para implementação da política de manutenção para os diversos *dF*, mantendo as probabilidades de *s* e *q*.

Linha	Parâmetros da mistura							Custos				<i>downtimes</i>			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)				
	β^1	η^1	β^2	η^2	p	λ	c_l	c_p	c_f	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.003	0.0025	0.001	0.2	0.2	min C_2	11	1.19	0.993	5.05
2	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.010	0.0025	0.001	0.2	0.2	min C_2	10	1.24	0.9927	5.06

Tabela 9 – Relação do *downtime* com os custos.
Fonte: Autor (2023).

Para o entendimento da influência do *downtime* em um sistema de prontidão, um aumento do *downtime* da falha de 0.003 h para 0.010 h e mantendo as probabilidades de falso positivo e falso negativo em 0.2, observou-se uma diminuição do número de inspeções (*M*) da linha 1 para linha 2. Isto se explica pelo fato de que um tempo de inatividade maior, mantendo-se as probabilidades *e* , o objetivo de minimização do custo da política adotada (C_2) irá permitir que um *seja* maior, entretanto com *menor*, para evitar o aumento ainda maior do custo, devido a possibilidade do aumento de erros humanos ao realizar as inspeções.

Diminuir a disponibilidade do sistema para fazer a substituição de um componente ao falhar pode ser viável, porém, um sistema de prontidão indisponível pode não ser desejável à organização, visto que, o seu tempo de atividade permitirá a locomoção de pessoas e de cargas, gerando receitas ao negócio. Além disso, destaca-se a possibilidade de ocorrer erros humanos na substituição do componente, afetando a sua taxa de falha de forma não previsível.

Afirma Cavalcante (2009) que a disponibilidade é uma característica aplicada a sistemas reparáveis e dá uma noção de desempenho de um item, sendo assim o desempenho do sistema de prontidão pode ser influenciado pelos erros de julgamento.

Na Tabela 10 a disponibilidade sofre variações à medida que a probabilidade do falso positivo e/ou falso negativo aumentam ou diminuem, neste caso uma substituição preventiva desnecessária ou ausência de ação planejada por parte de um inspetor pode ter levado por exemplo, o componente ao defeito e/ou a falha, aumentando os custos.

	Parâmetros da mistura							Custos				downtimes			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)				
Linha	β_1	η_1	β_2	η_2	p	λ	c_1	c_p	c_f	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.83	0.997	3.14
2	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0	min C ₂	13	0.98	0.9957	3.95
3	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0	min C ₂	12	1.17	0.994	4.79
4	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.1	min C ₂	13	0.86	0.9966	3.23
5	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.2	min C ₂	14	0.81	0.9965	3.32
6	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0.1	min C ₂	13	0.97	0.9953	4.07
7	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0.2	min C ₂	12	1.15	0.9931	5.10

Tabela 10 – Relação disponibilidade e custos com os erros de julgamento.

Fonte: Autor (2023).

Como o sistema de prontidão é formado por componentes heterogêneos, o parâmetro da mistura (p) sofreu variações, com a função de demonstrar como os custos podem ser influenciados por dois tipos de erros (erros de julgamento e erros de instalação).

O parâmetro de mistura é o percentual de erros de instalação no sistema, ou seja, quanto menor o percentual de itens fracos, maior a disponibilidade do sistema e consequentemente haverá menos custo. As possibilidades analisadas a seguir podem ocorrer variação ou não nos parâmetros da mistura.

Considerando que a qualidade dos componentes por parte dos fornecedores é diferente (existência de componentes fracos e fortes no sistema), a situação analisada na Tabela 11 onde o parâmetro da mistura sofreu uma redução de 0.10 (linha 1) para 0.05 (linha 8) e depois teve um aumento para 0.15 (linha 15). Observe que ao reduzir o percentual de erros de instalação no sistema, mantendo o número de inspeções, haverá o aumento da disponibilidade (A) e o custo diminui.

É importante observar, que mesmo não havendo erros de julgamento, houve a presença dos erros de instalação, podendo concluir que para o sistema de prontidão, quanto menor o percentual de erros de instalação, melhor para o funcionamento do sistema.

