

Proposta para Aumento de Capacidade Operacional em Linhas
Férreas

Nery Carvalho Filho

UFPR

Nery1964@gmail.com

Gustavo Valentim Loch

UFPR

Gustavo.gvalentim@gmail.com

1. **Resumo**

O transporte ferroviário gera para a movimentação da safra agrícola brasileira ganhos de capacidade expressivos no escoamento dos produtos. Porém a malha ferroviária, seus vagões e locomotivas não acompanharam o crescimento da produção agrícola brasileira dos últimos 20 anos, fazendo com que existam problemas de capacidade de transporte. Desta forma é necessário o aumento da eficiência do modal para poder acompanhar esse crescimento.

O trabalho faz uma abordagem de otimização do uso dos vagões que operam em redes singelas e em circuitos fechados. O fato de mais de 70 % das malhas ferroviárias do Brasil, ser singela mostra a importância de termos um melhor tratamento do fluxo de carregamentos. Isso traz resultados muito expressivos na minimização da quantidade de vagões para demandas determinadas pelas necessidades de cargas dos navios.

É apresentado um modelo de otimização onde testamos algumas vezes cenários diferentes de demandas e apresentamos um resultado testado e validado com um cenário real da empresa ferroviária, que retornou com valor bastante promissor.

Palavras Chaves: programação linear, ferrovia, modelo de capacidade ferroviária.

2. **Introdução**

Uma infraestrutura de transporte de carga eficiente é um elemento importante para o desenvolvimento econômico de um país, pois proporciona transporte com baixos custos, gerando desenvolvimento econômico e bem-estar social ao país. Em princípio, em situações em que a infraestrutura não se ajusta à demanda, a melhoria do uso dos ativos que temos traz para o processo ganhos de eficiência.

No que diz respeito à operação do modal ferroviário, após a disseminação das rodovias, em diversos países, dados seus altos custos de implantação e manutenção, as ferrovias, muitas

vezes, necessitaram de subsídios estatais para operarem. Até meados da década de 70, a maior parte dos serviços ferroviários no Brasil estava sob algum tipo de gestão pública, quer pelo controle de empresas estatais, quer pela forte regulação pública. A interferência do Estado, sinalizou, a partir da década de 70, que os altos custos e o baixo nível de eficiência, que estavam inviabilizando a existência das ferrovias, poderiam estar associadas ao modelo de operação adotado.

Entretanto, na década de 80, o início das privatizações e concessões em diferentes países e, na década de 90, o Brasil, fez um movimento de crescimento do modal ferroviário, modificando a sua participação na matriz de transporte brasileira, esse movimento traz um equilíbrio dos custos de transporte de cargas no Brasil.

Ajustar a demanda dentro da matriz mais equilibrada, não significa apenas o incremento de infraestrutura. Mas é possível que se tenha um aumento potencial melhorando as capacidades instaladas, utilizando conhecimentos de otimização dos recursos.

O problema proposto é que temos oportunidade de otimizar o número de vagões utilizados para uma determinada demanda, gerando capacidades extras para ser alocada em fluxos com maior rentabilidade financeira.

Apesar de inúmeras possibilidades de emprego de metodologia de modelagem e simulação em transporte, no presente trabalho será empregada um modelo de otimização em uma linha ferroviária singela, sobre a qual trafegam trens nos sentidos exportação e importação.

3. Justificativa

O crescimento da participação, assim como a otimização da estrutura existente, do transporte ferroviário sobre o rodoviário tem o potencial de gerar benefícios para o Paraná e para o Brasil, como um ganho na diminuição da emissão de CO₂ na atmosfera, assim como uma diminuição do trânsito de caminhões nas rodovias, diminuindo os riscos de acidentes nas estradas e proporcionando um aumento sustentável das exportações das commodities agrícolas pelo porto de Paranaguá.

O estado do Paraná está entre os maiores produtores de grãos do País e se tem uma malha ferroviária com potencial de aumentar a sua produtividade com a melhor utilização dos vagões que se tem a disposição para o transporte. Esse processo de aumento é resultado do uso da modelagem matemática na otimização do uso desses recursos.

4. Descrição do problema

O presente trabalho trata da proposição de uma metodologia de programação linear inteira mista, utilizando as ferramentas de modelagem matemática, para otimizar o uso das linhas singelas de uma empresa ferroviária.

