Programação Dinâmica para Substituição de Ativos Ferroviários

Thales Campos Andrade e Rafael Martinelli
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro / RJ, 22.451-900
thales.andrade@aluno.puc-rio.br; martinelli@puc-rio.br

RESUMO

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 mais vem sendo utilizada 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 tem 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.

PALAVRAS CHAVE. Problema de Substituição de Equipamentos, Logística Ferroviária, Programação Dinâmica.

Tópicos: OC – Otimização Combinatória, L&T – Logística e Transportes.

ABSTRACT

Asset Management is a crucial approach to the performance of organizations as they seek to align technical engineering aspects 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 aim to decide the best option between maintaining or replacing the equipment in a certain time interval. One of the methodologies that has been used most 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 aims to determine a replacement curve for a set of locomotives of a company in the railway sector, considering an age limit to be able to circulate and their history of revenues and costs over the years.

KEYWORDS. Equipment Replacement Problem, Railway Logistics, Dynamic Programming.

Paper topics: CO – Combinatorial Optimization, L&T – Logistics & Transportation.

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 R $160 bilhões nos próximos anos.

De acordo com a Agência Nacional de Transporte Ferroviário 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. O período de concessão é equivalente a 30 anos após início da vigência do contrato, onde uma das cláusulas exigidas é um tempo de vida máximo das locomotivas para poderem circular 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 [2009] complementa 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 tomar decisões mais assertivas através de otimização de modelos matemáticos [Maiti et al. 2020]. A Programação Dinâmica 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) em que a decisão tomada em um ano afeta os resultados dos anos subsequentes [Cardoso 2005; Hillier e Lieberman 2013].

Este artigo visa utilizar a Programação Dinâmica determinística para solucionar um caso de PSE em uma empresa nacional de transporte ferroviário. O estudo busca elaborar um plano de substituição de locomotivas ao longo do próximo período de concessão, levando em consideração os custos relacionados à operação dos ativos e a receita gerada por eles na companhia.

O trabalho está organizado em cinco seções, começando com uma introdução sobre o contexto do problema a ser abordado. Na seção 2 é feita uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relevantes para o estudo e trabalhos similares. A seção 3 descreve o cenário onde o estudo de caso foi desenvolvido. A seção 4 é dedicado a metodologia de pesquisa utilizada para desenvolvimento do trabalho, para então alcançar os resultados apresentados e discutidos nas seções 5, finalizando com uma conclusão na seção 6.

2. Revisão Teórica

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 destes. 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].

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 2017; Alárcon et. al. 2012].

Neste contexto, surge o Problema de Substituição de Equipamentos 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 são variáveis que também vão influenciar na decisão de substituição [Marques 2003].

Taha [2008] apresenta em sua obra "Pesquisa Operacional: Uma Visão Geral" uma formulação matemática para o Problema de Substituição de Equipamento expressado em uma sequência de decisões tomada no início de cada ano avaliado:

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

Onde,

r(t) = Receita anual;
c(t) = Custo de manutenção anual;
s(t) = Valor de venda do ativo com t anos de idade;
I = Custo de aquisição de um ativo novo em qualquer ano;
i = Estágio da decisão, representado pelo ano dentro do horizonte de planejamento;
t = Idade do ativo no início do ano i.

Sujeito a:

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

Uma técnica da Pesquisa Operacional muito utilizada para resolução do Problema de Substituição de Equipamentos (PSE) é a Programação Dinâmica (PD). Criada por Richard Bellman na década de 50, a Programação Dinâmica baseia-se em encontrar soluções de forma recursiva para aplicações que exigem diversas decisões a serem tomadas para chegar na ótima. Nesses casos o problema pode ser decomposto em partes ou estágios [Darú 2005; Cechin et. al. 2019].

Marques [2003] definem os conceitos básicos de PD aplicados ao Problema de Substituição de Equipamentos:

- 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.

A Tabela 1 mostra alguns trabalhos que contribuíram na literatura do Problema de Substituição de Equipamentos.

