

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NERY CARVALHO FILHO

PROPOSTA PARA AUMENTO DE CAPACIDADE
OPERACIONAL EM LINHAS FÉRREAS

CURITIBA
DEZEMBRO2021

NERY CARVALHO FILHO

PROPOSTA PARA AUMENTO DE CAPACIDADE OPERACIONAL EM LINHAS FÉRREAS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre, Curso de Mestrado, Programa PPGOLD, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch

CURITIBA
DEZEMBRO 2021

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS SOCIAIS
APLICADAS – SIBI/UFPR COM DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)
Bibliotecária: Maria Lidiane Herculano Graciosa – CRB 9/2018

Carvalho Filho, Nery

Proposta para aumento de capacidade operacional em linhas
férreas / Nery Carvalho Filho. - 2021.

69 p.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Programa
de Pós-Graduação em Gestão de Organizações, Liderança e Decisão, do
Setor de Ciências Sociais Aplicadas.

Orientador: Gustavo Valentim Loch.

Defesa: Curitiba, 2021.

1. Programação linear. 2. Ferrovias. 3. Capacidade ferroviária.
I. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Sociais Aplicadas.
Programa de Pós-Graduação em Gestão de Organizações, Liderança e
Decisão. II. Loch, Gustavo Valentim. III. Título.

CDD 354.77



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SETOR DE CIÊNCIAS SOCIAIS E APLICADAS UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARANÁ

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GESTÃO DE
ORGANIZAÇÕES, LIDERANÇA E DECISÃO - 40001016172P9

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GESTÃO DE ORGANIZAÇÕES, LIDERANÇA E DECISÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NERY CARVALHO FILHO** intitulada: **Proposta para aumento de capacidade operacional em linhas férreas**, sob orientação do Prof. Dr. GUSTAVO VALENTIM LOCH, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Novembro de 2021.

Assinatura Eletrônica
19/11/2021 14:48:42.0
GUSTAVO VALENTIM
LOCH

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
19/11/2021 14:54:05.0
CASSIUS TADEU
SCARPIN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
19/11/2021 15:02:07.0
EUDIS FURTADO
FILHO

Avaliador
Externo

Assinatura
Eletrônica
02/12/2021
17:33:08.0

JOSÉ EDUARDO PÉCORA JUNIOR

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
20/11/2021
09:42:45.0 JULIO
EDUARDO ARCE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Avenida Prefeito Lothario Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4464 - E-mail: ppgold@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 128782

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.pppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 128782**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde e disposição que me permitiu a realização deste trabalho.

A minha esposa e filhos e neta pela compreensão na ausência nos dias de sábado e domingo e feriados durante meses.

Aos nossos amigos e colegas do mestrado, principalmente ao Cassio e ao Oberdan, com quem trocamos muitas ideias sobre os nossos assuntos, enriquecendo os trabalhos das disciplinas.

Aos professores que dedicaram esforços para transferir os conhecimentos necessários para a nossa formação.

Aos meus gestores que oportunizaram condições ideais para o desenvolvimento do estudo em uma estrutura ferroviária.

Agradecemos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste estudo.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez. ”