A empresa ferroviária estudada está situada no sul do País, e tem como modelo de linhas, o uso de linha singela, ou seja, aquela que permite o tráfego de trens em apenas um sentido por vez, não existindo a possibilidade de uso simultâneo do mesmo espaço. A figura 01 mostra o desenho da malha estudada.

Figura 01 - Desenho malha (cedido pela operadora ferroviária)



Todo processo de carregamento dos vagões nas origens, que nesse estudo são duas cidades específicas do estado do Paraná (Maringá e Londrina), está sedimentado sobre as demandas geradas pelos navios, com previsão de atracação no porto de Paranaguá.

Os navios para exportação de grãos chegam ao porto de Paranaguá durante todo o ano e ocupam lugares em uma fila de espera (line up), de acordo com dados de data e hora de chegada do navio no porto. A figura 02 mostra um exemplo de um line up do corredor de exportação de grãos do porto de Paranaguá.

Figura 02 – Line up (www.portosdoparana.gov.br, 22/12/20)

ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAQUÁ E ANTONINA																		
LINE UP - CORREDOR DE EXPORTAÇÃO																		
Emissão: 21/12/2020 10:16																		
ATRACADOS																		
PN	DUV	BERÇO	EMBARCAÇÃO	IMO	LOA	ESPECIALIDADE	PRODUTOS	BORDO	AGÊNCIA	OPERADOR	ATRAÇÃO	CHEGADA	ETS	TONS/DIA	TONS PREV	TONS MOV	SALDO	
1	63433	0459882020	213	TRANSPACIFIC	9597226	229,02	GRANEL SOLIDO	MILHO	BB	CARGONAVE	TIBAGI	19/12/2020 16:05	11/12/2020 06:00	19/12/2020 17:00	31.288,120	65.100,000	38.027,860	27.072,150
2	63355	0454152020	214	KEDROS	9781700	199,99	GRANEL SOLIDO	MILHO	BB	WILLIAMS	TIBAGI	18/12/2020 12:30	09/12/2020 01:30	17/12/2020 20:00	20.769,295	62.500,000	58.686,300	3.813,710
PROGRAMADOS																		
PN	DUV	BERÇO	EMBARCAÇÃO	IMO	LOA	ESPECIALIDADE	PRODUTOS	BORDO	AGÊNCIA	OPERADOR	DATA PROGR.	CHEGADA	ETB	ETS	TONS PREV	POSIÇÃO		
1	63406	0455522020	213	DARYABAR	9369710	225,00	GRANEL SOLIDO	MILHO	WORLD SHIPPING PARANA	ROCHA TERMINAIS PORTUARIOS E LOGISTICA S.A.	18/12/2020 17:18	18/12/2020 14:30			61.350,000	CORREDOR		
2	63402	0449382020	212	GOLDEN ROSE	9590747	229,00	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	CARGILL AGRICOLA	TIBAGI	18/12/2020 17:46	11/12/2020 06:00			64.500,000	CORREDOR		
LINE UP																		
PN	DUV	BERÇO	EMBARCAÇÃO	IMO	LOA	ESPECIALIDADE	PRODUTOS	BORDO	AGÊNCIA	OPERADOR	CHEGADA	ETA	ETS	TONS PREV	Data Previsão Corex	Previsão Corex (Tons)	Consignação Corex	
1	63394	0449362020	213	ALKIMOS	9603001	229,13	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	CARGILL AGRICOLA	CARGONAVE	15/12/2020 22:50	15/12/2020 21:30		57.971,000	16/12/2020 00:00	57.971,000	Prioritário	
2	63416	0486152020	213	KT BIRDIE	9597343	225,00	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	ALPHAMAR AGENCIA MARITIMA	ALPHAMAR PORT SERVICES	13/12/2020 14:12	14/12/2020 08:00		54.000,000	18/12/2020 00:00	54.000,000	Prioritário	
3	63432	0461562020	213	KLARA OLDENDORFF	9849007	229,00	GRANEL SOLIDO	MILHO	CARGONAVE	CARGONAVE	17/12/2020 22:42	17/12/2020 22:42	24/12/2020 21:00	64.423,000	18/12/2020 00:00	64.423,000	Preferencial	
PRE-LINE UP																		
PN	DUV	BERÇO	EMBARCAÇÃO	IMO	LOA	ESPECIALIDADE	PRODUTOS	BORDO	AGÊNCIA	OPERADOR	CHEGADA	ETA	ETS	TONS PREV	Data Previsão Corex	Previsão Corex (Tons)	Consignação Corex	
1	63491	0463602020	212	NEA ELPIS	9527518	228,99	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	CARGILL AGRICOLA	TIBAGI	20/12/2020 02:30	19/12/2020 15:00		30.000,000			-	
2	63513		213	GOLAFRUZ	9323833	225,00	GRANEL SOLIDO	MILHO	WORLD SHIPPING PARANA	TIBAGI	20/12/2020 09:12	20/12/2020 09:12		47.000,000			-	
ANUNCIADOS																		
PN	DUV	BERÇO	EMBARCAÇÃO	IMO	LOA	ESPECIALIDADE	PRODUTOS	BORDO	AGÊNCIA	OPERADOR	CHEGADA	ETA	ETS	TONS PREV	CAL. CHEG.	CAL. SAIDA		
1	63534		213	DEM FIVE	9261011	176,85	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	WILLIAMS	TIBAGI	24/12/2020 16:00	27/12/2020 20:00		24.000,000	5,85	9,20		
2	63536		212	OCEANUS	9670925	199,99	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	ROCHAMAR	TIBAGI	28/12/2020 15:00	04/01/2021 15:00		22.000,000	7,50	11,50		
3	63512		212	NORD GEMINI	9746712	228,99	GRANEL SOLIDO	MILHO	CARGONAVE	CARGONAVE	30/12/2020 19:00	05/01/2021 19:00		64.000,000	7,10	12,50		