Tabela 1: Literatura do problema de substituição de equipamentos

Atores	Ano	Estudos Realizados
Hartman e Rogers	2006	Aplicaram duas formulações de Programação Dinâmica para o problema de substituição de equipamentos a fim de compará-las, incluindo chegadas probabilísticas para inovações tecnológicas.
Abensur	2010	Desenvolveu um modelo matemático que junta técnicas de Engenharia Econômica e Programação Dinâmica para auxiliar no planejamento de longo prazo das empresas com a substituição de dois bens de capital.
Cruz et. al.	2015	Estudou o PSE em carregadeiras de rodas, utilizadas no processo de extração mineral. A proposta foi encontrar o melhor momento de substituição através de estudos econômicos, mais especificamente o método do Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).
Chukwunenye et. al.	2017	Utilizaram Programação Dinâmica para encontrar a melhor estratégia de substituição de máquinas de embalagens, além de avaliar a sensibilidade do preço destas que possa alterar a solução.
Costa e Silva	2018	Trabalharam com Programação Dinâmica para encontrar o momento de troca ideal de um forno em uma produção de biscoitos *wafer*.
Sadeghpour et. al	2019	Utilizaram Programação Dinâmica Aproximada com a metaheurísticas de Algoritmo Genético para resolver problemas de substituição de equipamento com restrições não lineares em larga escala em transformadores de uma empresa distribuidora de energia.
Abensur et. al.	2019	Desenvolveram um simulador para produtores rurais identificarem o melhor momento de troca de máquinas baseado em conceitos de Engenharia Econômica, como por exemplo fluxo de caixa.
Rodrigues	2020	Também aplicou o método do CAUE para o Problema de Substituição de Equipamentos em uma empresa do setor automotivo.
Furtado et. al.	2020	Aplicaram a Programação Dinâmica para revisão da política de compras de um insumo crítico em uma indústria eletroeletrônica, visando minimizar o custo esperado.
Larbi e Ait-kadi	2020	Compararam um modelo matemático sobre três estratégias de manutenção: envolvendo reparos mínimos de um componente em caso de falha, substituição completa de um componente apenas na primeira falha e substituição completa do componente a cada falha.
Vílchez et. al.	2020	Avaliaram os tempos médios entre intervenções e tempos médios entre falhas para determinar os tempos de substituição ideais de componentes críticos de escavadeiras hidráulicas operando em uma mina a céu aberto.
Yatsenko et. al.	2020	Proporam a utilização de um Algoritmo Multiciclo para auxiliar as empresas a tomarem decisões a respeito de substituição de ativos.
Hernández et. al.	2021	Combinaram Metodologias Multicritérios e aspectos econômicos para definir uma política de substituição técnico-econômica adequada de uma bomba sopradora, utilizada no setor de águas residuais.

Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

A maior parte dos trabalhos encontrados possuem um horizonte de planejamento em até 20 anos, a proposta deste 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 pesquisa operacional para o Problema de Substituição de Equipamento em empresas do setor ferroviário. 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 ANTF e possam compartilhar deste estudo.

3. Estudo de Caso

O presente trabalho foi realizado em uma empresa nacional de transporte ferroviário de cargas, que passa pelo processo de renovação da concessão da malha ferroviária junto aos órgãos do governo. O prazo de concessão tem um período de 30 anos e a última outorga vence em 2026, a qual teve início na privatização do setor. A empresa em questão busca renovar o acordo para mais um ciclo de 30 anos (até 2056). Assim, o período considerado como horizonte de planejamento para o estudo será de 2022 até 2056.

Dentre as premissas do contrato é estabelecido um limite de idade para as locomotivas circularem no trecho menor ou igual a 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.

O modelo de locomotivas mais utilizado na empresa são as AC44, que transportam praticamente todo o volume de minério de ferro devido sua alta performance. Ao total a companhia possui 456 locomotivas do modelo AC44 operando na frota atual, as quais foram adquiridas ao longo dos últimos 13 anos de concessão e serão o foco deste estudo para construir uma curva de substituição para a companhia, amortecendo os investimentos ao longo de mais um ciclo de concessão.

