



**Thales Campos Andrade**

**Programação Dinâmica para Substituição de  
Ativos Ferroviários**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto

Rio de Janeiro  
abril de 2023



**Thales Campos Andrade**

**Programação Dinâmica para Substituição de  
Ativos Ferroviários**

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

**Prof. Rafael Martinelli Pinto**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Orivalde Soares da Silva Júnior**

IME

**Prof. Walton Pereira Coutinho**

UFPE

Rio de Janeiro, 03 de abril de 2023

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

### **Thales Campos Andrade**

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora e possui especialização em Análise de Dados. Trabalha na área de pesquisa visando identificar métodos de otimização para tomada de decisão de substituição de equipamentos.

#### Ficha Catalográfica

Andrade, Thales Campos

Programação Dinâmica para Substituição de Ativos Ferroviários / Thales Campos Andrade; orientador: Rafael Martinelli Pinto. – 2023.

52 f: il. color. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Problema de Substituição de Equipamentos. 3. Logística Ferroviária. 4. Programação Dinâmica. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## Agradecimentos

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

Aos meus familiares e amigos pelo apoio incondicional.

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

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

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

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

## Resumo

Andrade, Thales Campos; Pinto, Rafael Martinelli. **Programação Dinâmica para Substituição de Ativos Ferroviários**. Rio de Janeiro, 2023. 52p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A gestão de ativos é uma abordagem crucial para o desempenho das organizações uma vez que buscam alinhar aspectos técnicos de engenharia com conceitos financeiros para otimizar o ciclo de vida de uma máquina. O Problema de Substituição de Equipamentos é uma das questões tratadas dentro dos estudos de gestão de ativos que visa decidir a melhor opção entre manter ou substituir o equipamento em um determinado intervalo de tempo. Uma das metodologias que vêm sendo utilizadas na literatura para solucionar este problema é a Programação Dinâmica, que se baseia em encontrar soluções parciais em uma série de estágios do problema até alcançar a ótima global. Este trabalho teve como objetivo determinar uma curva de substituição para um conjunto de locomotivas de uma empresa do setor ferroviário, considerando um limite de idade para poderem circular e seus históricos de receitas e custos ao longo dos anos. Os resultados alcançados permitiram que a empresa conhecesse a melhor forma de otimizar seu capital, levando em consideração os impactos financeiros caso opte por antecipar ou postergar o momento ótimo para substituição dos ativos.

## Palavras-chave

Problema de Substituição de Equipamentos; Logística Ferroviária; Programação Dinâmica.

## Abstract

Andrade, Thales Campos; Pinto, Rafael Martinelli (Advisor). **Dynamic Programming for Railway Assets Replacement**. Rio de Janeiro, 2023. 52p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Asset management is a crucial approach for the performance of organizations as they seek to align technical aspects of engineering with financial concepts to optimize the life cycle of a machine. The Equipment Replacement Problem is one of the issues addressed within asset management studies that aims to decide the best option between maintaining or replacing equipment in a given time interval. One of the methodologies that have been used in the literature to solve this problem is Dynamic Programming, which is based on finding partial solutions in a series of stages of the problem until reaching the global optimum. This work aimed to determine a substitution curve for a set of locomotives of a company in the railway sector, considering an age limit for them to circulate and their revenue and cost history over the years. The results achieved allowed the company to know the best way to optimize its capital, taking into account the financial impacts if it chooses to anticipate or postpone the optimal moment for the replacement of assets.

## Keywords

Equipment Replacement Problem; Railway Logistics; Dynamic Programming.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	<b>13</b>
2.1	O Problema de Substituição de Equipamentos	13
2.2	Programação Dinâmica	14
2.3	Trabalhos Realizados sobre o PSE	15
<b>3</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>17</b>
3.1	A Ferrovia no Brasil	17
3.2	Período de Concessão Ferroviária	20
3.3	Renovação do Contrato de Concessão	22
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>24</b>
4.1	Receita da Locomotiva	24
4.2	Custos da Locomotiva	27
4.3	Sucateamento e Aquisição de uma Locomotiva	28
<b>5</b>	<b>Discussões dos Resultados</b>	<b>35</b>
5.1	Problema de Substituição de Locomotivas com Regressão Linear	35
5.2	Problema de Substituição de Locomotivas com Outras Regressões Polinomiais	40
5.3	Análise de Sensibilidade	42
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>47</b>

## Lista de Figuras

Figura 3.1	Mapa Ferroviário Brasileiro	19
Figura 3.2	Produção das Ferrovias - Em Toneladas	21
Figura 3.3	Índice Acidentes Ferroviários	21
Figura 3.4	Investimentos no Setor Ferroviário por Iniciativas Privadas	21
Figura 3.5	Fases da Concessão Ferroviária	22
Figura 4.1	Gráfico de Regressão Linear da Idade Vs. Receita das Locomotivas	25
Figura 4.2	Gráfico de Regressão Linear da Receita - Teste de Normalidade	26
Figura 4.3	Gráfico de Regressão Linear da Receita - Teste de Homocedasticidade	26
Figura 4.4	Gráfico de Regressão Linear da Idade Vs. Custo de Materiais	29
Figura 4.5	Gráfico de Regressão Linear da Idade Vs. Custo de Mão de Obra	29
Figura 4.6	Histogramas Custo de Material	30
Figura 4.7	Histogramas Custo de Mão de Obra	31
Figura 4.8	Gráfico de Regressão Linear do Custo de Materiais - Teste de Normalidade	32
Figura 4.9	Gráfico de Regressão Linear do Custo de Mão de Obra - Teste de Normalidade	32
Figura 4.10	Gráfico de Regressão Linear do Custo de Materiais - Teste de Homocedasticidade	33
Figura 4.11	Gráfico de Regressão Linear do Custo de Mão de Obra - Teste de Homocedasticidade	33
Figura 5.1	Formulação da Opção de Manter a Locomotiva	36
Figura 5.2	Formulação da Opção de Substituir a Locomotiva	36
Figura 5.3	Formulação das Condições de Contorno	37
Figura 5.4	Formulação Completa do PSE para o Caso de Locomotivas	37
Figura 5.5	Gráfico de Regressão Cúbica da Idade Vs. Receita das Locomotivas	41
Figura 5.6	Gráfico de Regressão Quadrática da Idade Vs. Custo de Materiais	41

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Literatura do Problema de Substituição de Equipamentos	16
Tabela 5.1	Tabela de Resultados da PD com Regressões Lineares	39
Tabela 5.2	Tabela de Resultados dos Parâmetros das Regressões Polinomiais Testadas	40
Tabela 5.3	Tabela de Resultados da PD com Outras Regressões Polinomiais	43
Tabela 5.4	Tabela de Lucro Médio Unitário das Locomotivas (em R\$ MM) – Regressões Lineares	44
Tabela 5.5	Tabela de Lucro Médio Unitário das Locomotivas (em R\$ MM) – Outras Regressões Polinomiais	45

## Lista de Abreviaturas

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

ANTT – Associação Nacional dos Transportes Terrestres

CNT – Confederação Nacional do Transporte

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IQR – Intervalo Interquartil

PD – Programação Dinâmica

PNL – Plano Nacional de Logística

PO – Pesquisa Operacional

PSE – Problema de Substituição de Equipamento

RMSE – Raiz do Erro Quadrático Médio

RFSA – Rede Ferroviária Federal SA

# 1

## Introdução

Lançado em novembro de 2021 pelo Governo Federal - Ministério da Infraestrutura, o Plano Nacional de Logística (PNL) 2035 apresenta uma análise estratégica do cenário atual e futuro dos subsistemas de transporte do país. Com base na perspectiva de desenvolvimento da rede de transporte, macroeconomia, contexto legal e tecnológico, o PNL 2035 destaca para o setor ferroviário uma melhoria de eficiência logística e redução de custos. Tais mudanças podem gerar um investimento de mais de 160 bilhões de reais nos próximos anos (BRASIL, 2022).

De acordo com a Agência Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF (2022)), ao longo dos anos houve um aumento expressivo na frota de material rodante das empresas associadas. Em 1997, somadas, as ferrovias contavam com cerca de 1.154 locomotivas e 43.816 vagões, 23 anos depois o volume das frotas ativas passou para 3.298 e 116.435, respectivamente. Desde 2020 as ferrovias vêm passando pelo processo de renovação da concessão para circulação na malha nacional junto aos órgãos federais.

GUERRA NETO (2019) explica que os contratos de concessão ferroviária servem para estabelecer a relação público-privada no longo prazo, constituídos de direitos e deveres a serem cumpridos por ambas as partes. Nos contratos é definido o prazo de concessão para prestação de serviço, o qual está estimado em 30 anos após início da vigência do mesmo. Uma das cláusulas atualizadas para o próximo ciclo de renovação é um tempo de vida menor do que 40 anos das locomotivas para circular em no trecho (ANTF, 2022).

Neste cenário, cuidar dos ativos se torna cada vez mais imprescindível para o setor ferroviário. COELHO (2015) ressalta que o sucesso de uma empresa é influenciado pelo desempenho de seus ativos, uma vez que encontrar a melhor relação de custo-benefício exige análises de variáveis que influenciam a vida útil dos equipamentos. MIRANDA et al. (2009) complementam dizendo que a substituição de equipamentos deve ser realizada por meio de decisões bem fundamentadas, com cálculos que evidenciam a viabilidade financeira para a empresa, já que a aquisição de uma máquina nova também apresenta riscos para o negócio.

Dessa forma, técnicas de Pesquisa Operacional (PO) se apresentam como

uma oportunidade para auxiliar os gestores a tomarem decisões mais assertivas, através de otimização de modelos matemáticos (MAITI et al., 2020). HILLIER e LIEBERMAN (2013) destacam em sua obra “Introdução à Pesquisa Operacional” a gama de aplicações em que a PO pode alcançar, resolvendo problemas complexos de manufatura, assistência médica, planejamento financeiro, transporte, serviço público, entre outros. A Programação Dinâmica (PD) é uma das técnicas de PO baseada em tomar uma sequência de decisões que estão mutuamente relacionadas, conforme acontece no caso do Problema de Substituição de Equipamentos (PSE) na qual a decisão tomada em um ano afeta os resultados dos anos subsequentes (CARDOSO, 2005).

O PSE baseia-se no princípio de que com o passar do tempo os equipamentos perdem eficiência e produtividade e, em paralelo, aumentam despesas em manutenção. Assim, o problema visa maximizar a receita de uma empresa indicando a melhor opção entre manter ou substituir um ativo ao longo de um horizonte de planejamento (HIRSCHFELD, 2001). RODRIGUES (2020) resume que a troca de um equipamento pode ser motivada por desgaste ao longo do tempo ou pelo aumento de falhas. Para solucionar o primeiro caso são utilizados métodos mais simples e determinísticos, enquanto a substituição devido às falhas acaba exigindo formulações mais complexas, uma vez que se trata de ocorrências de natureza aleatória, sendo necessário trabalhar com cenários probabilísticos.

Este trabalho visa utilizar a PD determinística para solucionar um caso de PSE em uma empresa nacional de transporte ferroviário em função do desgaste das locomotivas ao longo dos anos. O estudo tem como objetivo elaborar um plano de substituição de locomotivas ao longo do próximo período de concessão conforme a idade atual das máquinas e a idade limitante para elas postulada pelo novo contrato. Para isso será necessário entender o comportamento dos custos relacionados à operação dos ativos e a receita gerada por eles na companhia com dados dos últimos 12 anos. Testes com regressões lineares e polinomiais serão realizados para definir equações de incógnitas do problema que variam em função da idade do ativo.

O trabalho está organizado em cinco capítulos, começando o Capítulo 1 com uma introdução sobre o contexto do problema a ser abordado. No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica dos principais conceitos e trabalhos similares. O Capítulo 3 traz o cenário onde o estudo de caso foi desenvolvido. O Capítulo 4 é dedicado à metodologia utilizada para desenvolvimento do trabalho, para então alcançar os resultados apresentados e discutidos no Capítulo 5. O trabalho finaliza com uma conclusão no Capítulo 6.

## 2

## Revisão da Literatura

### 2.1

#### O Problema de Substituição de Equipamentos

A manutenção de uma empresa é responsável por rentabilizar seus ativos adotando medidas sustentáveis para mantê-los e/ou substituí-los de forma a otimizar os ciclos de vida desses. Para isso, é necessário criar planos estratégicos de longo prazo que garantam a confiabilidade e disponibilidade dos ativos para operarem com o menor custo possível (TANCREDO, 2018).

KARDEC e NASCIF (2009) afirmam que um sistema de manutenção ineficiente pode comprometer diversos indicadores que sustentam uma empresa, pois prejudicam a qualidade do produto/serviço prestado, segurança, produtividade, entre outros fatores. Os autores complementam dizendo que uma gestão moderna dos ativos está amparada por uma visão de futuro.

Dessa forma, a gestão de ativos é uma abordagem que busca alinhar aspectos técnicos de engenharia com a área financeira. As empresas que fazem a gestão de ativos buscam identificar o melhor momento da vida de uma máquina em que a troca desta é mais econômica do que investir em sua manutenção, ou seja, tomar decisões sobre investimentos para que o retorno seja maximizado (MEHAIRJAN et al., 2017; ALARCÓN et al., 2012).

Neste contexto, surge o PSE, baseado em maximizar a receita de uma empresa indicando a melhor opção entre manter ou substituir um ativo ao longo de um horizonte de planejamento. Para isso são considerados os custos de manutenção do ativo e a receita que ele é capaz de gerar ao longo dos anos, os quais são inversamente proporcionais no horizonte crescente de tempo. Além disso, o preço de venda e aquisição de uma máquina nova são variáveis que também vão influenciar na decisão (MARQUES, 2003).

HIRSCHFELD (2001) aborda alguns fatores que podem levar à substituição de equipamentos na empresa. O primeiro trata-se do tempo de vida útil da máquina, pois a idade influencia nas taxas de desgastes e despesas de manutenção que podem não estar compensando financeiramente a sua utilização no processo produtivo. Um segundo fator seria o desenvolvimento de novas tecnologias que se renovam a cada dia trazendo eficiência e produtividade para as

organizações. Por último, o autor traz em questão os equipamentos substitutos que surgem como novas alternativas para atender as mudanças de necessidade do mercado.