O porto possui 17 berços de atracação, sendo que 3 berços de atracação compõem o corredor de exportação, com 2 ship loaders em cada berço. Isso faz com que um navio, com capacidade de 70.000 toneladas, seja carregado em 48 horas de operação. A figura 03 mostra ship loaders operando no carregamento de grãos.

Figura 03 - Embarque de navio (www.portosdoparana.gov.br, 22/12/2020)



Os berços operam simultaneamente por 24 horas, sete dias por semana. Os seis ship loaders

estão interligados aos terminais de recebimento dos produtos. Esses terminais são alimentados por dois modais o ferroviário e o rodoviário.

As capacidades dos terminais são finitas e muitas vezes tem-se dois ou mais produtos descarregando em um mesmo terminal, o que faz com que a programação de chegada de cargas seja vital, para a formação de lotes para embarque. O giro de um terminal é muito importante para o terminal portuário, ele significa a quantidade de vezes que ele consegue ocupar a sua capacidade total em um período de tempo. Por exemplo: giro de 12 vezes/ano, o silo ocupou 12 vezes a sua capacidade total.

A área de planejamento com os dados imputados pelos clientes via comercial, inicia o processo de planejamento da demanda que será atendida na semana S+1. A operadora além do transporte de grãos transporta também açúcar, combustíveis, fertilizantes, produtos industrializados, containers e celulose. Com essa diversidade de cargas, é necessário o ajuste de todos os volumes dentro das capacidades de transporte da via, das ofertas de vagões, ofertas de locomotivas, capacidades de descarga no porto, capacidade dos pontos de embarque e os navios que deve ser embarcado na semana.

5. Revisão de literatura

A revisão de literatura deste trabalho foi baseada na revisão sistemática da literatura proposta por Ensslin et al. (2014). Com base neste trabalho e utilizando as bases de conhecimento Scopus, Web of Science e Google Scholar realizou-se a pesquisa dos artigos.

Morabito Neto e Pureza (2012) definem “modelo” como uma representação de uma situação, conforme a compreensão de uma ou mais pessoas construídas de forma a auxiliar a gestão de forma sistemática uma determinada situação. Além do que, o modelo deve ser suficiente detalhado de forma a possibilitar a captura dos elementos essenciais e representar a realidade, mas também, suficientemente simplificado de forma a possibilitar o uso de métodos de análise e resolução conhecidos. No seu trabalho Sargent (2014) concorda com essa definição, pois para este, um modelo dever ser tão simples quanto possível e ainda alcançar a necessidade proposta no problema.

Morabito Neto e Pureza (2012, p. 173) argumentam que uma desvantagem de “problemas idealizados é que o efeito do fator humano no desempenho do processo operacional em geral é negligenciado”.

O primeiro filtro aplicado foi o da data de publicação do trabalho. A pesquisa trabalhou com artigos com data superior a 2006, de forma que temos o que de mais recente temos da pesquisa

sobre o assunto.

Utilizou-se também como filtro, sobre a primeira avaliação de trabalhos, a ordenação pelo número de citações, considerando publicações com pelo menos 40 citações nos trabalhos publicados depois de 2016 até 2020. Na sequência listou-se os periódicos onde os artigos foram publicados, avaliando pelo H-index.