4. Metodologia de Pesquisa

Conforme apresentado na seção 2, o Problema de Substituição de Equipamentos 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 é 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 2021.

Alguns dos custos utilizados foram ajustados pelo Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) divulgado pela Fundação Getúlio Vargas [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 para preservar as informações reais.

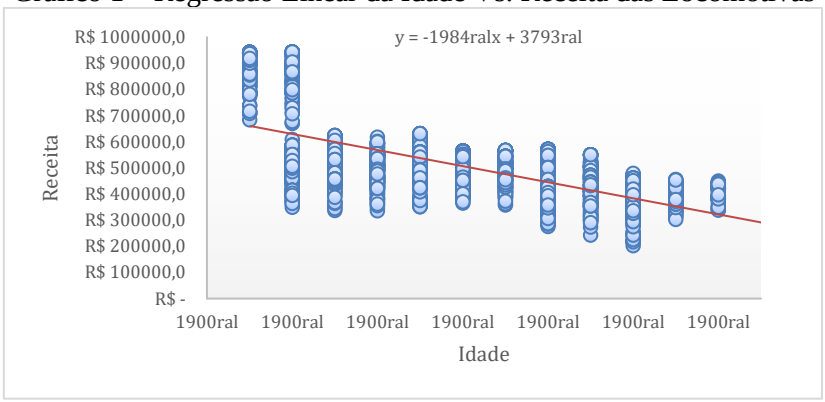
O primeiro levantamento realizado foi do ano de fabricação das locomotivas em estudo, as máquinas atuais têm idades que variam de 1 até 13 anos. Isso indica que, considerando apenas a regra da idade máxima para circulação, pode-se garantir que no horizonte dos 35 anos a serem analisados algumas das locomotivas devem ser substituídas por outras novas.

4.1 Receita da Locomotiva

A base para encontrar a receita gerada pelas locomotivas foi a disponibilidade operacional histórica. Para cada ano foi calculada uma disponibilidade média por locomotiva e associada à sua idade no respectivo ano. Em seguida, foi apurado o volume médio produzido em toneladas de minério de ferro nos últimos 12 anos, o qual foi rateado para cada máquina de acordo com a disponibilidade desta no ano avaliado. A partir desses valores, o volume transportado pela locomotiva foi transformado em valor monetário através do preço médio da tonelada do minério de ferro no mesmo intervalo de tempo.

Com uma base de dados histórica que relaciona a idade da máquina e a receita produzida por ela, 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 (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Regressão Linear da Idade Vs. Receita das Locomotivas

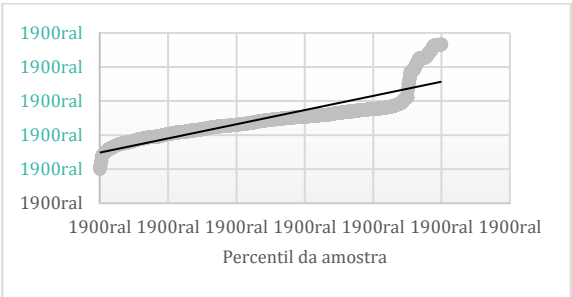


Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

A regressão realizada obteve um p-valor igual a 0, o que indica rejeição da hipótese nula de que o coeficiente ser igual a zero, ou seja, 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 65%. Além disso, vale destacar que o modelo encontrado possui um coeficiente de determinação (R^2) de 43%, o qual indica a capacidade do modelo explicar o comportamento da receita pela variável de idade das locomotivas.