Thomas Edison

RESUMO

O setor agropecuário, de acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária Brasileira, foi responsável em 2019 por 21,4% do PIB brasileiro – com uma contribuição de R\$ 1,5 trilhão. O transporte ferroviário foi responsável pela movimentação de 24,40% do volume de grãos da safra agrícola brasileira exportada em 2019, demonstrando a importância do transporte ferroviário no agronegócio. O escoamento da produção agrícola por este modal, além das vantagens de custos, também contribui para aliviar a pressão sobre o sistema rodoviário, uma vez que os veículos para transporte de grãos acabam sendo mais pesados e mais lentos do que aqueles de transporte de carga geral. As concessões de ferrovias, realizada na década de 90, marcaram o retorno de maiores investimentos no modal e as empresas, segundo o ministério dos transportes, já investiram um total de R\$ 3,3 bilhões, destinados, principalmente, para melhoria e recuperação da malha, compra e reforma de material rodante, aquisição de novas tecnologias, capacitação profissional e qualificação das operações. Entretanto, entre 1990 e 2020 a produção do agronegócio no Brasil cresceu 338 %, passando de 57,9 milhões para 254,0 de milhões de toneladas. Com isso, o investimento em ferrovias ainda é insuficiente para fazer frente ao crescimento do agronegócio brasileiro no período. Desta forma, para resolver problemas no curto prazo, é necessário o aumento da eficiência do modal e, assim, mitigar o descompasso dos crescimentos. O presente trabalho apresenta uma abordagem de otimização da quantidade de vagões necessária para a operação em redes singelas – que representam 70% das malhas ferroviárias do Brasil – e em circuitos fechados. O Modelo de Programação Inteira Mista (PIM) proposto tem como objetivo a minimização da quantidade de vagões para atender demandas determinadas pelas necessidades de cargas dos navios no porto. O modelo matemático proposto foi aplicado em dados reais de uma operação ferroviária e mostrou que é possível atender à demanda atual com 8,43% vagões a menos, ou aumentar a demanda atendida em 9,28 % com a mesma quantidade de vagões atuais. Além disso, o modelo proposto proporciona mais rapidez e agilidade nas respostas para diferentes mudanças de cenários, além de poder ser utilizado como um simulador para diferentes análises gerenciais.

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

ABSTRACT

The agricultural sector, according to the Confederation of Agriculture and Livestock in Brazil, was responsible in 2019 for 21.4% of the Brazilian GDP – with a contribution of R\$ 1.5 trillion. Rail transport was responsible for handling 24.40% of the volume of grain from the Brazilian agricultural harvest exported in 2019, demonstrating the importance of rail transport in agribusiness. The flow of agricultural production through this modal, in addition to the cost advantages, also contributes to alleviating the pressure on the road system, since vehicles for transporting grain end up being heavier and slower than those for transporting general cargo. The railroad concessions, carried out in the 1990s, marked the return of greater investments in the modal and the companies, according to the Ministry of Transport, have already invested a total of R\$3.3 billion, mainly intended for the improvement and recovery of the mesh, purchase and repair of rolling stock, acquisition of new technologies, professional training and qualification of operations. However, between 1990 and 2020 agribusiness production in Brazil grew 338%, from 57.9 million to 254.0 million tons. As a result, investment in railroads is still insufficient to cope with the growth of Brazilian agribusiness in the period. Thus, to solve problems in the short term, it is necessary to increase the efficiency of the modal and, thus, mitigate the mismatch of growth. This work presents an approach to optimizing the number of wagons required for operation in simple networks – which represent 70% of the railway networks in Brazil – and in closed circuits. The proposed Mixed Integer Programming Model (PIM) aims to minimize the number of wagons to meet demands determined by the cargo needs of ships in the port. The proposed mathematical model was applied to real data from a railway operation and showed that it is possible to meet the current demand with 8.43% fewer cars, or increase the serviced demand by 9.28% with the same number of current cars. Furthermore, the proposed model provides more speed and agility in the responses to different scenario changes, in addition to being able to be used as a simulator for different management analyses.