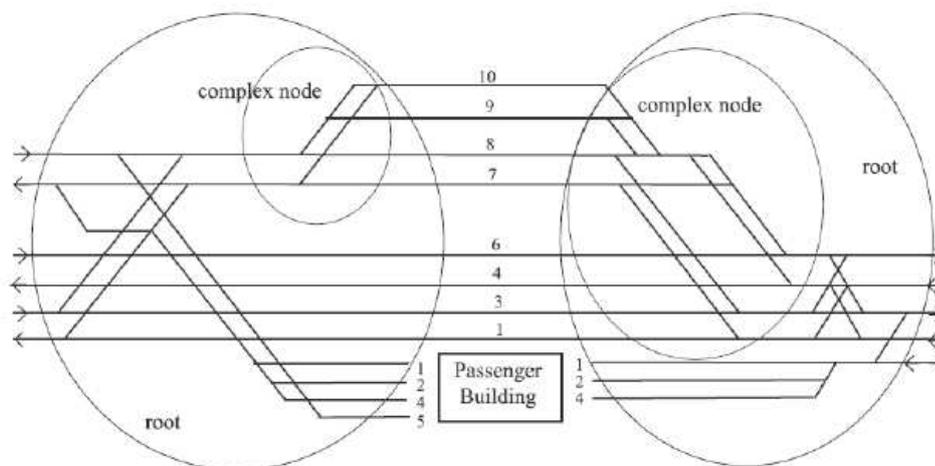
Para uso na pesquisa considerou-se o H-index do portal Scimago, o qual indica quantas vezes o artigo foi citado, definido como peso mínimo o de 50 para essa pesquisa.

A definição das palavras chaves para a pesquisa a ser utilizada no trabalho se deu a partir do trabalho de Leal Neto (2016). Os termos identificados nas bases de conhecimento utilizadas foram: programação linear, ferrovia, capacidade, linha singela, modelo de capacidade ferroviária.

Com o termino das aplicações dos filtros e de acordo com os métodos aplicados, selecionamos 12 artigos listados como referência.

Mussone e Calvo (2013) apresentam em seu trabalho um modelo matemático para verificar a capacidade de uma linha férrea singela. Os autores definem os conceitos de linhas férreas complexas, para generalizar o modelo matemático, como linha, nó, estação e planta. A figura 04 exemplifica uma linha férrea complexa com esses conceitos. Os autores estudaram um problema de uma ferrovia da Suíça.

Figura 04 – Exemplo de pátios (Calvo e Mussone 2013)



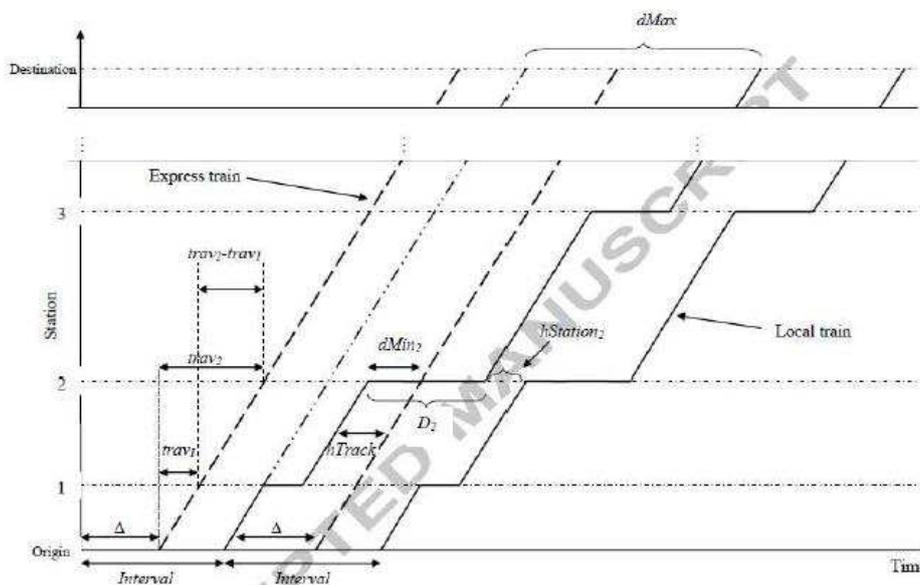
O trabalho publicado por Corman e Meng (2013), relata um levantamento recente sobre problemas de reescalonamento de tráfego ferroviário em tempo real, com aspectos estocásticos

ou dinâmicos.