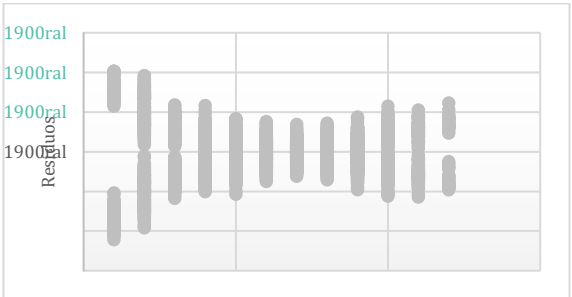
Para concluir a regressão, foi feita a análise de normalidade e homocedasticidade dos resíduos do modelo, a fim de confirmar as premissas básicas de uma regressão linear.

Gráfico 2 – Regressão Linear da Receita
Teste de Normalidade



Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

Gráfico 3 – Regressão Linear da Receita
Teste de Homocedasticidade



Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

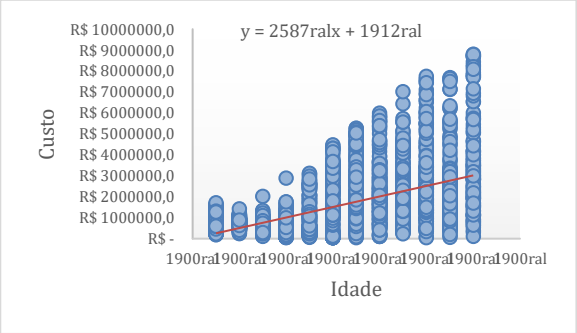
O primeiro teste indica se os resíduos seguem ou não uma distribuição normal, enquanto o segundo dita se os resíduos são constantes e não correlacionados entre si. Conforme mostra o Gráfico 2, as probabilidades dos erros seguem uma distribuição normal e pelo Gráfico 3 é possível perceber que os erros 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 Custo 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. Em relação a materiais, foi considerado a troca de componentes por máquina a cada ano e mensurado em unidades monetárias de acordo com o preço do material aplicado. Já 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, que gira em torno de R$80,00.

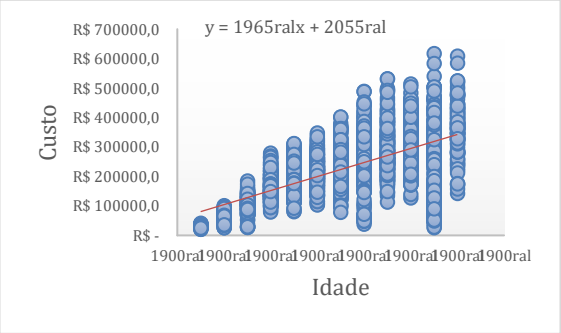
Em ambos os custos foi considerado o histórico de 12 anos e realizada a regressão linear entre a idade da locomotiva e seus custos de materiais e mão de obra anual. Novamente foram removidos os dados considerados como outliers pelo método do IQR a 95% de confiança. O Gráfico 4 e o Gráfico 5 mostram o comportamento das regressões realizadas com suas respectivas equações lineares.

Gráfico 4 – Regressão Linear da Idade Vs. Custo de Materiais



Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

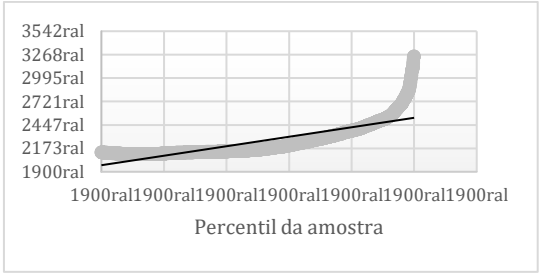
Gráfico 5 – Regressão Linear da Idade Vs. Custo de Mão de Obra



Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

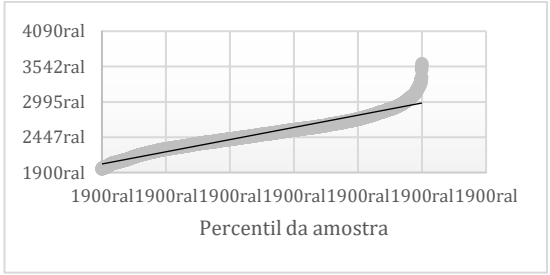
Com p-valor inferior a 5% em ambas as regressões, pode-se dizer que o modelo é significativo, com correlação de 61% e R^2 de 38% para o custo em materiais e 67% de correlação e 45% para o coeficiente de determinação para o custo da mão de obra.