Ao longo deste trabalho será estudada a substituição de equipamentos devido ao aumento dos custos de manutenção associado aos desgastes. Para esse caso são usadas abordagens determinísticas para solução de problemas, ao contrário do que acontece quando a substituição é motivada por falhas de natureza aleatória no equipamento, tornando o problema mais complexo devida a necessidade de métodos de solução probabilísticos (RODRIGUES, 2020).

TAHA (2008) apresenta em sua obra “Pesquisa Operacional: Uma Visão Geral” uma formulação matemática para o PSE expressado em uma sequência de decisões tomada no início de cada ano avaliado, como apresentado na Equação (2-1).

$$f_i(t) = \begin{cases} r(t) - c(t) + f_{i+1}(t+1) & \text{se mantiver,} \\ r(0) + s(t) - I - c(0) + f_{i+1}(1) & \text{se substituir,} \end{cases} \quad (2-1)$$

$$f_{n+1}(\cdot) \equiv 0.$$

Onde  $r(t)$  é a receita atual,  $c(t)$  o custo de manutenção anual,  $s(t)$  o valor de venda do ativo,  $I$  o custo de aquisição de um ativo novo em qualquer ano,  $i$  o estágio da decisão (representado pelo ano dentro do horizonte de planejamento),  $t$  a idade do ativo no início do ano  $i$  e  $f_i(t)$  que representa a função que retorna o ganho máximo de um equipamento de idade  $t$  no ano  $i$ .

## 2.2

### Programação Dinâmica

Uma das técnicas da Pesquisa Operacional utilizada para resolução do PSE é a Programação Dinâmica. Criada por Richard Bellman na década de 50, a PD baseia-se em encontrar soluções de forma recursiva para aplicações que exigem diversas decisões a serem tomadas para chegar na ótima. Esse método segue o chamado princípio de otimalidade no qual estabelece que uma sequência de decisões ótimas será composta por sequências de subproblemas também ótimas (CAMPELLO, 2002).

A PD tem a característica de possuir um algoritmo diferente para cada tipo de problema, no entanto os problemas que são elegíveis a aplicação do método se assemelham pelo fato de que o resultado global do processo é alcançado por meio da combinação dos resultados parciais de cada instância e que qualquer algoritmo recursivo que otimize o processo deve resolver os

mesmos estágios repetidamente, sem decompô-los em novos estágios (DARÚ e LACERDA, 2005; CECHIN et al., 2019).

MARQUES (2003) define os conceitos básicos de PD aplicados ao PSE.

- Estágios: são os intervalos de tempo em que decisões serão tomadas (ano, semestre, mês etc...).
- Estado: situação do ativo em um determinado estágio, ou seja, a idade deste.
- Ações: conjunto de opções viáveis em cada estágio, das quais uma deverá ser escolhida e executada.
- Decisão: é a escolha realizada no início de cada estágio que dita o estado do ativo no próximo estágio (equipamento mantido ou substituído).
- Política: é o conjunto de decisões adotadas em cada estágio ao longo de todo horizonte de planejamento.

## 2.3

### Trabalhos Realizados sobre o PSE

A Tabela 2.1 resume os principais trabalhos que contribuíram na literatura do PSE, bem como o uso da PD na busca de solução desse tipo de problema. As colunas da tabela indicam os autores que pesquisaram sobre o tema "substituição de equipamentos" seguido pela metodologia utilizada para tomada de decisão do problema. Além disso, foram indicados os tipos de equipamentos estudados junto ao seu setor de atuação, os programas utilizados e o horizonte de planejamento.

Entre as formas de resolução do PSE 38% utilizaram PD, o que embasou a escolha do método para o desenvolvimento desse trabalho. Outras metodologias dentro da PO aplicadas na solução do PSE são: Caminho Mais Curto, Programação Linear Inteira, Algoritmos Genéticos, Algoritmos Multiciclos e Decisões Multicritérios, todos menos recorrentes do que a PD. Um outro conceito também representativo para decifrar o PSE é o método do Custo Unitário Anual Equivalente, com cerca de 23% na representatividade dos trabalhos estudados. Esse se trata de um indicador de engenharia econômica que busca equiparar o fluxo de caixa e os investimentos descontados a taxa mínima de atratividade (equipamento novo), definindo assim o período onde o saldo financeiro seja positivo.

A pesquisa foi realizada em diferentes plataformas *online* destinadas a trabalhos acadêmicos como *Scopus*, *Web of Science* e *Google Acadêmico*. Inicialmente por meio da palavra chave “Problema de Substituição de Equipamentos” e posteriormente combinada com “Programação Dinâmica”.

Tabela 2.1: Literatura do Problema de Substituição de Equipamentos

Atores	Método Utilizado	Tipo de Equipamento	Setor	Software	Estágios
HARTMAN e ROGERS (2006)	Programação Dinâmica	Bens de capital	Tecnológico	Não informado	20 anos
ABENSUR (2010)	Caminho mais Curto, Programação Dinâmica e Custo Anual Equivalente	Betoneira	Construção civil	Microsoft Excel	10 anos
CRUZ et al. (2015)	Custo Anual Uniforme Equivalente	Carregadora de rodas	Mineradora	Microsoft Excel	7 anos
CHUKWUNE et al. (2017)	Programação Dinâmica	Embaladora	Indústria química	Não informado	10 anos
COSTA e SILVA (2019)	Programação Dinâmica	Forno	Indústria alimentícia	Não informado	20 anos
SADEGHPOU et al. (2019)	Programação Dinâmica e Algoritmo Genético	Transformado	Energia	Não informado	5 anos
SILVEIRA (2009)	Programação Linear Inteira	Trator	Agrícola	LibreOffice Calc	10 anos
RODRIGUES (2020)	Custo Anual Uniforme Equivalente	Carro	Indústria automobilística	Microsoft Excel	13 anos
SOEIRO (2020)	Programação Dinâmica	Fio de solda	Indústria eletroeletrônica	Não informado	26 quinzenas
LARBI REBAIAIA e AIT-KADI (2021)	Distribuição Weibull	Compressor centrífugo	Indústria petroquímica	Não informado	Não definido
VICHEZ et al. (2020)	Tempo Médio Entre Intervenções (MTBI) e Tempo Médio Entre Falhas (MTBF)	Escavadeira hidráulica	Mineradora	Não informado	Não informado
YATSENKO et al. (2020)	Algoritmo Multiciclo	Máquina de raio X	Hospitalar	Microsoft Excel e Matlab	20 anos
HERNÁNDEZ CHOVER et al. (2021)	Métodos de Tomada de Decisão Multicritério	Bomba sopradora	Águas residuais	Não informado	Não informado

A maior parte dos trabalhos encontrados possuem um horizonte de planejamento em até 20 anos (Tabela 2.1), a proposta do presente estudo contempla um intervalo de tempo maior. Além disso, este trabalho não é focado em apenas uma máquina e sim em desenhar uma curva de substituição para um grupo de locomotivas ao longo do horizonte do próximo ciclo de concessão da ferrovia.

Por fim vale destacar que não foi identificada a aplicação de métodos de PO para o PSE em empresas ferroviárias. No Brasil, uma vez que a renovação da concessão ocorre no mesmo período para toda a malha nacional, é de esperar que outras ferrovias também estejam passando por questões semelhantes de trocar seus ativos para atender as exigências da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e possam compartilhar deste estudo.

## 3

### Estudo de Caso

Este capítulo traz o contexto do cenário onde o trabalho foi realizado: ferrovia brasileira. Aspectos sobre a evolução do processo de concessão da malha e principais informações do setor serão abordados. Por fim, o capítulo traz descrições da empresa onde o estudo foi realizado, principalmente no que tange a substituição de locomotivas.

#### 3.1

##### A Ferrovia no Brasil

Ocorrida por volta de 1760 e 1840, a Primeira Revolução Industrial gerou um marco nos sistemas produtivos conhecidos com a criação da máquina à vapor. O capitalismo industrial que essa tecnologia gerou transformou a história da humanidade, principalmente do setor de transporte por meio de sistemas de movimentação mais eficientes para navios e tratores, além da criação de ferrovias por todo o mundo (SILVEIRA, 2002).

MÉLO FILHO (2020) destaca alguns dos benefícios que o transporte ferroviário proporciona às cadeias produtivas de diversos setores, como é o caso da capacidade de transferir altos volumes em uma mesma viagem, maior confiabilidade e segurança da carga, além da redução de emissão de poluentes ao meio ambiente. O autor ainda ressalta a importância que as ferrovias têm em países de grandes extensões territoriais como o Brasil em que é necessário fazer a ligação de zonas produtoras e locais de exportação de maneira rápida e eficiente.

A história da ferrovia no Brasil sempre esteve ligada às estratégias de governos do país. De acordo com ANTF (2022) é possível resumir a evolução do setor ferroviário no Brasil em 6 principais fases:

- Fase 1 (1835 - 1873): período que marca o início da construção de ferrovias no Brasil por intermédio de empresas privadas, unindo o Rio de Janeiro aos estados de São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Rio Grande do Sul. O Brasil se encontrava em transição do período de Regência para o Segundo Reinado.
- Fase 2 (1873 - 1889): período marcado por uma aceleração dos planos de construção de ferrovias no país, também patrocinado por empreendedores

privados estimulados pela lei que oferecia garantia de juros ao capital empregado na respectiva atividade. A política nacional se encontrava nas mãos de D. Pedro II.

- Fase 3 (1889 - 1930): período em que se manteve a ascendência da ferrovia no país com leis que beneficiaram o setor. Destaca-se nesse momento intervenções do governo no controle de empresas com dificuldades financeiras. Nesse intervalo de tempo a República Velha já ascendia ao Brasil.
- Fase 4 (1930 - 1960): período de retração da ferrovia devido aos conflitos mundiais e aumento do controle estatal das empresas ferroviárias. Em 1957 foi criada a Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) para administrar a malha ferroviária nacional. Período onde a política brasileira passou pela Era Vargas.
- Fase 5 (1960 - 1990): período onde o país buscou reerguer o setor com criação de programas de investimentos, capacitação e expansão da ferrovia pelos estados do Norte, Nordeste e Centro Oeste. O Regime Militar prevaleceu no controle do Brasil na maior parte dessa fase.
- Fase 6 (1990 - 2023): período marcado pela concessão de todo o sistema ferroviário nacional a empresas privadas, fim da RFFSA. O prazo do contrato deve ser renovado a cada 30 anos, onde as empresas devem apresentar as propostas de investimentos conciliando com o plano de desenvolvimento do país. Período político da Nova República.

Atualmente a malha ferroviária nacional conta com mais de 31 mil quilômetros dispostos em todas as regiões, com destaque para o Sul e Sudeste onde se encontram os polos industriais bem como os principais portos de exportação do Brasil. A Figura 3.1 mostra o mapa ferroviário atual do país (ANTT, 2022).

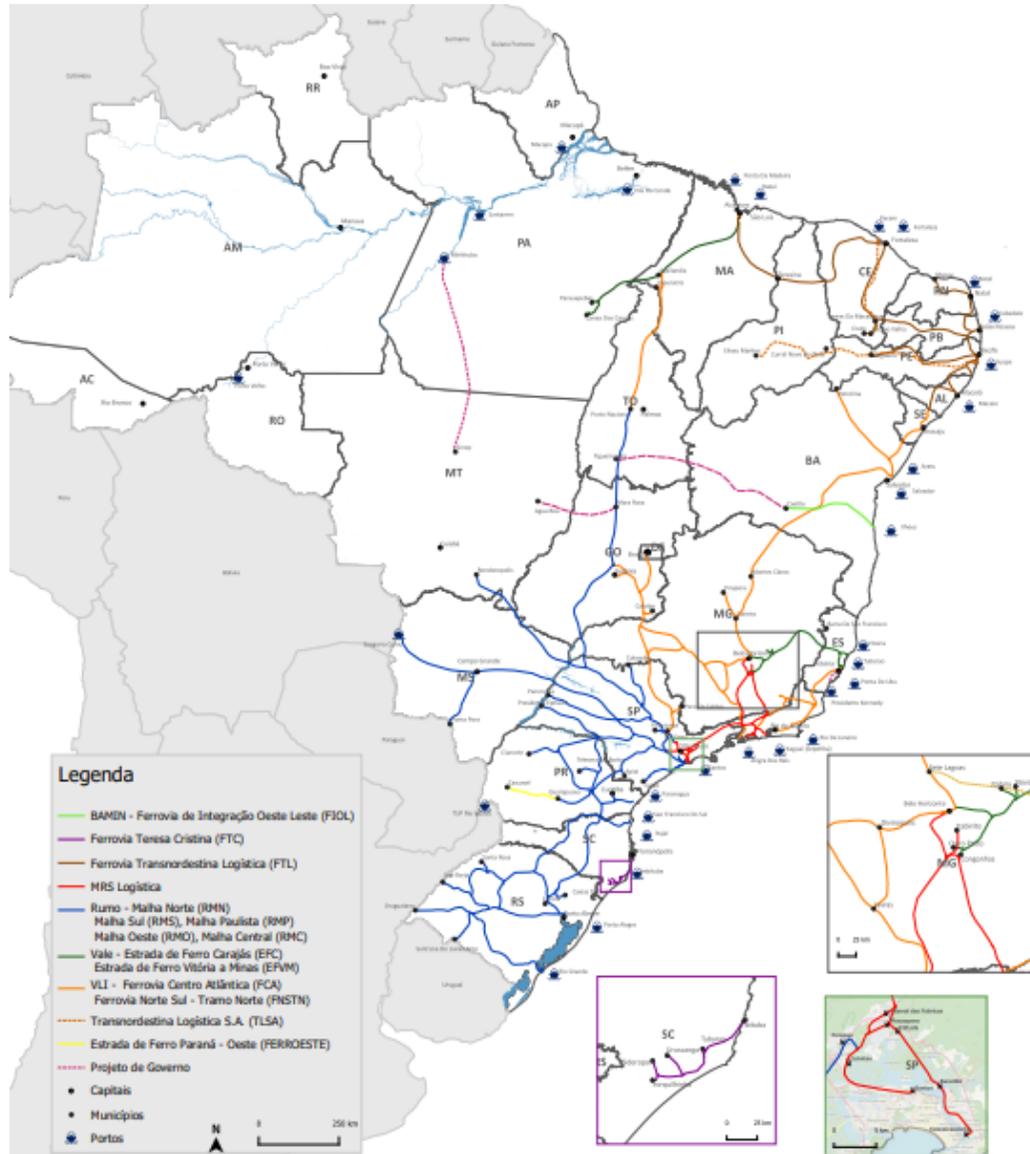


Figura 3.1: Mapa Ferroviário Brasileiro  
Fonte: ANTF (2022)

## 3.2

### Período de Concessão Ferroviária

A concessão ferroviária surgiu com o intuito de tirar as obrigações do Estado com os encargos operacionais do setor e com isso reduziria os custos que o governo tinha com as atividades inerentes ao processo. Além disso, a expectativa era de que, sob o comando de empresas privadas, novos investimentos seriam voltados para o desenvolvimento do setor e, conseqüentemente, do país com o fomento de empreendimentos ligados ao transporte ferroviário, como metalurgia, siderurgia, agricultura, entre outros (SILVEIRA, 2002).