	Parâmetros da mistura							Custos				downtimes			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)				
Linha	β_1	η_1	β_2	η_2	p	λ	c_1	c_p	c_f	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.10	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.83	0.997	3.14
2	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.84	0.9977	2.88
3	2.5	2	5	18	.15	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.83	0.9962	3.24

Tabela 11 – A variação do parâmetro da mistura.

Fonte: Autor (2023).

Ao analisar o parâmetro de mistura (Tabela 12), p igual a 0.05 (linha 1 a linha 7) mediante a variação dos erros de julgamento, verificou-se a diminuição da disponibilidade e no aumento do custo. As seguintes situações relacionadas a esta possibilidade são apresentadas a seguir.

	Parâmetros da mistura					Custos					downtimes			Falso positivo	Falso negativo	Valores ótimos para as variáveis de decisão (intervalo entre inspeções, disponibilidade e custo)					
Linha	θ_1	η_1	θ_2	η_2	p	λ	c _i	c _p	c _f	μ	CUD	dF	dD	dP	s	q		M	T	A	Custo
1	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0	min C ₂	14	0.84	0.9977	2.88
2	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0	min C ₂	13	1	0.9969	3.52
3	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0	min C ₂	12	1.72	0.995	3.84
4	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.1	min C ₂	13	0.98	0.9974	2.89
5	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0	0.2	min C ₂	14	0.68	0.9971	2.95
6	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.1	0.1	min C ₂	13	1.15	0.9965	3.47
7	2.5	2	5	18	.05	2	1	12	18	.01	25000	0.005	0.0025	0.001	0.2	0.2	min C ₂	12	1.35	0.9952	4.14

Tabela 12 – Parâmetro da mistura x erros de julgamento.
Fonte: Autor (2023).

Pode haver erros de julgamento e erros de instalação juntos, onde a retirada de um componente forte do sistema através de um erro de julgamento (falso positivo) teria como substituição outro componente forte, mas o inspetor por falta de treinamento, por exemplo, faz uma má instalação do novo componente (comete erro de instalação).

Seja o aumento do percentual de mistura de itens fracos ou havendo apenas a variação da probabilidade de falso positivo e falso negativo mantendo o mesmo percentual, os custos deverão aumentar. É extremamente importante que não exista nenhuma dessas ações: a retirada ou a má instalação do componente forte e/ou a escolha de um componente fraco para instalar no sistema de prontidão. Qualquer uma destas situações poderá ter consequências graves, pois em um sistema ferroviário o deslocamento e a direção dos trens dependem do desempenho dos AMV's.

Outra variável de grande importância é o *CUD* (custo de indisponibilidade do AMV), que estará relacionado ao μ (demanda), e a relação *CUD* x μ é relevante para se efetuar as análises de consequências. O *CUD* é diretamente proporcional ao grau de desastre se o AMV ficar indisponível, ou seja, quanto mais o AMV permanecer indisponível, maior será o desastre, consequentemente o *CUD* x μ será maior.

Para contextualizar, pode-se supor que dois trens de passageiros estão em mesma via, e o AMV não funciona, causando acidente e gerando perdas humanas, nesse caso *CUD* x μ pode ser extremamente alto.

No modelo foi considerada a situação na qual o sistema em estado de falha e com a presença de demanda, por exemplo, dois trens de passageiros em uma mesma via e quando acionar o AMV, o mesmo estará em estado de falha e como consequência haverá perdas humanas. Ao analisar como se comportam as variáveis, considerando $\mu = 0.01$ e a variação de *CUD* de 10000, 25000 e 75000, tem o propósito de representar diferentes cenários onde haverá consequências econômicas em função da falha do AMV.

Na Tabela 13 mantendo o mesmo número de inspeções $M=14$ (linha 1, linha 8 e

linha 15) e observando que a probabilidade do falso positivo e do falso negativo são nulas nas três linhas, verifica-se que o intervalo entre inspeções sofre uma redução à medida que aumenta o *CUD*, com o objetivo de evitar o desastre, as inspeções se tornam mais frequentes e consequentemente haverá o aumento do custo.