Gráfico 6 – Regressão Linear do Custo de Materiais Teste de Normalidade



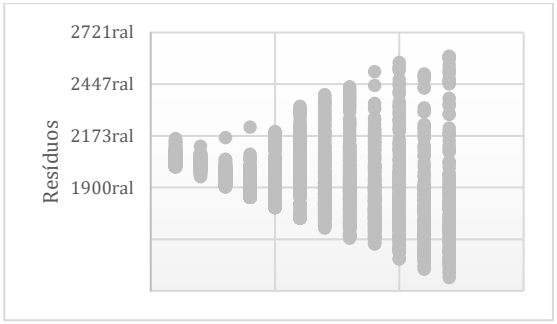
Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

Gráfico 7 – Regressão Linear do Custo de Mão de Obra Teste de Normalidade



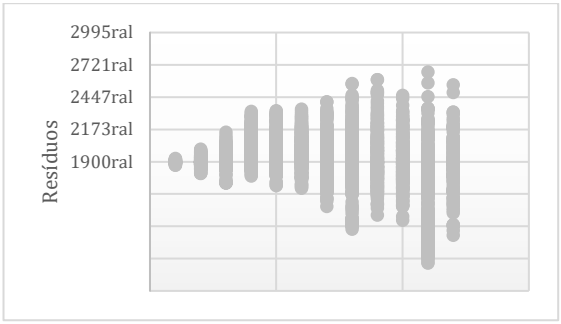
Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

Gráfico 8 – Regressão Linear do Custo de Materiais Teste de Homocedasticidade



Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

Gráfico 9 – Regressão Linear do Custo de Mão de Obra Teste de Homocedasticidade



Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

De forma análoga à regressão da receita, foram feitos os testes de normalidade e homocedasticidade dos resíduos. O Gráficos 6 e Gráficos 7 mostram que as curvas de probabilidade dos erros seguem a distribuição normal, enquanto o Gráfico 8 e o Gráfico 9 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 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 de 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. Em seguida foi dimensionada a economia no orçamento de materiais ocasionada pela não aquisição de mesmos componentes novos para manutenção. Assim, o sucateamento da locomotiva na decisão de substituição do ativo não está em função da idade deste, será utilizado de forma constante no valor de R$650.000,00.

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 70 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

Com os dados necessários trabalhados, o Problema de Substituição de Equipamentos 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 Programação Dinâmica para resolvê-lo. Como visto, as idades atuais das máquinas variam de 1 até 13 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. Substituindo as variáveis do problema pelas equações e valores tratados no tópico anterior:

$$f_i(t) = \max\begin{cases}(-30.772t + 691.434) - (251.232t + 4.742) - (23.800t + 56.984) + f_{i+1}(t+1), se\ mantiver \\ 691.434 + 650.000 - 80.000.000 - (4.742 + 56984) + \ f_{i+t}(1), se\ substituir\end{cases}$$

Sujeito a:

$$f_{33}(t), substituir$$

$$f_i(40), substituir$$

Como premissa utilizada no problema, a máquina será substituída no final do próximo período da concessão (último estágio) ou caso a idade dela alcance uma idade de 40 anos. A decisão é tomada no início de cada ano do horizonte de planejamento que corresponde aos 25 estágios (2022-2056) os quais foram avaliadas as estratégias de substituição ou não dos ativos.

O problema foi desenvolvido em um programa de Excel versão 2206, 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 2 mostra o resultado gerado pela Programação Dinâmica em cada estágio do problema, considerando a idade atual das máquinas. É possível perceber que ao longo de sete anos dentro do próximo ciclo de concessão é indicado para a empresa realizar a renovação da frota de locomotivas AC44, iniciando em 2033 e terminando em 2039. Este intervalo representa o melhor momento de substituição dos ativos a fim de gerar a maior receita possível no horizonte avaliado.