Em Riejos et al (2016), uma ferrovia com linhas principais e ramificações foi o objeto de estudo. O foco é em determinar a frota necessária para atender a demanda. E os autores desenvolveram um algoritmo que determinasse o melhor desenho e as frequências dos trens. O algoritmo foi baseado em uma soma eficiente de strings binárias referentes aos corredores, e apresentou vantagens tanto para os operadores quanto para os passageiros, alcançando uma redução de custo operacional de 8,5% no trecho Madrid-Sevilla.

Um modelo de programação linear inteira mista foi utilizado por Heydar, Petering e Bergman (2013) para minimizar o período de ciclo de um transito de vagões e apresentar uma formulação linear tendo o tempo de ciclo como variável de decisão e considerar o tempo mínimo de ciclo como uma definição alternativa de capacidade da linha férrea. A malha, com trens com poucas paradas (expressos) e os que param em todas as estações (locais), está representado na Figura 05.

Figura 05 – Cruzamento de trens (Heydar, Petering e Bergman 2013)



Burdett (2015) estudou a capacidade de uma linha férrea sujeita à concorrência de corredores, serviços e tipos de trens, cada um dos cenários estudados, além do planejamento de expansão de uma malha, foi modelado.

Cada uma das interações da solução da modelagem, gerou resultados que quando analisados mostram que os resultados encontrados demonstram ganhos de tempos e de capacidade. O

trabalho utilizou para encontrar a melhor solução uma técnica de linearização de programação e também a Simulated Annealing.

Camargo e Cunha (2012), escrevem no seu artigo uma proposta de um modelo híbrido simulação-otimização como ferramenta para a análise de políticas operacionais para o transporte ferroviário de grãos em um sistema fechado que possibilitem aumentar a sua capacidade global. O modelo proposto é um sistema de simulação discreta por eventos desenvolvido em linguagem Visual Basic for Applications, o qual possibilita analisar regras mais flexíveis para decisões quanto ao tratamento de filas nas diversas etapas do percurso dos grãos, desde as regiões produtoras até o embarque nos navios. Também é proposta uma heurística baseada em algoritmos para determinar o melhor subconjunto de regras de priorização. A partir dos resultados obtidos concluem que as regras de priorização se mostraram substitutas adequadas às regras comumente utilizadas em modelos de simulação estocástica e baseadas em sorteios aleatórios, por proporcionarem maior capacidade global ao sistema.

Batista (2006) em seu artigo mostra a contribuição para à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil. O objetivo do trabalho é propor um método para analisar a capacidade de processamento de quantidade de trens em uma linha singela, sujeita as restrições físicas e operacionais da via permanente e o objetivo secundário é aplicar o método a um corredor de transporte ferroviário de elevado volume de tráfego. Para alcançar tal objetivo, desenvolveu-se um modelo capaz de identificar as características da via que restringem as velocidades das composições ferroviárias. O modelo proposto permite, por meio de análise de desempenho dos trens em cada um dos trechos entre pátios de manobra, de um trecho de linha ferroviária obter uma medida de desempenho global no trecho e identificar gargalos. O método adotado para determinar a capacidade do trecho para cenários operacionais alternativos é o da utilização de diagramas espaço-tempo, desenvolvidos como algoritmo em MatLab. Ao se aplicar o modelo em um trecho em linha singela entre duas cidades, identificou-se que a capacidade máxima atual é de seis pares trens/dia, que o gargalo está localizado entre duas determinadas estações e que o principal fator limitante da velocidade média no espaço dos trens é a atual condição da superestrutura ferroviária e que, uma vez eliminada esta restrição, a supressão de passagens de nível e a relocação de estações de cruzamento, produzem ganhos expressivos.

6. Método

O trabalho classifica-se como sendo de natureza aplicada, de abordagem quantitativa, descritiva na elaboração dos modelos conceituais e explicativa quanto aos resultados obtidos do modelo matemático e empregando modelagem/simulação como método.

Quanto à abordagem quantitativa, consideram que como tudo pode ser quantificável, ou seja, é possível a tradução em números para ser analisado. O trabalho observa diretamente as variáveis independentes e observa o comportamento da variável, cujo relacionamento de causa e efeito é expresso na hipótese. A pesquisa se baseia em modelos quantitativos.

Por fim, o uso desse método é o mais apropriado para conduzir uma pesquisa quantitativa utilizando técnicas de modelagem matemática, na qual o pesquisador propõe o modelo e interpreta e apresenta os resultados.