Ao observar a relação do *CUD* com os custos da política de manutenção (Tabela 14), considerou-se a presença de erros humanos (erros de julgamento) e analisou-se os dados da linha 1 até a linha 7. Nestas situações, o valor do *CUD* atribuído foi de 10000, e efetuou-se a variação das probabilidades de falso positivo e falso negativo, à medida que existe erro de julgamento, o que demonstrou que a disponibilidade diminuiu enquanto os custos aumentaram.

	Custo da indisponibilidade do AMV	Probabilidade do falso positivo	Probabilidade do falso negativo	Número de inspeções	Intervalo entre inspeções	Disponibilidade	Custo
	CUD	s	q	M	T	A	C
1	10000	0	0	14	0.96	0.9952	2.59
2	10000	0.1	0	13	1.16	0.9932	3.16
3	10000	0.2	0	12	2.01	0.9889	3.43
4	10000	0	0.1	13	1	0.9948	2.62
5	10000	0	0.2	14	0.94	0.9947	2.69
6	10000	0.1	0.1	13	1.15	0.9929	3.23
7	10000	0.2	0.2	12	1.99	0.988	3.57
8	25000	0	0	14	0.83	0.997	3.14
9	25000	0.1	0	13	0.98	0.9957	3.95
10	25000	0.2	0	12	1.17	0.994	4.79
11	25000	0	0.1	13	0.86	0.9966	3.23
12	25000	0	0.2	14	0.81	0.9965	3.32
13	25000	0.1	0.1	13	0.97	0.9953	4.07
14	25000	0.2	0.2	12	1.15	0.9931	5.10
15	75000	0	0	14	0.69	0.9981	4.29
16	75000	0.1	0	13	0.79	0.9971	5.64
17	75000	0.2	0	12	0.9	0.9961	7.11
18	75000	0	0.1	13	0.71	0.9977	4.56
19	75000	0	0.2	14	0.67	0.9977	4.68
20	75000	0.1	0.1	13	0.78	0.9969	5.92
21	75000	0.2	0.2	12	0.87	0.9954	7.84

Tabela 13 – CUD x Variação T.
Fonte: Autor (2023).

	Custo da indisponibilidade do AMV	Probabilidade do falso positivo	Probabilidade do falso negativo	Número de inspeções	Intervalo entre inspeções	Disponibilidade	Custo
	CUD	s	q	M	T	A	C
1	10000	0	0	14	0.96	0.9952	2.59
2	10000	0.1	0	13	1.16	0.9932	3.16
3	10000	0.2	0	12	2.01	0.9889	3.43
4	10000	0	0.1	13	1	0.9948	2.62
5	10000	0	0.2	14	0.94	0.9947	2.69
6	10000	0.1	0.1	13	1.15	0.9929	3.23
7	10000	0.2	0.2	12	1.99	0.988	3.57

Tabela 14 – CUD x Erros de julgamento.
Fonte: Autor (2023).

Verifica-se, portanto, que o aumento do custo ocorrerá em duas situações: Primeiramente variando o *CUD* e considerando a não ocorrência de erros humanos, e a segunda situação mantendo o mesmo valor do *CUD*, porém com variação ocorrendo nas probabilidades de falso positivo e falso negativo.

Assim este capítulo teve como proposta uma aplicação numérica. No próximo capítulo será apresentado as conclusões da pesquisa e será apresentada uma proposta de trabalhos futuros relacionada à sistemática desta pesquisa.

CONCLUSÕES

As empresas atualmente investem em sistemas tecnológicos de uma tal maneira, que o homem precisa se adequar para usá-los, caso contrário, possíveis erros humanos podem ser responsáveis por perdas materiais e humanas. Sendo assim, os fatores humanos vêm recebendo constante atenção em relação às estatísticas de acidentes, no âmbito do sistema ferroviário, em alguns casos os erros humanos são os principais contribuintes para acidentes.