Tabela 2: Decisões no Horizonte de Planejamento

Idade Atual	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056
13	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
12	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
11	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
10	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
9	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
8	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
7	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
6	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
5	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
4	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
3	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	S
2	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	S
1	M	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	S

Ano/Estágio

Fonte: Elaborado pelos autores [2022]

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 13 anos obteve-se o resultado de substituir por volta de 24 anos de uso, porém ao simular para uma suposta máquina com idade atual de 20 anos a decisão seria de substituir ela só aos 40 anos de uso devida à restrição do limite máximo de idade. Perceba 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. Em alguns casos a substituição "precoce" da máquina pode trazer lucros significativos já que a receita inicial que ela

traz é maior que os custos de materiais e mão de obra associados, para outras com a idade avançada onde a necessidade de substituição no horizonte analisado é certa, vale a pena esperar completar os 40 anos de uso e substituir a máquina no limite do seu ciclo de vida.

A curva de substituição gerada no modelo foi criada de forma recursiva regressiva pela 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.

6. Conclusão

O trabalho realizado possibilitou por meio da PD identificar o melhor momento de substituição das locomotivas AC44 para os próximos anos considerando a idade atual das máquinas e as restrições impostas pelo novo acordo de concessão da malha ferroviária. O resultado alcançado no estudo permite com que a empresa otimize seu capital, levando em consideração que trocar os ativos no momento ideal, proporcionando o máximo de aproveitamento deles no período operacional e de seus recursos gerados após a decisão de substituí-los.

O Problema de Substituição de Equipamentos foi abordado em uma perspectiva determinística, porém associado a equações de regressão linear para calcular o valor de alguma das variáveis do problema que estão em função do tempo. Como estudos futuros tem-se a possibilidade de avaliar como outros modelos de regressão reagem no que diz respeito a representar o comportamento da receita e custos das locomotivas, como por exemplo regressões polinomiais que podem absorver melhor a variância dos dados. Além disso, conhecer a sensibilidade é outra análise interessante, pois caso a empresa decida realizar a troca um ano antes ou um ano depois do momento indicado é importante saber o quanto isso afetará no ganho financeiro total do horizonte de planejamento considerado.

Referências

ABENSUR, E. O. Um modelo alternativo de otimização para a política de reposição de equipamentos. Sinergia, São Paulo, v. 11, n. 2, pp.140-150, jul./dez. 2010.

ABENSUR, E. O.; PERTINHEZ, A. K.; ZILBER, S. N; SILVEIRA, F. F. Um simulador em software livre para suporte à decisão de substituição de máquinas agrícolas. Santos (SP), 2009.

ALÁRCON, L. F.; RODRIGUEZ, A.; MOURGUES, C. Impact of Machine-Failure Costs on Equipment Replacement Policies: Tunneling Company Case Study. Journal of Construction Engineering and Management, v. 138, n.6, p. 767-774, 2012.

ANTF. Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. Disponível em: <https://www.antf.org.br>. Acesso em: 14 de maio de 2022.

CARDOSO, R. T. N. Algoritmos para programação dinâmica baseados em famílias invariantes. 2005. 115 f. Dissertação (Curso de Matemática, Departamento de Matemática – Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005.

CECHIN, Rafaela Boeira et al. Programação dinâmica aplicada à redução de custos nas compras de vacinas de um hospital. Medicina (Ribeirão Preto), v. 52, n. 4, p. 287-294, 2019.

CHUKWUNENYE, U., CLETUS, T. D., AZI, N. I., & IMEGI, O. J. Excel Automation And Sensitivity Analyses Of Optimal Machine Replacement Strategies Using Dynamic Programming Recursions: A Case Study Of Nasco Household Products Ltd., Jos. 2017.