7. Proposta do modelo para otimização de carregamentos de vagões

Na presente seção será descrito o modelo matemático de programação linear, para determinar a quantidade mínima de vagões necessários para atender as demandas dos navios em Paranaguá.

A formulação matemática é apresentada em cinco partes, conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

Conjunto

H: conjunto de períodos de tempo

Parâmetros

D_p : demanda de vagões carregados em Paranaguá no período p

t_{ij}^+ : número de períodos de deslocamento de i para j com vagões carregados

t_{ij}^- : número de períodos de deslocamento de i para j com vagões vazios

c_i^- : tempo de ciclo em i para descarregar os vagões

c_i^+ : tempo de ciclo em i para carregar os vagões

Variáveis de Decisão

x_{ijp}^+ : quantidade de vagões carregados que saem de i para j no período p

x_{ijp}^- : quantidade de vagões descarregados que saem de i para j no período p

y_{ip}^+ : quantidade de vagões carregados em i que iniciam o descarregamento no período p

y_{ip}^- : quantidade de vagões descarregados em i que iniciam o carregamento no período p

E_{ip}^+ : estoque de vagões carregados em i ao final do período p

E_{ip}^- : estoque de vagões vazios em i ao final do período p

Função objetivo

$$\min z = \sum_{i \in I} E_{i0}^+ + E_{i0}^- \quad (1)$$

Restrições

$$y_{pp}^+ \geq D_p, \quad p = 1, \dots, |H| \quad (2)$$

$$E_{pp}^+ = \begin{cases} E_{pp-1}^+ - y_{pp}^+ = 1, \dots, t_{CP}^+ \\ E_{pp-1}^+ + x_{CPp-t_{CP}^+}^+ - y_{pp}^+, p = t_{CP}^+ + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{pp}^- = \begin{cases} E_{pp-1}^- - x_{PCp}^-, p = 1, \dots, c_P^- \\ E_{pp-1}^- + y_{pp-c_P^-}^+ - x_{PCp}^-, p = c_P^- + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{Mp}^+ = \begin{cases} E_{Mp-1}^+ - x_{MAp}^+, p = 1, \dots, c_M^+ \\ E_{Mp-1}^+ - x_{MAp}^+ + y_{Mp-c_M^+}^-, p = c_M^+ + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (5)$$

$$E_{Mp}^- = \begin{cases} E_{Mp-1}^- - y_{Mp}^-, p = 1, \dots, t_{AM}^- \\ E_{Mp-1}^- + x_{AMp-t_{AM}^-}^- - y_{Mp}^-, p = t_{AM}^- + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{Lp}^+ = \begin{cases} E_{Lp-1}^+ - x_{LAp}^+, p = 1, \dots, c_L^+ \\ E_{Lp-1}^+ - x_{LAp}^+ + y_{Lp-c_L^+}^-, p = c_L^+ + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{Lp}^- = \begin{cases} E_{Lp-1}^- - y_{Lp}^-, p = 1, \dots, t_{AL}^- \\ E_{Lp-1}^- + x_{ALp-t_{AM}^-}^- - y_{Lp}^-, p = t_{AL}^- + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (8)$$

$$E_{Ap}^+ = \begin{cases} E_{Ap-1}^+ - x_{ACp}^+, p = 1, \dots, 4 \\ E_{Ap-1}^+ + x_{MAp-t_{MA}^+}^+ - x_{ACp}^+, p = 5, 6 \\ E_{Ap-1}^+ + x_{MAp-t_{MA}^+}^+ + x_{LAp-t_{LA}^+}^+ - x_{ACp}^+, p = 7, \dots, |H| \end{cases}, \quad (9)$$

$$E_{Ap}^- = \begin{cases} E_{Ap-1}^- - x_{AMp}^- - x_{ALp}^-, p = 1, \dots, t_{CA}^- \\ E_{Ap-1}^- + x_{CAp-t_{CA}^-}^- - x_{AMp}^- - x_{ALp}^-, p = t_{CA}^- + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (10)$$

$$E_{Cp}^+ = \begin{cases} E_{Cp-1}^+ - x_{CPp}^+, p = 1, \dots, t_{AC}^+ \\ E_{Cp-1}^+ + x_{ACp-t_{AC}^+}^+ - x_{CPp}^+, p = t_{AC}^+ + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (11)$$

$$E_{Cp}^- = \begin{cases} E_{Cp-1}^- - x_{CAp}^-, p = 1, \dots, t_{PC}^- \\ E_{Cp-1}^- + x_{PCp-t_{PC}^-}^- - x_{CAp}^-, p = t_{PC}^- + 1, \dots, |H| \end{cases} \quad (12)$$

A equação 01, representa a minimização da quantidade total inicial de vagões vazios necessários para atender a demanda.