Apesar de haver inúmeras publicações que abordam o contexto de erros humanos em atividades de manutenção, a pesquisa realizada teve análises mais elaboradas para o caso principal, que são erros humanos em atividades de manutenção para sistemas de prontidão em ferrovias, levando em consideração a presença de vários objetivos na pesquisa.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral explorar de forma quantitativa uma política de manutenção com base no conceito de *delay time* para sistema de prontidão, analisando como os custos e a disponibilidade poderiam ser influenciados pela presença de erros humanos em atividades de manutenção em um AMV.

Foram referenciados o conceito de manutenção imperfeita, conceito de erro humano e as suas diversas classificações, houve o entendimento de alguns modelos voltados para a inspeção imperfeita e de modelos para sistema de prontidão com inspeção imperfeita. Isso para demonstrar como estes conceitos estão interligados a modelos, no intuito de avaliar os custos de uma organização.

Prova disso, é que no campo da manutenção existe muitos modelos voltados para inspeção e manutenção imperfeita, onde pesquisadores demonstram que erros humanos podem influenciar uma atividade, resultando em perdas financeiras e humanas. Estes modelos podem ajudar a entender como possíveis funções de performance podem ser avaliadas na presença de erros humanos.

Baseados nas premissas do modelo de Cavalcante (2016) foram feitas algumas considerações para o sistema de prontidão (AMV), foram destacados na pesquisa seis cenários, no intuito de entender como as variáveis estavam envolvidas e como poderiam ser influenciadas pelos erros de julgamento e erros de instalação, ambos trabalhados no decorrer da pesquisa.

Após as considerações do modelo de Cavalcante (2016) para definir uma pol de manutenção para o AMV, foi realizada uma aplicação numérica, onde através da presença de erros humanos em sistemas de prontidão em ferrovias, as variáveis de decisão (T , M)

permitiram mensurar o custo total e a disponibilidade do sistema.

Ao adaptar o modelo de Cavalcante (2016) ao sistema sob estudo, foi destacada a importância de uma revisão periódica e sem a presença de erros humanos ou tão pequena quanto possível, como foi observada em uma das variáveis mais importantes no modelo, o *CUD*, que tem relação com a demanda (μ), quanto maior o grau de desastre, mais o inspetor diminui o intervalo entre inspeções (T), intensificado as atividades para manter o sistema disponível e com muito cuidado para não haver ocorrência de erros de julgamento e/ou erros de instalação, mesmo que com a revisão periódica, tenha a possibilidade do aumento do custo.

As empresas podem traçar ações de melhorias para evitar erros humanos, por exemplo, capacitação de mantenedores (realização e eficácia) e instrumental adequados à manutenção, estabelecimento de procedimentos de manutenção e a implementação da política de manutenção adequada com fins de aumentar a disponibilidade e reduzir custos e consequências.

Em relação aos fornecedores que podem influenciar na presença da diferença de qualidade entre componentes, as empresas podem estabelecer ações como: qualificação de fornecedores (seleção e monitoramento do desempenho dos componentes), implementar condições favoráveis ao transporte e armazenamento dos componentes, além de observar possíveis influências externas durante a instalação.

Conclui-se que os objetivos inicialmente propostos, foram alcançados com êxito e o modelo se mostrou de forma satisfatória, em um sistema de prontidão em ferrovias, fazendo uso do conceito do *delay time*, para um horizonte infinito. A pesquisa além de contribuir para uma visão de como evitar a presença de erros humanos em atividades de manutenção, um trabalho de aproximação entre pesquisadores e as empresas, onde o pesquisador ao estudar e avaliar este sistema de prontidão, torna o conhecimento público, acaba ajudando às organizações a obter lucro e de certa forma evitando acidentes, ou seja, teoria e a prática, respectivamente, contribuindo de forma positiva para ambos.

TRABALHOS FUTUROS

O processo da pesquisa científica pode apresentar limitações, como é o caso deste estudo. Contudo, as limitações se dão, principalmente, a quantidade de número de inspeções avaliadas. Sabe-se ainda que o modelo pode ser realizado em uma análise mais robusta, variando por exemplo, *downtime* do defeito e o *downtime* da substituição preventiva em relação aos erros humanos.