Dessa forma, o governo federal dividiu a malha da RFFSA em seis partes, as quais foram leiloadas: Estrada de Ferro Tereza Cristina, Malha Centro-Leste, Malha Nordeste, Malha Oeste, Malha Sudeste e Malha Sul. Entre as empresas que adquiriram a concessão da ferrovia brasileira se destacam a Companhia Siderúrgica Nacional, a Companhia Vale do Rio Doce e o Grupo Garantia, as quais juntas somavam 60% de toda a malha ferroviária (SILVEIRA, 2002).

A partir da privatização do setor houve grandes investimentos na reestruturação das operações, modernização de ativos e infraestrutura da ferrovia. Tais iniciativas tiveram reflexo no aumento da produção e redução de acidentes conforme mostra a Figura 3.2 e a Figura 3.3, respectivamente. Já no início do século XXI o governo federal buscou contribuir com o crescimento da ferrovia por meio do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), órgão responsável pela gestão do patrimônio ferroviário (ativos operacionais e não operacionais). O governo ainda fez investimentos de ampliação de novos ramais e parcerias em empreendimentos públicos de infraestrutura. A Figura 3.4 mostra a evolução dos investimentos realizados no setor ferroviário nos anos de concessão (MÉLO FILHO, 2020).

FELIX e CAVALCANTE FILHO (2016) mostram que de acordo com o Relatório do Fórum Econômico Mundial dos anos de 2016 e 2017, entre 138 países avaliados, o Brasil ocupa a 93<sup>o</sup> posição índice de competitividade global de qualidade da infraestrutura ferroviária.

Apesar de todo o crescimento do setor, a matriz de transporte brasileira ainda se encontra desequilibrada, com apenas 15% do transporte de carga no Brasil acontecendo por ferrovias. A expectativa é que esse número aumente para 32% até 2025 (MÉLO FILHO, 2020). De acordo CNT (2015), os principais desafios do sistema de transporte ferroviário se encontram nos conflitos urbanos, com pelo menos 355 invasões de faixas de domínio que surgiram na implantação e na gestão da extinta RFFSA exigindo redução de velocidade em tais trechos e também cruzamentos de ferrovias com rodovias gerando transtornos de circulação para ambos os modais.

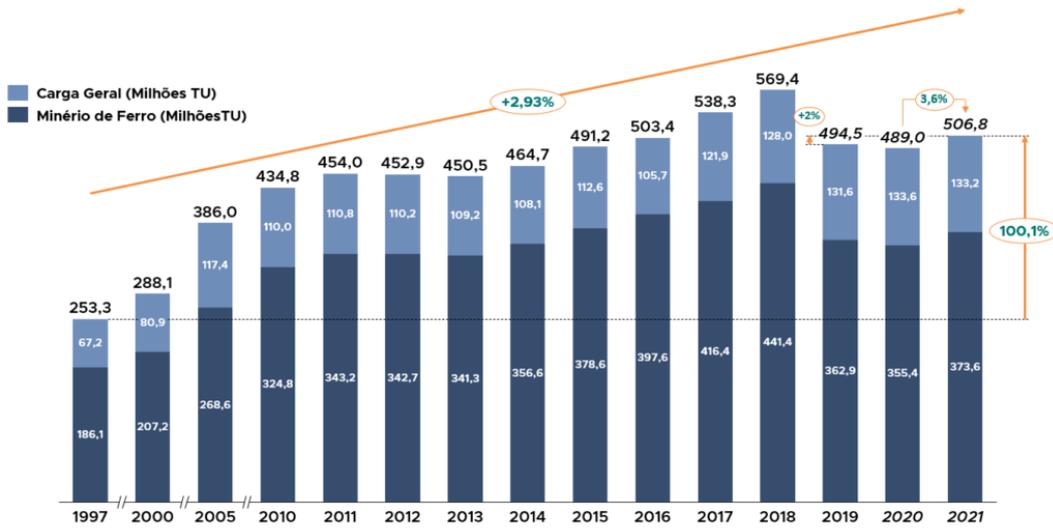


Figura 3.2: Produção das Ferrovias - Em Toneladas  
Fonte: ANTF (2022)

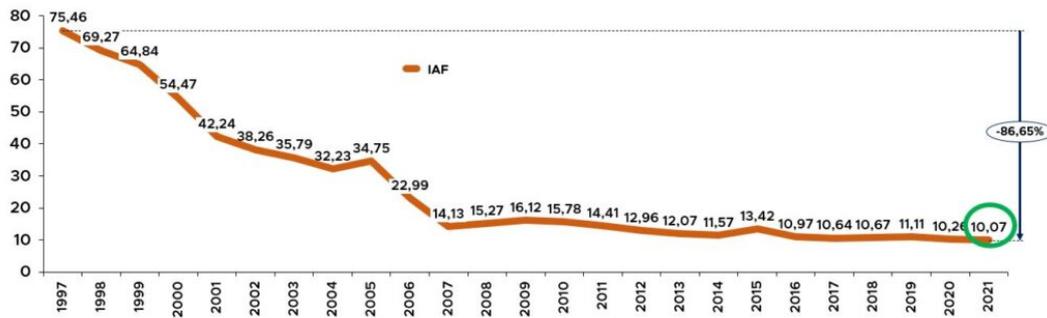


Figura 3.3: Índice Acidentes Ferroviários  
Fonte: ANTF (2022)

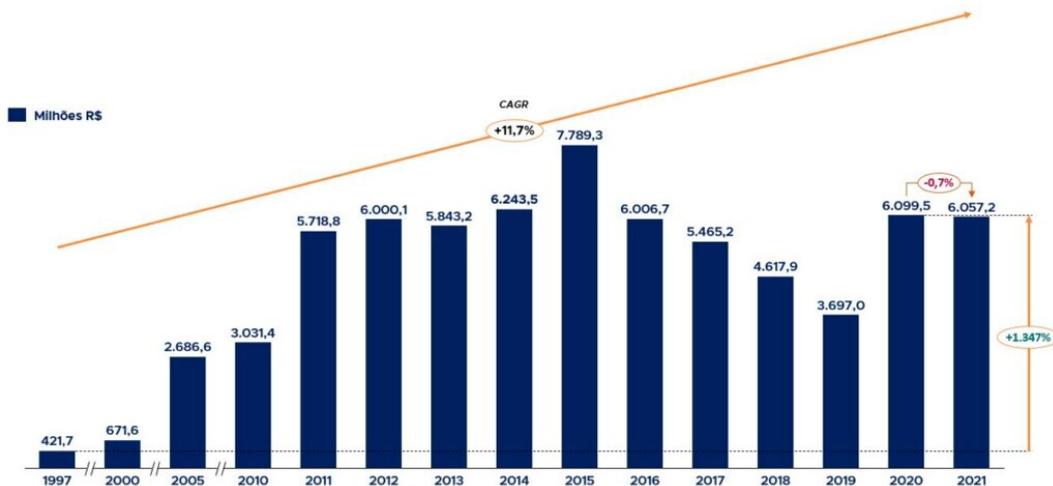


Figura 3.4: Investimentos no Setor Ferroviário por Iniciativas Privadas  
Fonte: ANTF (2022)

### 3.3

#### Renovação do Contrato de Concessão

Conforme estabelecido na Lei nº 14.273 denominada “Lei das Ferrovias”, fica a cargo da ANTT o processo regulatório que autoriza a utilização indireta do serviço de transporte ferroviário federal, mediante outorga em regime de direito privado. Assim, a agência fica responsável por conduzir o contrato de concessão outorga para as empresas usufruírem da infraestrutura ferroviária do Brasil, além de instituir o Programa de Desenvolvimento Ferroviário que busca promover investimentos privados para o setor, como a exploração de novos trechos, pátios e demais instalações (ANTT, 2022).

GUERRA NETO (2019) explica que o processo de concessão ferroviária brasileiro é moroso porém repetitivo já que as cláusulas tendem ser iguais para todas as empresas. O primeiro passo é reunir informações de todas as ferrovias brasileiras e do cenário atual do setor. As empresas devem apresentar seus planos de negócios e projetos que possam comprovar sua aptidão ao atendimento dos requisitos estipulados pela ANTT. Todo esse material é analisado e discutido em uma série de audiências públicas para ser aprovado pelos órgãos públicos de interface. Após todos os consentimentos e aprovações são realizadas as assinaturas do contrato pelas partes, dando o direito legal à empresa de atuar na malha ferroviária pelos próximos 30 anos. A Figura 3.5 mostra um resumo das fases do processo de concessão ferroviária.

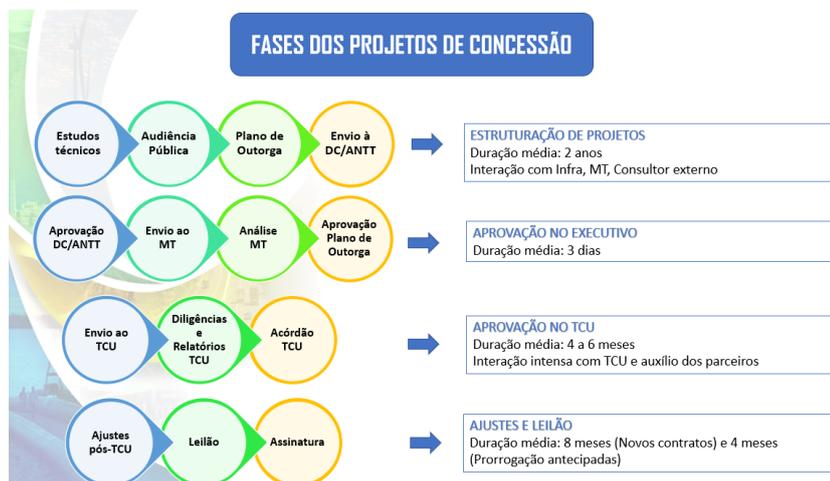


Figura 3.5: Fases da Concessão Ferroviária

Fonte: ANTT (2022)

A antecipada do contrato de concessão é uma oportunidade para que as empresas iniciem o processo de renovação antes do vencimento do último contrato e possam se adequar às normas e cláusulas do próximo acordo ainda com o licenciamento válido. Essa antecipação pode ser realizada desde que

transcorridos 50% a 90% do contrato original. Para isso, é necessário a empresa comprovar a inclusão de investimentos no longo prazo e ter atingido as metas de produção e segurança por quatro anos entre os últimos cinco que antecederam à prorrogação (ASSIS et al., 2017).

O presente trabalho foi realizado em uma empresa nacional de transporte ferroviário de cargas, que passa por esse processo de renovação da concessão da malha ferroviária, o qual o contrato vigente está para vencer em 2026. A empresa estudada busca renovar o acordo para mais um ciclo de 30 anos (até 2056). Assim, o período considerado como horizonte de planejamento a ser avaliado o período entre 2023 até 2056.

Dentre as premissas do novo contrato é estabelecido pela ANTT um limite de idade para as locomotivas circularem no trecho, este deve ser menor que 40 anos desde sua data de fabricação, caso contrário haverá aplicação de multas e risco de perda da concessão. Essa cláusula visa fomentar o desenvolvimento do setor, inclusão de novas tecnologias, mais segurança e produtividade na operação. Para atender essa e outras restrições do acordo, a empresa está realizando estudos a fim de direcionar as melhores estratégias para se enquadrar nas regras de maneira sustentável. Nesse cenário, entender o melhor momento para realizar a substituição das locomotivas é de suma importância, uma vez que envolve um investimento alto a ser considerado ou até multas severas por parte do órgão regulador.

Atualmente na empresa não existe um processo padrão para determinar a substituição dos ativos ao longo dos anos devido à vida útil. Os estudos relacionados a esse assunto geralmente são voltados para a quantidade de locomotivas necessárias para o atendimento do volume. Assim, quando há expectativa de aumento da produção, as áreas de planejamento estratégico e comercial buscam alternativas de aquisição de novos ativos para a companhia, por outro lado, quando o volume tende a reduzir, a opção é estocar algumas máquinas até que haja a necessidade de voltarem com elas para circulação. Geralmente no segundo caso, os principais componentes que sofrem desgastes com o tempo são removidos e aplicados na manutenção de locomotivas em atividade.

O modelo de locomotivas mais utilizado na empresa são as locomotivas chamadas de AC44 utilizadas para transportar minério de ferro, carga que representa cerca de 70% dos transportes executados e com bases de dados mais precisas para realizar análises. Ao total a companhia possui 466 locomotivas do modelo AC44 operando na frota, as quais foram adquiridas ao longo dos últimos 12 anos de concessão e foram o foco deste estudo para construir uma curva de substituição para a companhia.

## 4

### Metodologia

Conforme apresentado no Capítulo 2, o PSE se baseia em definir o momento ideal para troca de um equipamento, levando em consideração o comportamento avesso entre as curvas de receita e custos gerados no horizonte de tempo. Sendo assim, o primeiro passo foi encontrar uma equação que represente essas variáveis em função da idade das máquinas ( $t$ ). Para isso foi utilizado regressão linear com dados históricos de 2010 até 2022.