A restrição (2) garante que tenhamos no ponto de descarga no porto uma quantidade de vagões igual ou maior que a demanda, a restrição (3) garante que estoque de vagões carregados em Paranaguá é igual ao estoque de vagões carregados no período anterior menos a quantidade de vagões que iniciam a descarga do período 1 até o período que chegam os primeiros vagões carregados de Curitiba e nos períodos seguintes temos o acréscimo dessas chegadas, a restrição (4) garante que o estoque de vagões em Paranaguá é igual ao estoque de vagões vazios no período anterior menos a quantidade de vagões vazios que partem de Paranaguá para Curitiba do período de 1 até o período que iniciam as primeiras descargas e nos períodos seguintes temos o acréscimo dos vagões que iniciaram a descarga, a restrição (5) garante o estoque de vagões

carregados em Maringá é igual ao estoque de vagões carregados no período anterior menos a quantidade de vagões que iniciam o deslocamento de Maringá para Apucarana do período 1 até o período que chegam os primeiros vagões carregados e no períodos seguintes temos o acréscimo dos vagões vazios disponíveis para carregamento, a restrição (6) garante o estoque de vagões vazios em Maringá igual ao estoque de vagões vazios do período anterior menos a quantidade de vagões vazios que iniciam o carregamento do período 1 até o momento que chegam os primeiros vagões vazios de Apucarana e nos períodos seguintes temos a soma dos vagões vazios chegados de Apucarana, a restrição (7) garante o estoque de vagões carregados em Londrina é igual ao estoque de vagões carregados no período anterior menos a quantidade de vagões que iniciam o deslocamento de Londrina para Apucarana do período 1 até o período que chegam os primeiros vagões carregados e no períodos seguintes temos o acréscimo dos vagões vazios disponíveis para carregamento, a restrição (8) garante o estoque de vagões vazios em Londrina igual ao estoque de vagões vazios do período anterior menos a quantidade de vagões vazios que iniciam o carregamento do período 1 até o momento que chegam os primeiros vagões vazios de Apucarana e nos períodos seguintes temos a soma dos vagões vazios chegados de Apucarana, a restrição (9) garante o estoque de vagões carregados em Apucarana é igual ao estoque de vagões carregados no período anterior menos a quantidade de vagões carregados que partem para Curitiba nos períodos de 1 a 4, no período 5 e 6 temos o acréscimo dos vagões carregados que chegam de Maringá, nos próximos períodos temos o acréscimo das chegadas de Londrina, a restrição (10) garante o estoque de vagões vazios em Apucarana é igual ao estoque de vagões vazios que chegam de Curitiba no período 1 até o período que temos as próximas chegadas, nos próximos períodos temos o acréscimo das saídas para Maringá e Londrina, a restrição (11) garante o estoque de vagões carregados em Curitiba é igual ao estoque de vagões carregados no período anterior mais a quantidade de vagões carregados que chegam de Apucarana no período de 1 até a próxima chegada de Apucarana, nos próximos períodos temos a subtração as saída de vagões carregados de Curitiba para Paranaguá, a restrição (12) garante o estoque de vagões vazios em Curitiba é igual ao estoque de vagões vazios no período anterior mais a quantidade de vagões vazios que chegam do período 1 até o período da próxima chegada de Paranaguá, nos próximos períodos temos a subtração dos vagões vazios que partem para Apucarana.

8. Resultados

O modelo matemático retornou como resultado de uma simulação um valor de 2747 vagões necessários para uma demanda de 4 semanas de descarga. Temos na frota de vagões do

segmento de grãos um total de 3.000 equipamentos, isso está nos dando uma sobre oferta de vagões de 253 vagões ou 8,43% de melhoria no uso de vagões.

Esses equipamentos que estão teoricamente sobrando para o atendimento da demanda podem ser utilizados para aumentar o nosso atendimento dos clientes ou buscar novos clientes dentro do segmento de grãos.

Essa sobra de equipamentos, caso seja utilizada dentro do mesmo segmento pode trazer um aumento de receita de R\$ 1.113.200,00, resultado da operação de 253 vagões x peso líquido de um vagão (55 t) x tarifa média (R\$ 80,00).