Importante destacar ainda, que existe uma ampla possibilidade de explorar os

custos do modelo (custo da inspeção, corretiva e da preventiva), que foram consideradas como constantes. Podendo avaliar através da análise de sensibilidade, a influência dos erros de julgamento em relação aos custos totais.

Como o modelo da pesquisa é para o sistema de prontidão em ferrovias, podem ser colocadas para avaliação três situações: Choque, Esbarro e Encontro, influenciadas por erros de julgamento e/ou erros de instalação. Podendo avaliar não só em relação a perdas financeiras, mas também em relação a perdas humanas, além de avaliar em quais situações o CUD pode ser mais alto (Choque, Esbarro ou Encontro).

Podem ser avaliadas a relação da existência dos erros humanos e como podem impactar na imagem da empresa ou influenciar em questões ambientais, por exemplo, choque, esbarro ou encontro entre um trem de passageiros com vagões de minério próximo a uma represa. Neste caso além de perdas humanas, o impacto ambiental influenciaria a imagem da empresa perante ao mercado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.T; SOUZA, F.M.C. **Gestão da manutenção na direção da competitividade**. Recife: Universitária UFPE, 2001.

ALMEIDA, I.M. **Caminhos da análise de acidentes do trabalho**. Brasília: Ministério do Trabalho e do Emprego, 2003. 378p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 05462: **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1993. 30p.

BARROS, J.M.F.M. **Avaliação dos principais métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego utilizados em ferrovia nacional e internacional**. 2013. 174p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transporte) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BERRADE, M.D; SCARF, P.A; CAVALCANTE, C.A.V. Maintenance scheduling of a protection system subject to imperfect inspection and replacement. **European Journal of Operational Research**, v. 218, p. 716-725, 2012.

BERRADE, M.D; SCARF, P.A; CAVALCANTE, C.A.V. Modelling imperfect inspection over a finite horizon. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 111, p. 18-29, 2013.

BERRADE, M.D; SCARF, P.A; CAVALCANTE, C.A.V; DWIGHT, R.A. Imperfect inspection and replacement of a system with a defective state: A cost and reliability analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 120, p. 80-87, 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Transporte Terrestre. **Resolução nº 1431**, de 2006. Acidentes Ferroviários. Disponível em: < <http://www.antt.gov.br.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

CAVALCANTE, C.A.V. **Apostila de Engenharia de Manutenção**. Recife, [s.n.] 2009.

CAVALCANTE, C. A. V. Uma Proposta de Política de Manutenção para Sistemas de Prontidão Considerando Erros Humanos de Duas Naturezas. **Working Paper** do Grupo Random. Novembro de 2016.

CERVO, A.L; BERVIAN, P.A; SILVA, R.D. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo, Person Prentice Hall, 2007, 162p.

CORREA, C.R.P; CARDOSO JUNIOR, M.M. Análise e classificação dos fatores humanos nos acidentes industriais. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 186-198, 2007.

COSTELLA, M.F; SAURIN, T.A. Proposta de método para identificação de tipos de erros humanos. In: ENCONTRO NACIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25., 2005, Porto Alegre. **Anais Eletrônicos**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2005. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br.htm>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

DHILLON, B.S. Stochastic models for predicting human reliability. **Microelectron Reliab**, v. 22, n. 3, p. 491-496, 1982.

DOANE, D.P; SEWARD, L.E. **Estatística aplicada à Administração e Economia**. 4. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill Education, 2014. 826p.

DUNN, S. Managing Human Error in Maintenance. **Asset Management & Maintenance Journal**, v. 28, n. 4, p. 10-15, 2015.

FERRAZ, R.U.F. **Método para análise e classificação de erros humanos na manutenção de equipamentos no sistema elétrico de potência**. 2009. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

FERREIRA, R. J. P.; ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on *delay time* analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, n. 5, p. 905–912, 2009.