Alguns dos custos utilizados foram ajustados pelo Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) divulgado pela FGV (2022) em dezembro de 2022, com objetivo de ajustar as variações de economia e inflação do país. Além disso, os valores coletados da empresa ferroviária foram alterados com um parâmetro em comum a fim de preservar a segurança dos números reais praticados.

O primeiro levantamento realizado foi do ano de fabricação das locomotivas em estudo, as máquinas atuais têm idades que variam de 1 até 12 anos. Isso indica que, considerando apenas a regra da idade máxima para circulação, pode-se garantir que no horizonte dos 34 anos a serem analisados algumas das locomotivas devem ser substituídas por outras novas.

#### 4.1

##### Receita da Locomotiva

A base para encontrar a receita gerada pelas locomotivas foi o volume produzido em toneladas de minério de ferro de 2010 até 2022. Esse volume foi transformado em valor monetário através do preço médio da tonelada do minério de ferro no mesmo intervalo de tempo. Em seguida essa receita anual passou por dois processos de rateios para poder ser associada às locomotivas.

O primeiro rateio foi realizado para segmentar a parcela da receita total da empresa só para a carteira de locomotivas. Para isso foi levantado todos os centros de custos utilizados pela área da contabilidade da empresa que identificam a origem dos gastos, como por exemplo, custos com locomotivas, vagões, malha, entre outros. Dentro de cada centro de custo são contabilizados mão de obra operacional, mão de obra administrativa, infraestrutura, materiais, equipamentos e todos as demais despesas que são associadas ao ativo. Assim, para ratear a receita total da empresa para a carteira de locomotivas utilizou-se a

mesma proporção que o centro de custo de locomotivas gerou ano a ano na contabilidade total da companhia.

Posteriormente foi levantada a disponibilidade operacional histórica dos ativos e então, por meio desta, foi associada uma receita anual gerada por máquina.

Com a base de dados histórica que relaciona a idade das locomotivas e a receita produzida por elas, foram removidos os dados *outliers* pelo método do Intervalo Interquartil (IQR) a 95% de confiança. Em seguida, foi realizada a regressão linear para encontrar a equação que representa o comportamento dessas duas variáveis em análise na Figura 4.1.

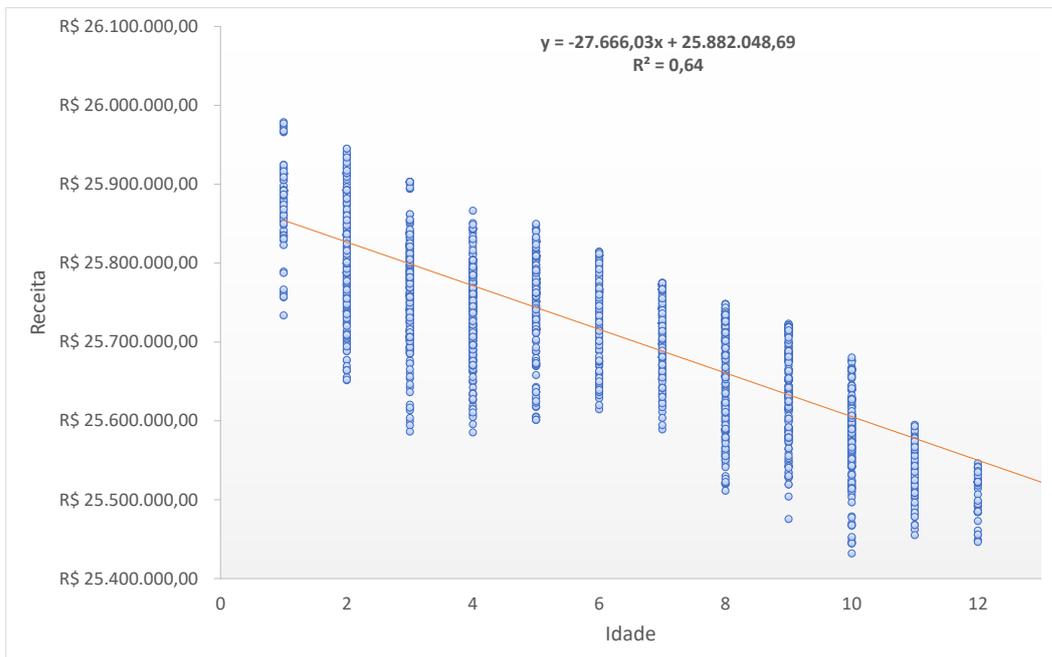


Figura 4.1: Gráfico de Regressão Linear da Idade Vs. Receita das Locomotivas

A regressão realizada obteve um p-valor menor que 5%, o que indica que o modelo se apresenta significativo no que diz respeito à relação entre a variável preditora e a variável de resposta. Nesse caso, pode-se dizer que a variação na idade da locomotiva reflete diretamente na variação da receita gerada pela máquina, com uma correlação de 80%. Além disso, vale destacar que o modelo encontrado possui um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 64%, o qual indica a capacidade do modelo explicar o comportamento da receita pela variável de idade das locomotivas.

Para concluir a regressão, foi feita a análise de normalidade e homocedasticidade dos resíduos do modelo, a fim de confirmar as premissas básicas de uma regressão linear.

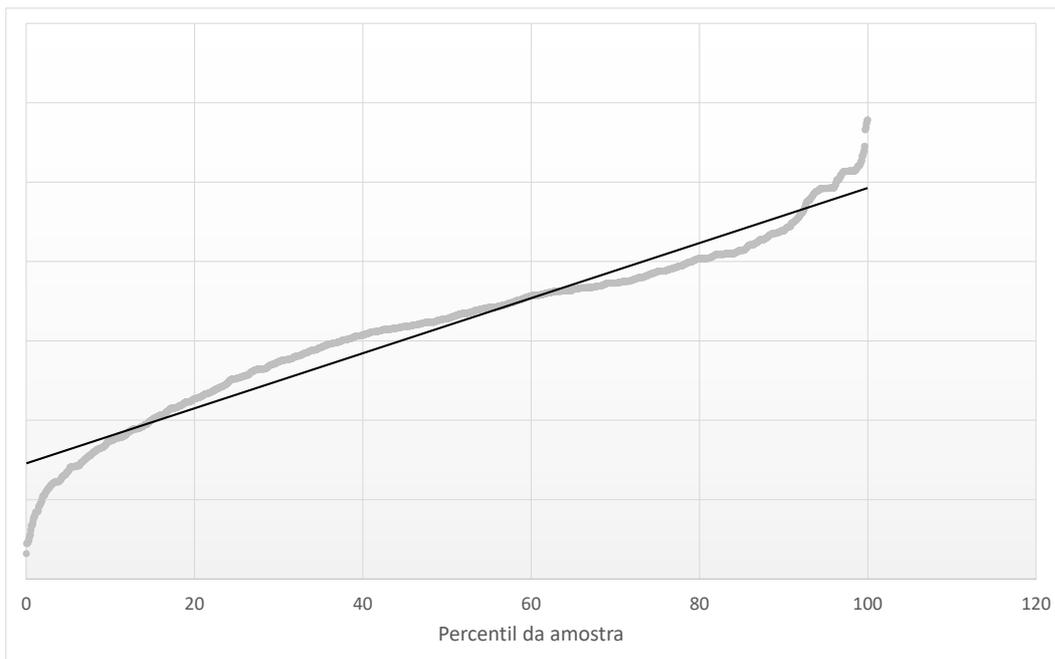


Figura 4.2: Gráfico de Regressão Linear da Receita - Teste de Normalidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 2112236/CA

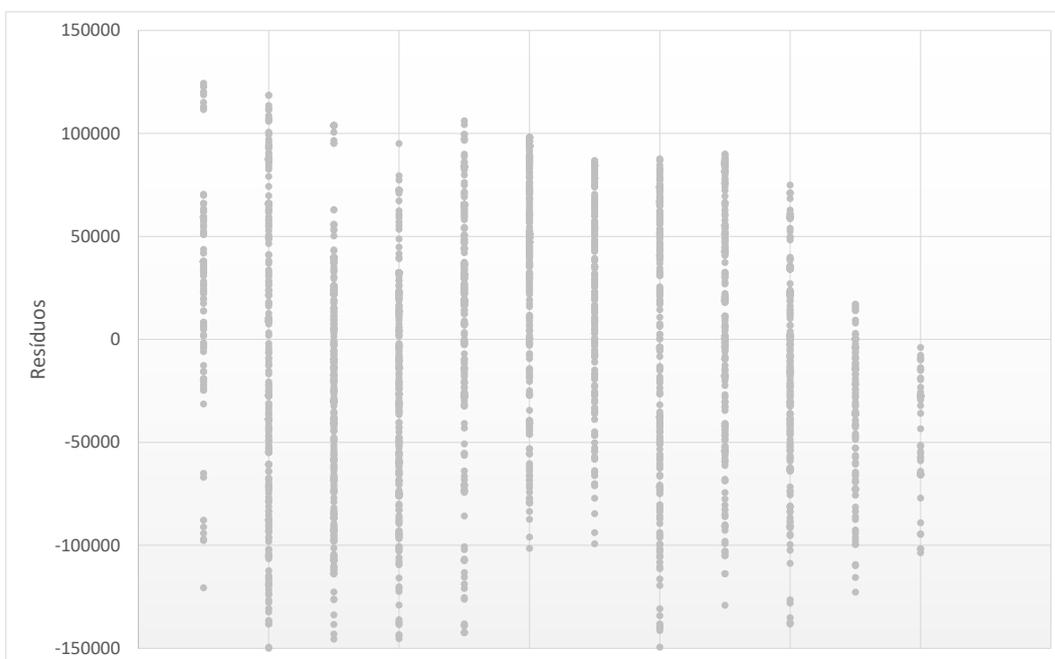


Figura 4.3: Gráfico de Regressão Linear da Receita - Teste de Homocedasticidade

O primeiro teste indica se os resíduos seguem ou não uma distribuição normal, enquanto o segundo dita se os resíduos são constantes e não correlacionados entre si. Conforme mostra a Figura 4.2, as probabilidades dos erros seguem uma distribuição normal e pela Figura 4.3 é possível perceber que os erros são distribuídos de forma aleatória e uniforme em torno do eixo abcissas. Logo, pode-se concluir que o modelo de regressão é confiável.

## 4.2

### Custos da Locomotiva

Para os custos de manutenção das locomotivas foram considerados os custos materiais e mão de obra, uma vez que estes variam com a quantidade de manutenções realizadas e juntos representam cerca de 80% dos custos totais de manutenção do ativo.

- Custo de materiais: se baseia na troca de componentes por máquina a cada ano e mensurado em unidades monetárias de acordo com o preço do material. Atualmente a gama de materiais trocados nas locomotivas é a maior entre os ativos que realizam manutenção e podem variar de preços unitários na casa dos centavos como é o caso de itens de fixação (porcas, anéis, parafusos, arruelas, entre outros) até materiais com preços na casa dos milhares como motores, baterias, rodeiros, truques, entre outros. Os materiais de locomotivas podem ser classificados conforme o sistema em que atua na máquina, como sistema de freio, elétrico e mecânico, além da condição do item, ou seja, se o material é novo ou recuperado pelos centro de produção industrial que a empresa possui próximo de algumas oficinas de manutenção. Essa última classificação impacta diretamente no preço do componente, uma vez que recuperado o material possui um custo menor do que o mesmo novo. No entanto, não é sempre que consegue-se resgatar a peça, dependendo do problema a única opção é o descarte total, e então, a substituição é feita por uma unidade nova adquirido no mercado.
- Custo de mão de obra: para a mão de obra os dados são relacionados a quantidade de homem-hora (HH) destinada a manutenção do ativo também convertido em valor financeiro pelo preço de 1 unidade de HH. Atualmente a empresa conta com um processo automatizado de apontamento de atividades mantidas a se realizarem. No momento que a locomotiva chega na oficina já se conhece o escopo de manutenção que será realizado e as ocorrências abertas durante sua circulação para serem avaliadas pelo time de manutenção. As atividades de cada colaborador já são pré determinadas conforme sua especialidade (mecânico, eletricista,

técnicos, entre outros). Nas oficinas existem computadores adaptados com leitores de código de barra onde todos os colaboradores que atuam diretamente no reparo do ativo passam o crachá no início e no fim de suas atividades. Dessa forma, toda a apuração de tempos e custos de mão de obra já são calculados pelo sistema para cada máquina durante sua permanência na oficina.

Em ambos os custos foi considerado o histórico de 12 anos e realizada a regressão linear entre a idade da locomotiva e seus custos de materiais e mão de obra anual. Inicialmente foi utilizado o método do IQR a 95% de confiança para remover os *outliers* das bases, contudo ambas as regressões apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) menor que 40% devida a alta variabilidade dos dados. Uma segunda alternativa para melhorar o resultado da regressão foi criar histogramas dos custos de materiais e mão de obra para cada idade das locomotivas e considerar informações que estejam presentes nas faixas de maior concentração dos dados, ou seja, todos os casos que não estiverem dentro do intervalo onde está a maior representatividade dos dados (cerca de 60% a 80% das informações) foram considerados como *outliers* e excluídos da análise. Com isso melhorou-se significativamente os coeficientes de determinação da regressão linear de custos da locomotiva.

A Figura 4.6 mostra os histogramas utilizados para definir a faixa de valores mais significativos dos custo de materiais por idade da máquina, enquanto a Figura 4.4 apresenta a regressão linear realizada para a respectiva variável do problema. De forma análoga seguem a Figura 4.7 e a Figura 4.5 para variável custo de mão de obra.

Com *p-valor* inferior a 5% em ambas as regressões, pode-se dizer que o modelo é significativo, com correlação de 91% e  $R^2$  de 83% para o custo em materiais e 98% de correlação e 96% para o coeficiente de determinação para o custo da mão de obra.

De forma análoga à regressão da receita, foram feitos os testes de normalidade e homocedasticidade dos resíduos. A Figura 4.8 e a Figura 4.9 mostram que as curvas de probabilidade dos erros seguem a distribuição normal, enquanto a Figura 4.10 e a Figura 4.11 indicam que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente e uniformemente, concluindo que a viabilidade das regressões.