Caso a operadora opte por direcionar essa sobra de vagões para o segmento do açúcar esse ganho poderá ser ainda maior, pois temos uma ocupação melhor do vagão (65 t) e uma tarifa média maior (R\$ 90,00).

Com o aumento de receita no grão a empresa poderá investir na compra de vagões novos e ou locomotivas mais modernas.

Temos demonstrado na figura 06 os possíveis ganhos com o resultado da otimização do fluxo.

Figura 06 - Custos de materiais rodantes (do autor)



Isso demonstra que com o trabalho de otimização de apenas 1 fluxo de transporte podemos iniciar a substituição de equipamentos mais antigos por mais novos, que tragam maior confiabilidade e menor emissão de CO₂, no caso das locomotivas, melhorando ainda mais o serviço oferecido pela operadora ferroviária.

Temos com esse primeiro trabalho demonstrado que a expansão desse modelo para outros produtos pode trazer ainda melhores resultados para a operadora.

9. Conclusões

O trabalho traz para a ferrovia o uso de ferramentas de otimização na solução de antigos problemas de alocação de recursos a demandas.

O fato de operarmos em linhas singelas faz com que o ajustes dos carregamentos e as descargas sejam extremamente importantes para aumentarmos os volumes transportados, com a mesma

quantidade de recursos existentes.

Esse crescimento com o uso dos mesmos recursos, traz a possibilidade de com mais receitas, poder ter a melhoria do parque de vagões e locomotivas, perpetuando o crescimento do transporte ferroviário no Brasil.

O modelo estudado tem uma resposta de processamento com um tempo na ordem de 30 segundos para uma demanda imputada de 1 mês. As ferramentas utilizadas para a solução do problema são disponíveis no mercado com facilidade, o que proporciona simulações dos mais diversos tipos de cenários necessários para as melhorias extremamente simples, em razão da complexidade e ganhos dos processos.

O dinamismo da ferrovia com o uso desse modelo só vai trazer mais e melhores resultados financeiros para a operadora ferroviária.

10. Referencias

ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L.; YAMAKAWA, E. K.; et al. Processo Estruturado de Revisão da Literatura e Análise Bibliométrica Sobre Avaliação de Desempenho de Processos de Implementação de Eficiência Energética. **Revista Brasileira de Energia**, v. 20 n.1, p. 21–50, 2014.

LEAL NETO, J. DE S. Emprego de metodologia de modelagem e simulação na operação da linha férrea Singela Cascavel - Guarapuava. , p. 95, 2016.

MUSSONE, L., CALVO, R. W. An analytical approach to calculate the capacity of a railway system. *European Journal of Operational Research*, 228(1), 11–23. 2013.

CORMAN, Francesco; MENG, Lingyun. A review of online dynamic models and algorithms for railway traffic control. 2013 Ieee International Conference On Intelligent Rail Transportation Proceedings, [s.l.], ago. 2013. IEEE.

RIEJOS, Francisco A. O., BARRENA, E., ORTIZ, David. C., LAPORTE, Gilbert. Analyzing the theoretical capacity of railway networks with a radial-backbone topology. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, [s.l.], v. 84, p.83-92, fev. 2016. Elsevier BV.

HEYDAR, Mojtaba; PETERING, Matthew E.h.; BERGMANN, Dietrich R.. Mixed integer programming for minimizing the period of a cyclic railway timetable for a single track with two train types. *Computers & Industrial Engineering*, [s.l.], v. 66, n. 1, p.171-

185, set. 2013. Elsevier BV

BURDETT, Robert L.. Multi-objective models and techniques for analysing the absolute capacity of railway networks. *European Journal Of Operational Research*, [s.l.], v. 245, n. 2, p.489-505, set. 2015. Elsevier BV.

MORABITO NETO, R.; PUREZA V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C (Org.). *Metodologia de pesquisa em engenharia da produção e gestão de operações*. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. p. 169-198.

SARGENT, R. G. Verification and Validation of Simulation Models. In: *Proceedings of 2014 Winter Simulation Conference, 2014, Savannah, GA*. pp 118-131. Disponível em: <<http://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/013.pdf>>. Acesso em: 28/01/2021.

CAMARGO, P. V.; CUNHA, C. B. Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de granéis em ciclo fechado. *Journal of Transport Literature*, vol. 6, n. 2, p. 33-65. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2238-10312012000200003&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 29/01/2021.

BATISTA, C. N. O. Contribuição à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-28092006-143106/pt-br.php>>. Acesso em: 29/01/2021.