COSTA, Jefferson Carlos de Oliveira Ribeiro; SILVA, Maisa Mendonça. Aplicação da Programação Dinâmica Determinística na Substituição de Equipamentos em uma Indústria de Alimentos. Caruaru – PB. 2018.

COELHO, Russell William Sinclair. Aplicação do conceito de gestão de ativos físicos numa estação elevatória de águas. 2015. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

CRUZ, Vitor Nunes; FERNANDES, June Marques; REIS, Luciana Paula. Análise do processo de substituição de equipamentos por meio do método CAUE em uma mineradora de grande porte. UFOP–Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

DARÚ, Gilsiley Henrique; LACERDA, Vanessa C. Utilização de Programação Dinâmica Multirotulada para Balanceamento do Uso de Ferramenta. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMATICA APLICADA E COMPUTACIONAL. SENAC, 2005. p. 2005.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: < https://portal.fgv.br>. Acesso em: 14 de maio de 2022.

FURTADO, Livia Martins da Costa Pimentel; ROCHA, Sofia Aguiar; SOEIRO, Felipe da Fonseca Martini. Aplicação do controle de estoques dinâmico em multiperíodos em ambiente industrial. In: ANAIS DO LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2020, João Pessoa. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2020.

GOVERNO FEDERAL - MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Plano Nacional de Logística 2035. Disponível em: < https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>. Acesso em: 14 de maio de 2022.

HARTMAN, Joseph C.; ROGERS, Jennifer. Dynamic programming approaches for equipment replacement problems with continuous and discontinuous technological change. IMA Journal of Management Mathematics, v. 17, n. 2, p. 143-158, 2006.

HERNÁNDEZ-CHOVER, Vicent; CASTELLET-VICIANO, Lledó; HERNÁNDEZ-SANCHO, Francesc. Operational Indicators to Manage the Replacement of Electromechanical Equipment in Wastewater Treatment Facilities. International Journal of Information Technology & Decision Making, p. 1-20, 2021.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J.; Introdução à Pesquisa Operacional. 9. Ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2013.

LARBI, Mohamed Rebaiaia; AIT-KADI, Daoud. Maintenance policies with minimal repair and replacement on failures: analysis and comparison. International Journal of Production Research, p. 1-23, 2020.

MAITI, M.; KRAKOVICH, V.; SHAMS, S. R.; VUKOVIC, D. B. Resource-based model for small innovative enterprises. Management Decision, 2020.

MARQUES, Gláucio Marcelino. Transformação e substituição de equipamentos utilizando equações diferenciais e programação dinâmica. 2003.

Mehairjan, R. P. (2017). Chapter 2 - Asset, Risk and Maintenance Management. Em Risk-Based Maintenance for Electricity Network Organizations (pp. 9-30). Switzerland: Springer International Publishing AG.

MIRANDA, E. G. L. O. Desenvolvimento de uma aplicação para análise de substituição de equipamentos industriais. Tese (mestrado). Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2009.

RODRIGUES, Rúben Pedro Pereira. Substituição de equipamentos: aplicação à gestão de frotas automóveis. 2020. Tese de Doutorado.

SADEGHPOUR, Hossein; TAVAKOLI, Ahmad; KAZEM, Mostafa e POUYA, Alireza. A novel approximate dynamic programming approach for constrained equipment replacement problems: A case study. Advances in Production Engineering and Management, v. 14, 2019.

TAHA, H. A. Pesquisa Operacional: uma visão geral. -8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

VÍLCHEZ-TORRES, Mylena Karen; OBLITAS-CRUZ, Jimy Frank; CASTRO-SILUPU, Wilson Manuel. Optimization of the replacement time for critical repairable components. Dyna, v. 87, n. 214, p. 93-99, 2020.

YATSENKO, Yuri; HRITONENKO, Natali; BORANBAYEV, Seilkhan. Non-equal-life asset replacement under evolving technology: A multi-cycle approach. The Engineering Economist, v. 65, n. 4, p. 339-362, 2020.