### 4.3

#### Sucateamento e Aquisição de uma Locomotiva

Uma particularidade deste estudo é em relação ao sucateamento do ativo, uma vez que a empresa não consegue simplesmente vender uma locomotiva a

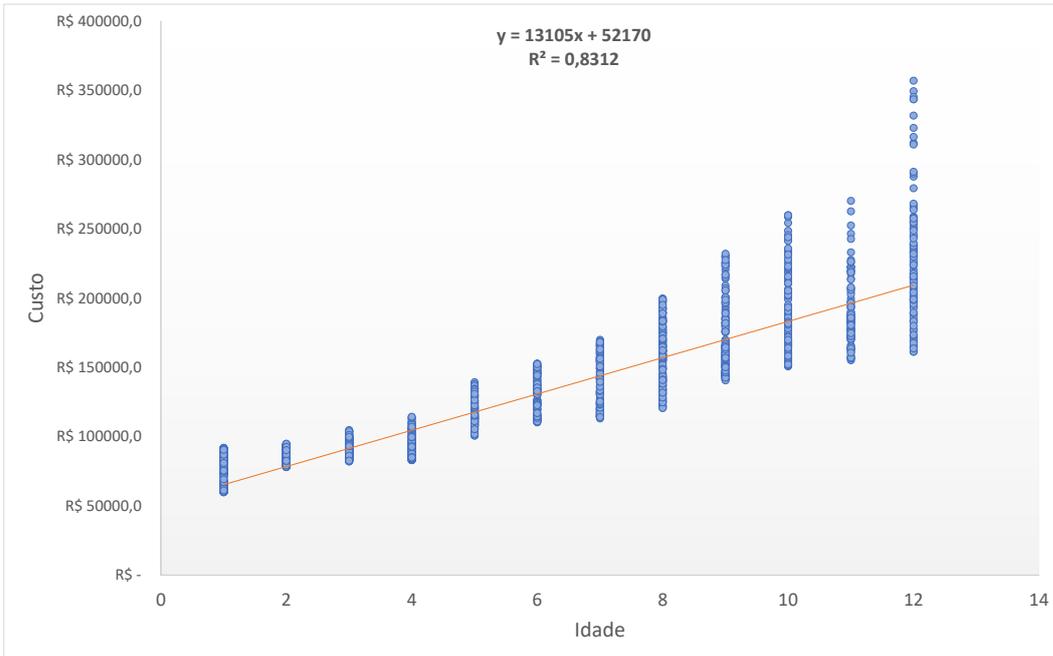


Figura 4.4: Gráfico de Regressão Linear da Idade Vs. Custo de Materiais

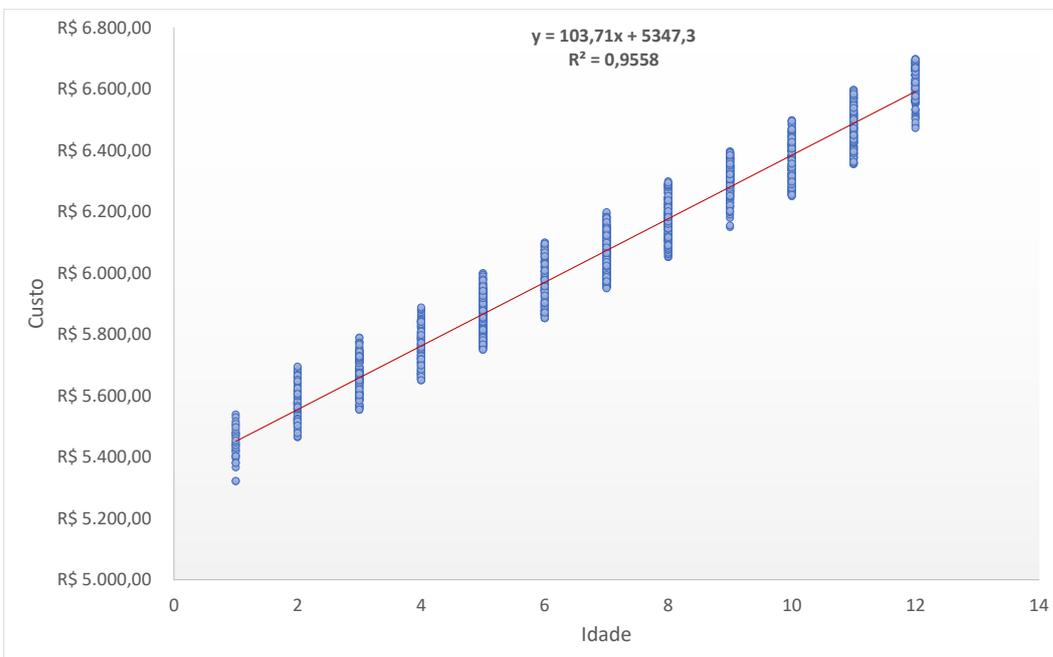


Figura 4.5: Gráfico de Regressão Linear da Idade Vs. Custo de Mão de Obra

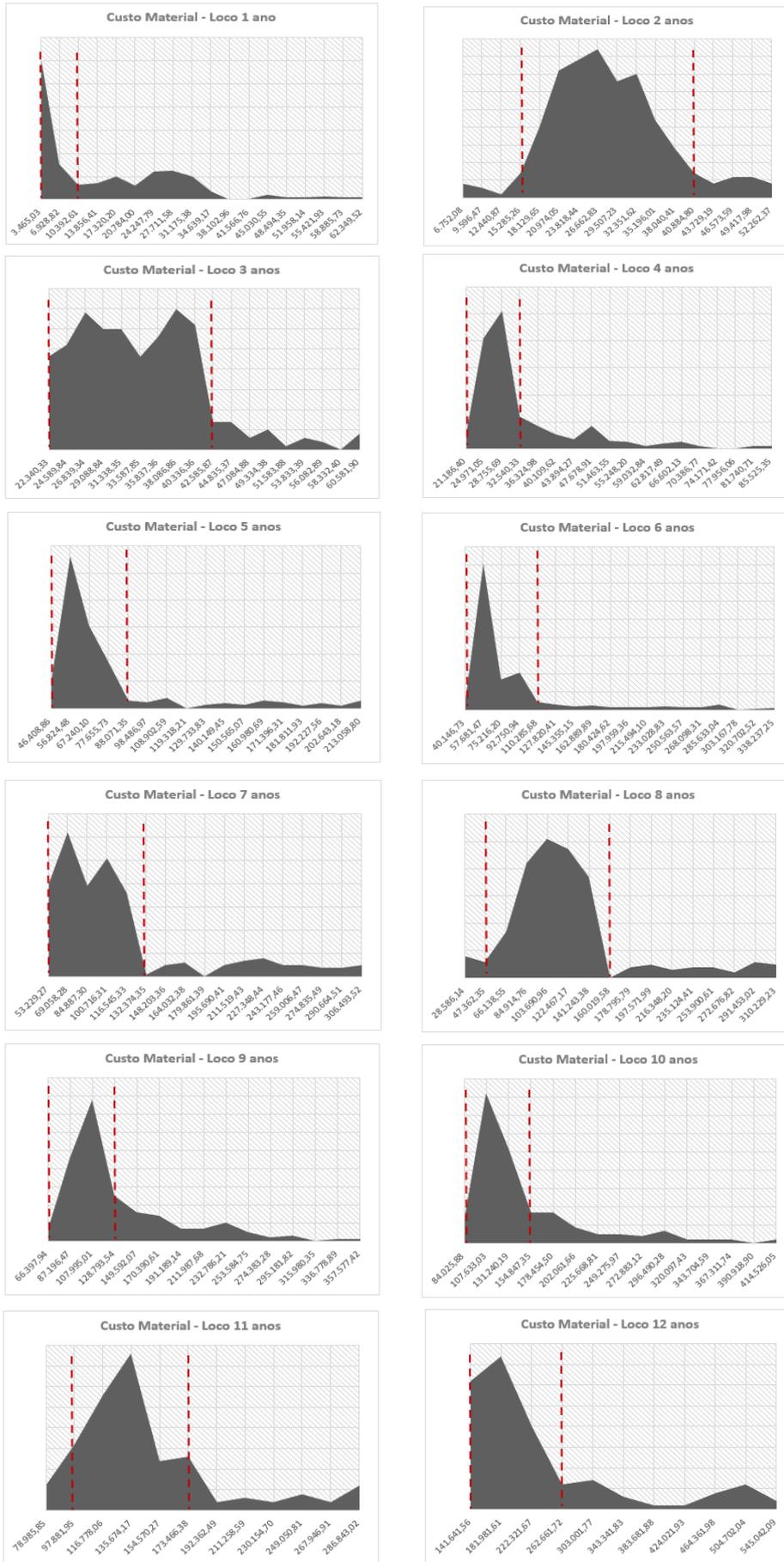
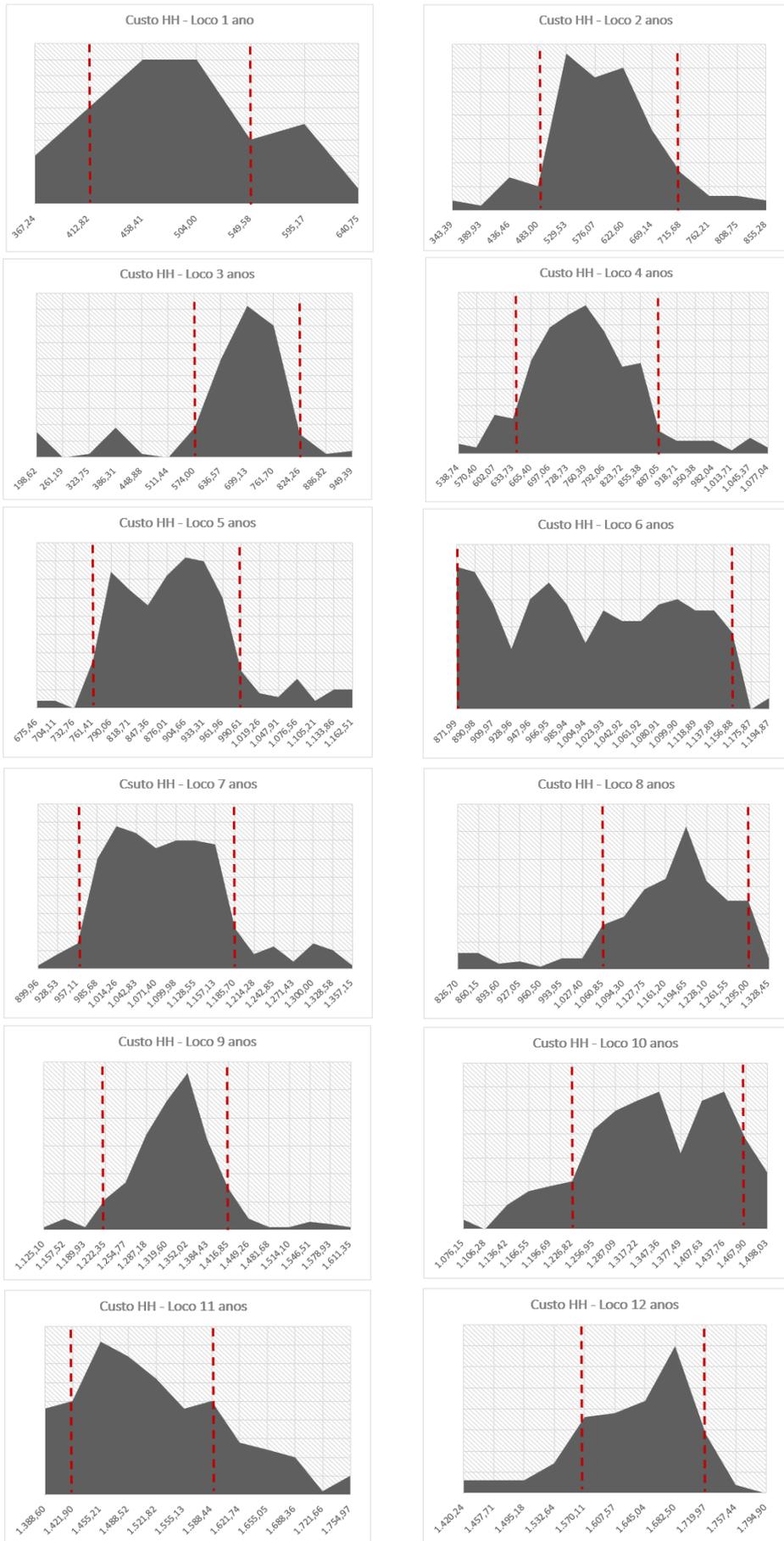


Figura 4.6: Histogramas Custo de Material



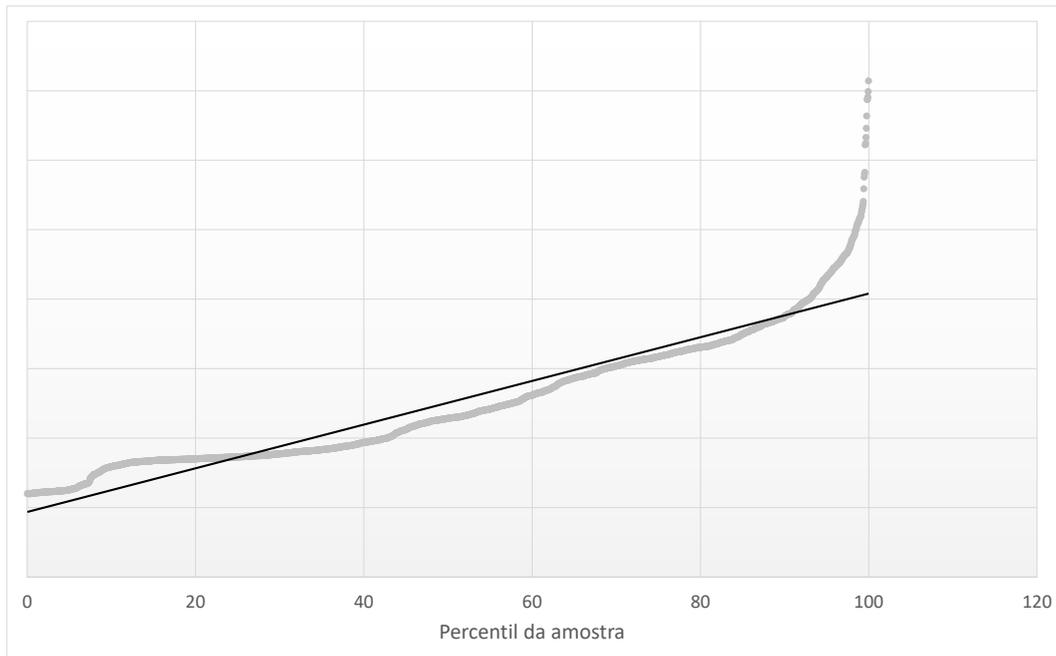


Figura 4.8: Gráfico de Regressão Linear do Custo de Materiais - Teste de Normalidade