GASMI, S; MANNAL, N. Optimization Problems of Costs in a MultiState System with Imperfect Maintenance. **Journal of Quality and Reliability Engineering**, 2014.

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

KODALI, R; CHANDRA, S. Analytical hierarchy process for justification of total productive maintenance. **Production Planning & Control**, v. 12, n. 7, p. 695-705, 2001.

MARCONI, M.D.A; LAKATOS, E.M. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2005. 315p.

MÁXIMO, D.G; LORENCETTE, R.M. **Análise de Acidentes Ferroviários no trecho Cariacica (ES) – Conselheiro Pena (MG) da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM)**. 2006. 102p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

MENEGON, N.L. Confiabilidade Humana em Sistemas Complexos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 34., 2014, Curitiba. **Sessão Dirigida**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2014. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br.htm>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

MOUBRAY, J. **RCMII Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Inglaterra: Aladon Ltda, 2000.

NUNES, C. **Utilização de métodos de análise de falhas em um sistema de sinalização ferroviária**. 2012. 92p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

O SISTEMA FERROVIARIO BRASILEIRO. Brasília: Confederação Nacional de Transportes, 2013. 58p.

PHAM, H; WANG, H. Imperfect maintenance. **European Journal of Operational Research**, v, 94, p. 425-438, 1996.

PIETRUCZUK, A.J; NOWAKOWSKI, T; WOJCIECHOWSKA, W.S. Block Inspection Policy Model With Imperfect Inspections For Multi-Unit Systems. **RT&A**, v. 8, 2013.

RASMUSSEN, J. Skills, rules, and knowledge: signals, sign, and symbols, and other distinctions in human performance models. **IEEE Transactionson Systems, Man and Cybernetics**, v. 13, p. 257-266, 1983.

REASON, J.T. **Human Error**. New York, Cambridge University Press, 1990, 285p.

REASON, J. **Managing the risks of organizational accidents**. Ashgate, Burlington, 1997, 252p.

REASON, J.T. Human error: models and management. **BMJ**, v. 320, p. 768-770, 2000.

Revista Ferroviária. Disponível em: <<http://www.revistaferroviaria.com.br.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

SCARF, P.A; CAVALCANTE, C.A.V. Modelling quality in replacement and inspection maintenance. **Int. J. Production Economics**, v. 135, p. 373-391, 2012.

SEVERINO, A.J. **Metodologia do Trabalho Científico**. 23. ed. São Paulo: Cortez, 2007. 304p.

SILVA, S.E.L. Falha Humana em Operação e Manutenção em Subestações. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2006, Belo Horizonte. **Anais Eletrônicos**. Santos: SENDI, 2006. Disponível em: <<http://www.mfap.com.br.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

WANG, W; HU, H; WANG, Y; WU, W; HE, P. The availability model and parameters estimation method for the *delay time* model with imperfect maintenance at inspection. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, p. 2855-2863, 2011.

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

ZEQUEIRA, R.I; BÉRENGUE, C. Periodic imperfect preventive maintenance with two categories of competing failure modes. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 91, p. 460-468, 2006.

ZHAO, J; CHAN, A.H.C; ROBERTS, C; MADELIN, K.B. Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with multi-defects. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 92, p. 65-73, 2007.

ZHOU, X; Xi, L; LEE, J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 92, n. 4, p. 530-534, 2007.

Andréa Patrícia Castro Leite - Mestre em Engenharia de Produção, com ênfase em Pesquisa Operacional, pelo Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEP/UFPE). Graduada em Engenharia de Produção pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Técnica em Metalurgia e Materiais pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA). Docente na Universidade Estadual do Maranhão e na Faculdade Internacional de São Luís/Wyden. Atua principalmente nos seguintes temas: gestão de resíduos sólidos na indústria, desenvolvimento sustentável, gestão da qualidade, pesquisa operacional.



PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO

para aparelhos de mudança de vias,
considerando possibilidade de erros

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br


Ano 2023



PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO

para aparelhos de mudança de vias,
considerando possibilidade de erros

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br


Ano 2023