PUC-Rio - Certificação Digital N° 2112236/CA

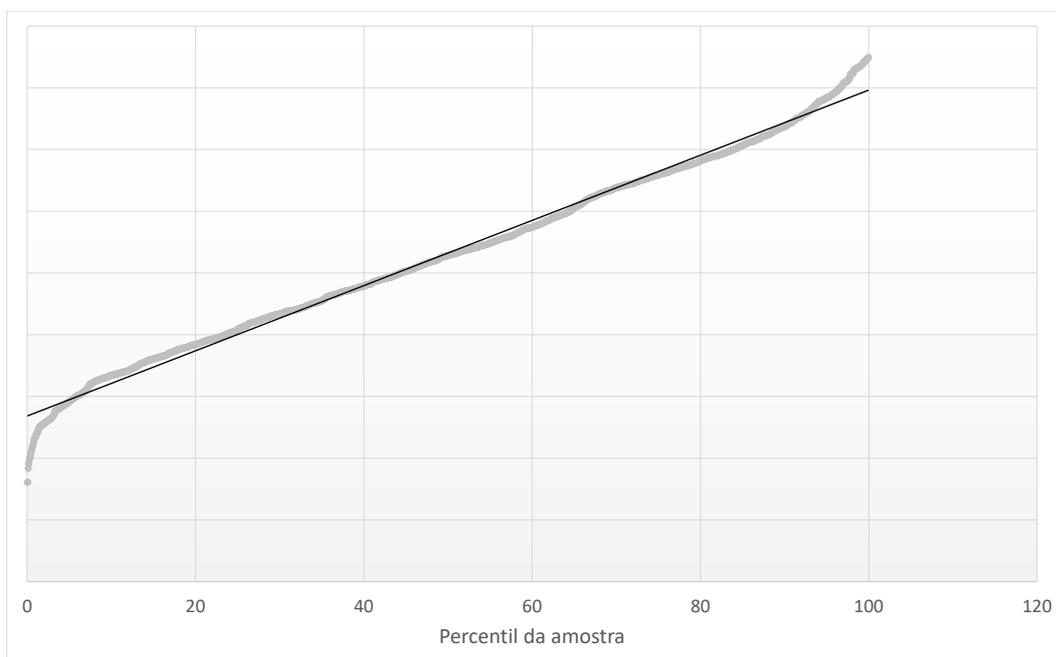


Figura 4.9: Gráfico de Regressão Linear do Custo de Mão de Obra - Teste de Normalidade

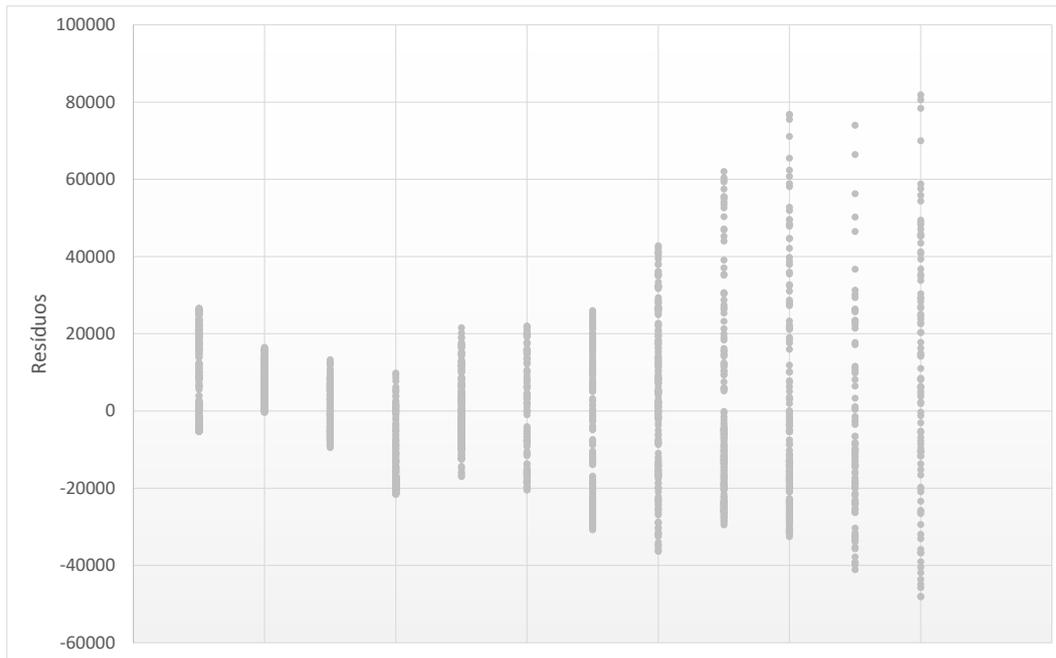


Figura 4.10: Gráfico de Regressão Linear do Custo de Materiais - Teste de Homocedasticidade

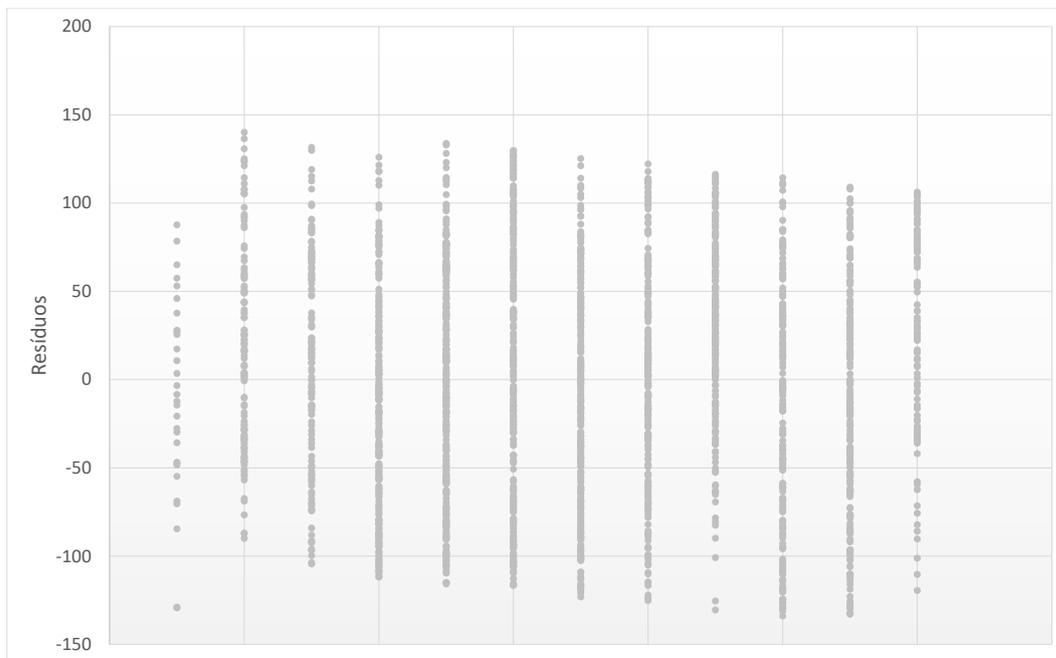


Figura 4.11: Gráfico de Regressão Linear do Custo de Mão de Obra - Teste de Homocedasticidade

qualquer momento, isso porque o ativo segue uma série de regras patrimoniais e controle ecológico para ser descartada. O processo mais comum é cortar a máquina para remover o máximo de peças que podem ser reaproveitadas na manutenção de outras locomotivas.

Como a troca de componentes é algo recorrente na manutenção em um volume muito grande, saber o estado de depreciação de cada peça no momento da remoção e calcular o resto de tempo da vida útil é infactível. Sendo assim, para mensurar o ganho do corte das locomotivas foi levantada uma lista de materiais que podem ser removidos da máquina e reaplicados em outra, assumindo como premissa seu bom estado de uso.

Os preços associados a esses componentes foram os mesmos utilizados quando ele passa pelo processo de recuperação interna da empresa. Dessa forma, ao invés da empresa ter que comprar os materiais novos para repor o sucateamento de peças que não foram possíveis recuperar, o atendimento é realizado por componentes vindos do corte das locomotivas. A diferença entre o preço do material novo e recuperado gera uma economia para o orçamento da manutenção da empresa. Uma outra opção é a venda dessas peças recuperadas para outras ferrovias trazendo receita direta para companhia. Assim, o descarte da locomotiva na decisão de substituição do ativo não está em função da idade deste, sendo utilizado de forma constante com um valor apurado de R\$ 250.000,00.

Para a aquisição do ativo foi considerado o preço de uma máquina nova do modelo AC44, já contemplando os custos de transporte e testes necessários. O montante total resulta em 25 milhões de reais. Vale lembrar que todos os custos usados neste trabalho foram alterados do real de forma igualitária para manter o comportamento da prática e preservar informações confidenciais da empresa.

## 5 Discussões dos Resultados

### 5.1 Problema de Substituição de Locomotivas com Regressão Linear

Com os dados necessários trabalhados, o PSE foi formulado para o caso da troca de locomotivas. O modelo proposto por TAHA (2008) foi utilizado como base para este estudo e é então utilizado da PD para resolvê-lo. Como visto, as idades atuais das máquinas variam de 1 até 12 anos, o que leva a necessidade de rodarmos o algoritmo uma vez para cada idade, já que para máquinas de mesma idade o resultado vai ser o mesmo.

- Variáveis
  - Estágios do problema:  $i$  pertencendo ao conjunto de anos (2023, 2024, ..., 2055, 2056)
  - Idade do ativo:  $t$  pertencendo ao conjunto de idades (0, 1, ..., 39, 40)
  - Receita máxima do ativo: função  $f$ . Logo  $f_i(t)$  é a receita máxima da locomotiva de idade  $t$  no ano  $i$ . A unidade de medida utilizada foi R\$.
- Opção de manter a locomotiva

Conforme o modelo de TAHA (2008) a opção de manter o equipamento é composta por uma parcela da receita do ativo, uma parcela dos custos associados para operar o ativo e o valor da função no próximo estágio com a locomotiva 1 ano mais velha. Essa última parte se faz necessária pois a decisão é tomada no início de cada estágio, e de acordo com a decisão tomada, a empresa é obrigada a receber a receita que a locomotiva vai gerar durante o decorrer de todo o ano, sendo essa nova ou não. Só no próximo estágio que a estratégia poderá ser alterada. Um ponto de atenção desde estudo é que estão sendo consideradas duas fontes de custos associadas às locomotivas: materiais e mão de obra para manutenção. Sendo assim, ao invés de uma equação de custo, a formulação do problema terá duas equações conforme segue o esquema na Figura 5.1.

$$\underbrace{(-27.666,03t + 25.882.048,69)}_{\text{Receita da locomotiva}} - \underbrace{(13.105t + 52.170)}_{\text{Custo de materiais}} - \underbrace{(103,71t + 5.347,3)}_{\text{Custo de mão de obra}} + \underbrace{f_{i+1}(t+1)}_{\text{Decisão ótima no próximo estágio}}$$

Figura 5.1: Formulação da Opção de Manter a Locomotiva

– Opção de substituir a locomotiva

Na opção de substituir a locomotiva, o modelo de TAHA (2008) propõe uma equação baseada na receita gerada por uma máquina nova além do montante relacionado à venda desta. Vale lembrar que neste estudo o valor de venda da locomotiva está sendo substituído pela economia na compra de materiais para manutenção que gera ao cortar uma locomotiva e reaproveitar alguns de seus componentes. As parcelas de custos associados a esta estratégia se baseiam no custo de manutenção e no gasto de aquisição de uma locomotiva nova. Assim como no caso de manter, os custos de manutenção de um ativo novo se dividem em materiais e mão de obra, além disso é acrescido a fração inerente ao valor da função no próximo estágio, porém nesse caso a idade da locomotiva é igual a 1 ano. A Figura 5.2 mostra a formulação dessa opção.

$$\underbrace{25.882.048,69}_{\text{Receita da locomotiva nova}} + \underbrace{250.000}_{\text{Economia na aquisição de peças novas}} - \underbrace{25.000.000}_{\text{Custo de aquisição de uma locomotiva}} - \underbrace{(52.170 + 5.347,3)}_{\text{Custo de materiais e mão de obra para manutenção, respectivamente.}} + \underbrace{f_{i+t}(1)}_{\text{Decisão ótima no próximo estágio com o ativo de 1 ano.}}$$

Figura 5.2: Formulação da Opção de Substituir a Locomotiva

– Condições de contorno

Para o problema de substituição de locomotivas tem-se duas condições de contorno a serem consideradas. A primeira diz respeito a premissa adotada de substituir as máquinas no último estágio. Essa premissa se faz necessária uma vez que foi utilizada a PD recursiva regressiva, ou seja, parte de uma decisão conhecida no último estágio e otimiza a decisão de  $i - 1$ . O mesmo seria necessário se fosse utilizada uma abordagem progressiva, porém neste caso a decisão conhecida seria a do primeiro estágio e a otimização seria feita em  $i + 1$ . A escolha do método de PD a ser utilizada se sustentou no fato de que já existe um histórico de aquisição gradativa das locomotivas em estudo, na prática não seriam compradas todas logo no primeiro estágio para atendimento

do volume de minério. Por outro lado, caso a empresa decida não renovar seu contrato de concessão no ano de 2056, todas as máquinas teriam que ser descartadas com um ganho apenas da parcela de sucateamento de peças que, nesse caso, seria a venda dos componentes da locomotiva como receita alternativa. Assim, a opção mais factível para o caso estudado é o método regressivo. A segunda restrição do problema é o limite máximo imposto pela ANTF para idade das locomotivas poderem circular no trecho. Conforme o contrato estabelecido, o limite estimado é de no máximo 40 anos de idade, nessa idade a locomotiva deve ser trocada. A Figura 5.3 indica a formulação das condições de contorno do problema.

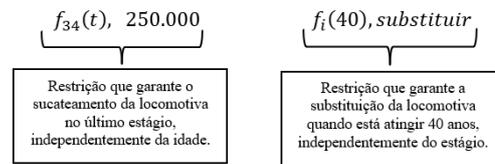


Figura 5.3: Formulação das Condições de Contorno

Unindo todas as equações apresentadas para compor o modelo de PD no caso de substituição de locomotivas, tem-se formulação completa mostrada na Figura 5.4.

$$f_i(t) = \{(-27.666,03t + 25.882.048,69) - (13.105t + 52.170) - (103,71t + 5.347,3) + f_{i+1}(t + 1), se\ mantiver$$

$$25.882.048,69 + 250.000 - 25.000.000 - (52.170 + 5.347,3) + f_{i+1}(1), se\ substituir$$

Sujeito a:

$$f_{34}(t), 250.000$$

$$f_i(40), substituir$$

Figura 5.4: Formulação Completa do PSE para o Caso de Locomotivas

O problema foi desenvolvido em um programa de Excel ano 2016, os quais o tempo de processamento das fórmulas é quase que instantâneo e por isso não foram realizadas análises em relação a este. Sobre as propriedades da máquina, seguem:

- Processador: *11th Gen Intel® Core™ i5-1135G7 @ 2.40GHz 2,42GHz*
- Memória instalada (RAM): 8,00 GB
- Tipo de sistema: Sistema Operacional de 64 bits, processador com base em x64
- Sistema Operacional: *Windows 10 Home Single Language*

A Tabela 5.1 mostra os resultados gerados pela PD em cada estágio do problema, considerando a idade atual das máquinas na vertical e os anos de planejamento na horizontal. A decisão de substituir o ativo é representado pela letra “S” enquanto a opção de mantê-lo é representada pela letra “M”. É possível perceber que ao longo do próximo ciclo de concessão é indicado para a empresa realizar a renovação da frota de locomotivas AC44 acima de sete anos de idade atualmente, iniciando em 2033 e terminando em 2036. Este intervalo representa o melhor momento de substituição dos ativos a fim de gerar a maior receita possível no horizonte avaliado.

Um ponto que vale chamar atenção é que o objetivo do modelo é maximizar a receita da empresa em um determinado intervalo de tempo e não definir o ciclo de vida das locomotivas. É importante ter esse conceito claro, pois a troca dos ativos não precisa necessariamente coincidir com o fim do seu ciclo de vida, ou seja, no problema estudado, uma máquina de 12 anos atualmente apresentou o resultado de substituir por volta de 23 anos de uso em 2033, porém ao simular para uma máquina com idade atual de 1 ano a decisão seria de desfazer dela só aos 35 anos de uso devida a chegada do último estágio, em 2056. Percebe-se que o tempo de utilização do ativo é totalmente diferente, isso acontece porque o problema está buscando o maior retorno financeiro que a empresa pode ter no horizonte de planejamento dado uma idade atual da locomotiva.

Avaliando alguns exemplos extremos, percebe-se que casos em que a substituição da máquina é certa no horizonte de planejamento, o momento de troca dela será otimizado em um ano em que o lucro total seja maximizado. Já para casos em que a idade da máquina no final do horizonte de planejamento não extrapole a restrição de 40 anos, gera uma preferência por trocar o ativo só no último estágio, isso ocorre pois submeter aos custos de substituição do ativo acarreta em um lucro total menor do que em manter a mesma máquina todos os anos.

Como mencionado anteriormente, a curva de substituição gerada no modelo foi criada de forma recursiva regressiva na Programação Dinâmica, ou seja, o ponto de partida para o cálculo foi o último estágio onde se conhece a decisão a ser tomada, a partir de então subproblemas foram resolvidos para os estágios anteriores com informações memorizadas do futuro, otimizando o processo iterativo do problema.

Tabela 5.1: Tabela de Resultados da PD com Regressões Lineares

	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56			
12	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S		
11	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	
10	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	
9	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	
8	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	
7	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	
6	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
5	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
4	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
3	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
2	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
1	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S

\*As linhas segmentam os resultados de acordo com a idade atual da locomotivas enquanto as colunas pelos anos de planejamento. A letra "M" indica a decisão de manter e a letra "S" a decisão de substituir a locomotiva. O destaque em verde representa a substituição do ativo por um outro novo, já o destaque em amarelo indica a substituição apenas com o reaproveitamento ou venda de peças no mercado.

## 5.2

**Problema de Substituição de Locomotivas com Outras Regressões Polinomiais**

Com o intuito de alavancar a acuracidade dos resultados, foram testados outros modelos de regressões polinomiais para as curvas de receita e custos do problema. A Tabela 5.2 resume os resultados dos principais parâmetros das regressões testadas.

Tabela 5.2: Tabela de Resultados dos Parâmetros das Regressões Polinomiais Testadas

Equação	Regressão	Correlação	R <sup>2</sup>	Erro relativo	P-valor	REMQ
Receita	Linear	80%	64%	0,20%	< 5%	61.794
	Quadrática	81%	65%	0,19%	< 5%	60.796
	Cúbica	82%	67%	0,19%	< 5%	59.221
Custo Material	Linear	91%	83%	10,9%	< 5%	19.713
	Quadrática	92%	84%	10,7%	< 5%	19.206
	Cúbica	92%	84%	10,7%	> 5%	19.207
Custo Mão de Obra	Linear	98%	96%	0,90%	< 5%	64
	Quadrática	98%	96%	0,90%	< 5%	64
	Cúbica	98%	96%	0,90%	> 5%	64

Pode-se perceber que, apesar de pequenas as diferenças, a regressão cúbica alcançou resultados melhores para os parâmetros de correlação, R<sup>2</sup> e erro relativo para a curva histórica de receita das locomotivas. Já no custo de materiais a regressão quadrática e a cúbica sobressaíram igualmente em relação ao teste linear, no entanto, a regressão cúbica apresentou um *p-valor* maior que 5% para um dos coeficientes da equação. O mesmo ocorreu com a regressão cúbica do custo de mão de obra, porém nesta os números dos parâmetros para regressão linear e quadrática ficam iguais. Uma outra medida que indica a qualidade dos modelos testados é a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE do inglês *Root Mean Squared Error*) que expressa o erro médio do modelo preditivo, em relação aos dados originais. Esse indicador reafirma o resultado dos demais, apontando maior acurácia na regressão cúbica para receita das locomotivas, regressão quadrática para o custo de materiais e indiferente entre as regressões do custo de mão de obra. Vale ressaltar que todas as simulações passaram nos testes de normalidade e homocedasticidade dos resíduos.

Com esses resultados a formulação da PD foi reconstruída aplicando a regressão cúbica na receita das locomotivas (Figura 5.5), regressão quadrática no custo de materiais (Figura 5.6) e por escolha arbitrária manteve-se o modelo linear para representar o custo de mão de obra.

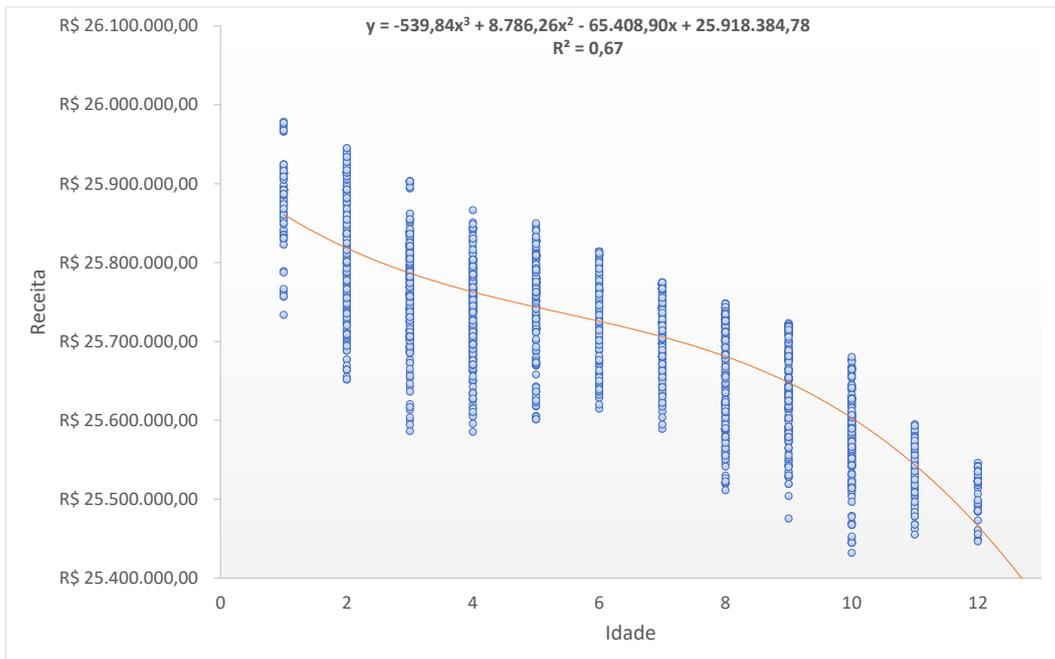


Figura 5.5: Gráfico de Regressão Cúbica da Idade Vs. Receita das Locomotivas

PUC-Rio - Certificação Digital N° 2112236/CA

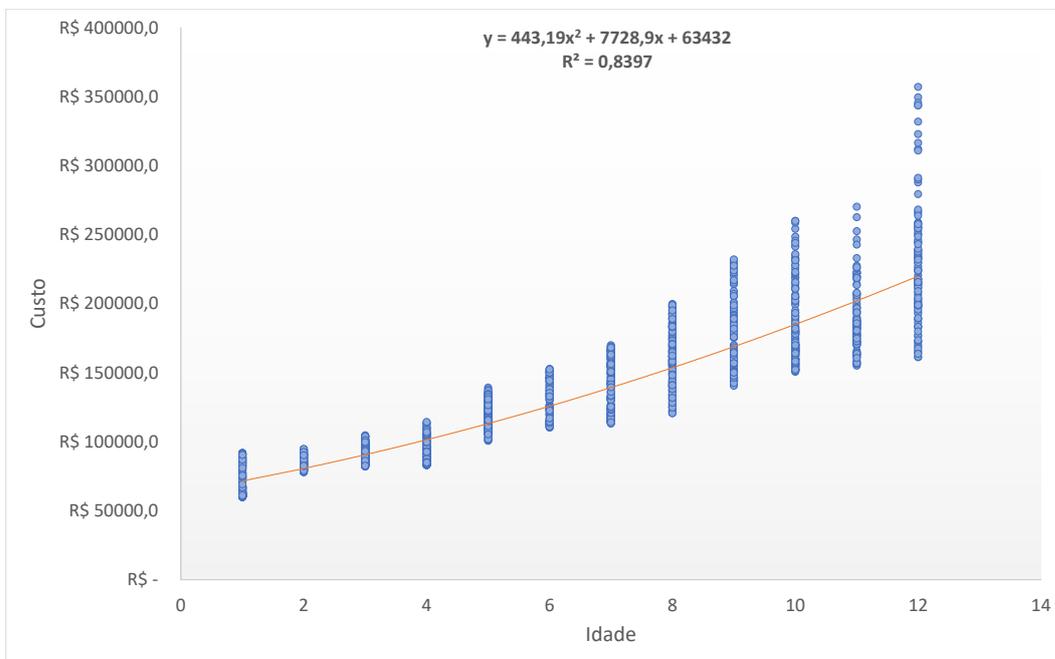


Figura 5.6: Gráfico de Regressão Quadrática da Idade Vs. Custo de Materiais

Os resultados da PD com os novos modelos de regressão da receita e custo de materiais apresentados na Tabela 5.3 indicam um comportamento mais agressivo de substituição das locomotivas. Nesse novo modelo a substituição do ativo irá ocorrer antes de 2056 independentemente de sua idade atual. Para máquinas até 11 anos de idade será realizada uma substituição quando elas completarem entre 18 e 20 anos de uso, no período de 2034 até 2039. Locomotivas acima de 11 anos terão dois momentos de trocas no horizonte de planejamento, tendo ciclos de vida ainda menores, em torno de 15 e 16 anos. Fazendo algumas simulações com máquinas fictícias de até 39 anos atualmente, foi observado que a maior quantidade de substituições a serem realizadas são de 3 trocas, isso ocorria com locomotivas acima de 17 anos de uso no primeiro estágio.

Essa mudança de comportamento nas decisões apresentadas na Tabela 5.1 e na Tabela 5.3 se deve principalmente pelo fato de que a regressão quadrática do custo de materiais cresce de forma mais acelerada do que a regressão linear ao mesmo tempo que a regressão cúbica da receita reduz os ganhos operacionais da máquina de forma mais acentuada que o modelo linear. Somados, esses efeitos viabilizam mais rápida a substituição do ativo.

### 5.3 Análise de Sensibilidade

Por último, foi realizada uma análise da sensibilidade do modelo para identificar a variação do lucro total no horizonte de planejamento caso a empresa decida mudar o momento ótimo de substituição das locomotivas.

A análise foi realizada para os dois casos de regressões apresentados, o primeiro com todas as regressões lineares e o segundo com regressões polinomiais que tiveram os melhores resultados nos indicadores de correlação e erro. Basicamente a simulação de sensibilidade foi baseada forçar a troca dos ativos 1 ano antes ou depois do momento ótimo indicado na Programação Dinâmica. A partir disso, foi comparado o lucro médio anual que uma locomotiva gera ao longo dos 34 anos de planejamento no cenário ótimo de substituição, no cenário com 1 ano de antecipação e no cenário com 1 ano de postergação da troca da máquina. Por fim, dado que a solução do problema estudado busca maximizar o lucro no horizonte de planejamento e não definir o ciclo de vida do ativo, foi necessário rodar a simulação de sensibilidade para cada idade atual do ativo, já que esse é um parâmetro determinante para o resultado do modelo.

A Tabela 5.4 e a Tabela 5.5 mostram o lucro médio unitário das locomotivas considerando os resultados das PD com regressões lineares e regressões polinomiais respectivamente.

Tabela 5.3: Tabela de Resultados da PD com Outras Regressões Polinomiais

	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56		
12	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	
11	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
10	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
9	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
8	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
7	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
6	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
5	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
4	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
3	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
2	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S
1	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S

\*As linhas segmentam os resultados de acordo com a idade atual da locomotivas enquanto as colunas pelos anos de planejamento. A letra "M" indica a decisão de manter e a letra "S" a decisão de substituir a locomotiva. O destaque em verde representa a substituição do ativo por um outro novo, já o destaque em amarelo indica a substituição apenas com o reaproveitamento ou venda de peças no mercado.

Tabela 5.4: Tabela de Lucro Médio Unitário das Locomotivas (em R\$ MM) – Regressões Lineares

Idade atual das locomotivas	Lucro ótimo da PD com Regressões Lineares	Redução no Lucro com 1 ano de antecipação da substituição	Redução no Lucro com 1 ano de postergação da substituição
1	435,73	-14,2	x
2	435,02	-13,65	x
3	434,3	-13,1	x
4	433,59	-12,53	x
5	432,87	-11,96	x
6	432,16	-11,37	x
7	432,89	-12,46	-0,5
8	433,26	-12,89	-0,48
9	433,15	-12,86	-0,48
10	433,51	-13,25	-0,45
11	433,41	-13,22	-0,45
12	433,76	-13,58	-0,42

Tabela 5.5: Tabela de Lucro Médio Unitário das Locomotivas (em R\$ MM) – Outras Regressões Polinomiais

Idade atual das locomotivas	Lucro ótimo da PD com Outras Regressões Polinomiais	Redução no Lucro com 1 ano de antecipação da substituição	Redução no Lucro com 1 ano de postergação da substituição
1	429,72	-10,49	-0,32
2	429,44	-10,8	-0,2
3	428,87	-10,56	-0,2
4	428,41	-10,69	-0,11
5	427,8	-10,43	-0,06
6	427,12	-10,35	-0,12
7	426,46	-10,08	-0,06
8	425,54	-9,72	-0,24
9	424,86	-9,44	-0,16
10	423,66	-8,78	-0,06
11	422,96	-8,44	-0,06
12	427,35	-9,51	-0,09

Com base nos resultados encontrados pode-se dizer que existe um impacto financeiro em mudar o ano da substituição das locomotivas. No caso da Tabela 5.4, postergar 1 ano a troca de ativos com idade atual de 1 a 6 anos não é uma opção, isso porque o próprio modelo não indica substituir a máquina dentro do horizonte de planejamento, apenas descartá-la no último estágio com a venda dos seus componentes. Para esses casos foi avaliada apenas a opção de substituir o ativo no penúltimo estágio (antecipando 1 ano do resultado ótimo), o que na prática é uma opção inviável uma vez que a empresa teria que sucatear uma locomotiva praticamente nova no ano seguinte.

Ainda pode-se perceber que a antecipação da substituição tem um impacto financeiro maior no lucro ótimo do que a postergação, isso se explica primeiramente pelo fato de que, na maioria dos casos, a segunda substituição do ativo cai no último estágio, logo não existe a possibilidade de empurrar a decisão por mais um ano, ao contrário da antecipação, que acaba permitindo maiores alterações na estrutura da solução ótima. Outro fator que contribui para esse fenômeno é que os custos inerentes para substituir uma locomotiva são altos em relação ao que a empresa perde em trocar o ativo no momento exato, logo o peso de trocar mais vezes o ativo acaba sendo mais significativo do que manter o mesmo por um tempo maior.

Uma última consideração a ser destacada é que uma vez que o segundo modelo representa melhor o comportamento das receitas e custos das locomotivas, as variações deste são menos expressivas financeiramente do que no modelo com regressões lineares.

## 6

### Conclusões

O trabalho realizado possibilitou por meio de PD resolver um caso particular do PSE em uma empresa nacional de transporte ferroviário. A análise feita foi para a troca de um conjunto de locomotivas do modelo AC44 ao decorrer de 34 anos, iniciando em 2023. A motivação para este estudo foi o processo de renovação do contrato de concessão da malha ferroviária junto aos órgãos do governo federal, que passará a exigir um tempo de vida máximo para tais máquinas poderem circular no trecho com produção para a empresa.

O trabalho ainda contou com uma análise de sensibilidade do resultado caso a empresa opte por alterar o momento ideal de troca dos seus ativos. Como a proposta do modelo é garantir o maior retorno financeiro que a empresa pode ter dado às restrições impostas para substituição das locomotivas, qualquer alteração da decisão determinada pela PD nos anos de horizonte de planejamento tende a alterar de forma negativa o retorno financeiro. As rodadas realizadas tiveram como objetivo sensibilizar o quanto a empresa perde com as mudanças na solução ótima.

O PSE foi abordado em uma perspectiva determinística uma vez que o aumento dos custos de manutenção das locomotivas são de forma geral decorrentes de desgastes dos vários sistemas que compõem o mecanismo das máquinas devido ao tempo de vida útil. Contudo, um caminho que se abre para pesquisas futuras é avaliar a substituição de componentes individuais das locomotivas. Para isso será necessário aplicar uma abordagem probabilística na formulação do problema, já que as causas de avarias em alguns itens podem ocorrer de forma aleatória, sem estar necessariamente associada ao tempo de vida útil do mesmo.

Uma outra possibilidade de pesquisa futura é incorporar uma terceira opção no problema de substituição das locomotivas. Isso se dá pelo fato da empresa utilizar o ativo para serviços internos de manobras em pátios e oficinas, ou seja, o ativo é destinado a operações limitadas como rebocagens de ativos avariados no trecho ou movimentações de entrada e saída de vagões em oficinas. Assim uma determinada locomotiva pode não ser cortada para retirada de materiais e nem utilizada para circulação de trens de produção (obedecendo a nova regra do contrato de concessão). O principal desafio de incorporar esse

terceiro cenário é associar uma receita que justifique os custos de manutenção que incidam sobre o ativo mesmo em condições de uso restrita.

A relevância deste trabalho se torna grande para empresa, uma vez que a mesma já fechou seu processo de renovação da concessão da malha com o governo de forma antecipada, atualizando a licença para circulação no trecho destinado a ela até o ano de 2056. O novo contrato passa a valer a partir de 2026, ano de vencimento do contrato vigente assinado em 1996, e a partir de então nenhuma locomotiva com idade de 40 anos para cima poderá ser utilizada para transportar vagões carregados. Assim, o setor de planejamento estratégico da empresa precisa incorporar no plano de negócio da empresa a curva de aquisição de ativos novos. Esse material engloba as estratégias da companhia de todos os setores para os próximos 5 anos e é renovado todo o ano junto a diretoria e presidência da empresa. Nesta defesa é preciso justificar o porquê da compra dos ativos nos momentos determinados e os impactos de não realizá-los conforme proposto, respostas complexas que o trabalho trouxe de forma racional e com número reais para serem apresentados.

A substituição de ativos ferroviários sempre é uma discussão delicada a se fazer, pois envolve grandes investimentos que precisam compensar em impactos operacionais na circulação dos trens, trazendo melhorias em eficiência, produtividade, capacidade e segurança que de forma geral são refletidos na receita gerada pela máquina e também redução de custos de manutenção que acaba sendo o maior ofensor da utilização do equipamento. Assim, espera-se que outras empresas possam se inspirar neste estudo e utilizar técnicas de PO para realizarem a substituição de locomotivas de maneira precisa e sustentável para o negócio.

## Referências bibliográficas

- ABENSUR, E. O. (2010). Um modelo alternativo de otimização para a política de reposição de equipamentos. In *XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, volume 11, pages 140–150, São Carlos, SP.
- ALARCÓN, L. F., RODRÍGUEZ, A., e MOURGUES, C. (2012). Impact of machine-failure costs on equipment replacement policies: tunneling company case study. volume 138, pages 767–774. American Society of Civil Engineers.
- ANTF, A. N. D. T. F. (2022). Concessões ferroviárias. <https://www.antf.org.br>. Acesso em: Maio de 2022.
- ANTT, A. N. D. T. T. (2022). Concessões ferroviárias. <https://www.gov.br/antt>. Acesso em: Maio de 2022.
- ASSIS, A. C. V., SILVA, C. A. d., Marchetti, D. d. S., DALTO, E. J., RIOS, E. C. S. D., e FERREIRA, M. d. A. (2017). Ferrovias de carga brasileiras: uma análise setorial. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.
- BRASIL, M. D. I. (2022). Plano nacional de logística 2035. <https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>. Acesso em: Maio de 2022.
- CAMPELLO, R. E. (2002). Programação dinâmica determinística e estocástica. Rio de Janeiro, RJ. XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- CARDOSO, R. T. N. (2005). Algoritmos para programação dinâmica baseados em famílias invariantes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- CECHIN, R. B., BIASUZ, R., FALAVIGMA, A., e CORSO, L. L. (2019). Programação dinâmica aplicada à redução de custos nas compras de vacinas de um hospital. volume 52, pages 287–294, Caxias do Sul, RS. Medicina (Ribeirão Preto).
- CHUKWUNENYE, U., CLETUS, T. D., IMEGI, O. J., e AZI, N. I. (2017). Optimal machine replacement strategies using dynamic programming recursions: a case study of nasco household products ltd., jos. International Research Journal of Mathematics, Engineering and IT.

- CNT, C. N. D. T. (2015). Gargalos reduzem eficiência do transporte ferroviário. <https://www.cnt.org.br>. Acesso em: Maio de 2022.
- COELHO, R. W. S. (2015). Aplicação do conceito de gestão de ativos físicos numa estação elevatória de águas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- COSTA, J. C. d. O. R. e SILVA, M. M. (2019). Aplicação da programação dinâmica determinística na substituição de equipamentos em uma indústria de alimentos. Technical report, UFPE–Universidade Federal de Pernambuco.
- CRUZ, V. N., FERNANDES, J. M., e REIS, L. P. (2015). Análise do processo de substituição de equipamentos por meio do método caue em uma mineradora de grande porte. Technical report, UFOP–Universidade Federal de Ouro Preto.
- DARÚ, G. H. e LACERDA, V. C. (2005). Utilização de programação dinâmica multirotulada para balanceamento do uso de ferramenta. In *Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, volume 28, page 2005.
- FELIX, M. e CAVALCANTE FILHO, J. (2016). Marco normativo do setor ferroviário brasileiro: caminhos para superação da insegurança jurídica e regulatória. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado.
- FGV, F. G. V. (2022). Índice geral de preços. <https://portal.fgv.br>. Acesso em: Dezembro de 2022.
- GUERRA NETO, P. P. (2019). Evolução dos contratos das concessões de ferrovias. Escola Nacional de Administração Pública (Enap).
- HARTMAN, J. C. e ROGERS, J. (2006). Dynamic programming approaches for equipment replacement problems with continuous and discontinuous technological change. volume 17, pages 143–158. Oxford University Press.
- HERNÁNDEZ-CHOVER, V., CASTELLET-VICIANO, L., e HERNÁNDEZ-SANCHO, F. (2021). Operational indicators to manage the replacement of electromechanical equipment in wastewater treatment facilities. volume 20, pages 1637–1656. World Scientific.
- HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. (2013). *Introdução à pesquisa operacional*. McGraw Hill Brasil, São Paulo, SP.
- HIRSCHFELD, H. (2001). Engenharia econômica e análise de custos, 5ª.
- KARDEC, A. e NASCIF, J. (2009). *Manutenção-função estratégica*. Qualitymark Editora Ltda, Rio de Janeiro, RJ.

- LARBI REBAIAIA, M. e AIT-KADI, D. (2021). Maintenance policies with minimal repair and replacement on failures: analysis and comparison. volume 59, pages 6995–7017. International Journal of Production Research.
- MAITI, M., KRAKOVICH, V., SHAMS, S. R., e VUKOVIC, D. B. (2020). Resource-based model for small innovative enterprises. volume 58, pages 1525–1541. Emerald Publishing Limited.
- MARQUES, G. M. (2003). Transformação e substituição de equipamentos utilizando equações diferenciais e programação dinâmica. Technical report.
- MEHAIRJAN, R. P. Y. et al. (2017). *Risk-based maintenance for electricity network organizations*. Springer, Roterdã, Holanda.
- MÉLO FILHO, M. A. (2020). Da regulação responsiva à regulação inteligente: uma análise crítica do desenho regulatório do setor de transporte ferroviário de cargas no brasil. volume 6, pages 144–163.
- MIRANDA, E. G. L. O. d. et al. (2009). Desenvolvimento de uma aplicação para análise de substituição de equipamentos industriais. Ponta Grossa, PR. IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção.
- RODRIGUES, R. P. P. (2020). Substituição de equipamentos: aplicação à gestão de frotas automóveis. Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve.
- SADEGHPOUR, H., TAVAKOLI, A., KAZEMI, M., e POOYA, A. (2019). A novel approximate dynamic programming approach for constrained equipment replacement problems: A case study. volume 14.
- SILVEIRA, F. F. (2009). Um simulador em software livre para suporte à decisão de substituição de máquinas agrícolas. Santos, SP. XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção.
- SILVEIRA, M. R. (2002). Transporte e logística: as ferrovias no brasil. volume 17, pages 63–86. Geosul.
- SOEIRO, F. R. (2020). Aplicação do controle de estoques dinâmico em multiperíodos em ambiente industrial. Campinas, SP. LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- TAHA, H. (2008). *Pesquisa operacional: uma visão geral. 8ª Edição*. São Paulo, SP.

- TANCREDO, F. V. P. (2018). Modelo para determinação da maturidade de uma organização na gestão de ativos físicos. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- VICHEZ, M. K. T., OBLITAS, J. F. C., e CASTRO, W. M. S. (2020). Optimization of the replacement time for critical repairable components. volume 87, pages 93–99. Dyna.
- YATSENKO, Y., HRITONENKO, N., e BORANBAYEV, S. (2020). Non-equal-life asset replacement under evolving technology: a multi-cycle approach. volume 65, pages 339–362. The Engineering Economist.