Keywords: linear programming; railroad; railway capacity model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Desenho malha ferroviária	20
Figura 2 Desenho de um rodeiro bitola métrica	21
Figura 3 Line up	21
Figura 4 Figura embarque navio graneleiro.....	22
Figura 5 Navio atracado com operação do ship loader	22
Figura 6 Desenho dos terminais portuários.....	23
Figura 7 Desenho esquemático da interligação entre terminais.....	23
Figura 8 Formatação do Line up Paranaguá.....	25
Figura 9 Programação de carregamento.....	26
Figura 102 Programação de descarga	28
Figura 113 Foto da estação do Km 5	29
Figura 124 Foto do patio de D. Pedro II	29
Figura 135 Esquemático Patio D Pedro II	30
Figura 146 Programa de encoste e retiradas	30
Figura 157 Programação de descarga total	31
Figura 16 Capacidades de descarga dos terminais	32
Figura 179 Exemplo de pátio de cruzamento	33
Figura 18 Capacidade de carregamento por terminais	35
Figura 19 Relação de emissão de CO2	59
Figura 20 Cálculos de custos do produtos	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação de preços por tonelada transportada nos modais nos principais fluxos da safra agrícola brasileira.....	14
Gráfico 2 Evolução da exportação de soja pelos portos brasileiros	14
Gráfico 3 Evolução das quantidades de vagões	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Evolução da safra brasileira no ano de 2020	18
Tabela 2 Tabela Origem Destino	55
Tabela 3 Cenários de otimizações	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo Geral	18
1.2	Objetivos Específicos	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
2.1	Operação Portuária	21
2.2	Programação de Carregamento Ferroviário	25
2.3	Processo de Recepção de Trens no Porto.....	28
2.4	Recepção e Carregamentos nas Origens	34
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	39
4	PROPOSTA DO MODELO PARA OTIMIZAÇÃO DE CARREGAMENTOS DE VAGÕES.....	48
5	RESULTADOS	56
6	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

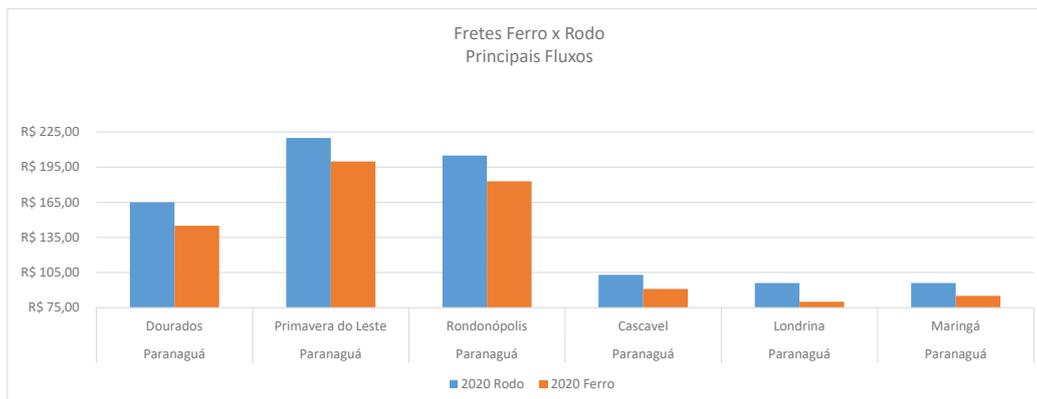
Uma infraestrutura de transporte de carga eficiente é um elemento importante para o desenvolvimento econômico de um país, pois proporciona transporte com baixos custos, gerando desenvolvimento econômico e bem-estar social. O custo logístico, que é a soma dos gastos com transporte, estoque, armazenagem e serviços administrativos consome 12,7% do PIB (Produto Interno Bruto) do Brasil, sendo que a maior parte do custo é formada pelo transporte, que equivale a 6,8% do PIB ou R\$ 401 bilhões (Ilos, 2017)

A operação do modal ferroviário possui altos custos de implantação e manutenção e, por isso, 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. O modelo de controle do Estado estava inviabilizando a operação das ferrovias, pois os altos custos e o baixo nível de eficiência desestimulavam a utilização do modal.

Entretanto, na década de 90 o Brasil fez um movimento de crescimento do modal ferroviário, modificando a sua participação na matriz de transporte brasileira, com o evento das privatizações. Desde então o grande atrativo no Brasil para o uso das ferrovias tem sido a redução dos custos, especialmente no transporte de grãos com direção aos portos.

A redução do custo logístico no escoamento da safra do agronegócio gera benefícios diretos ao Brasil e à cadeia produtiva. Uma vez que o preço de venda das commodities é determinado pelo mercado, é a redução do custo que gera maiores margens e mais competitividade para os envolvidos. Neste contexto, tem-se no Gráfico 01 a comparação de preço de transporte ferroviário e rodoviário por tonelada nos principais corredores de exportação em 2020.

Gráfico 1 – Comparação de preços por tonelada transportada nos modais nos principais fluxos da safra agrícola brasileira

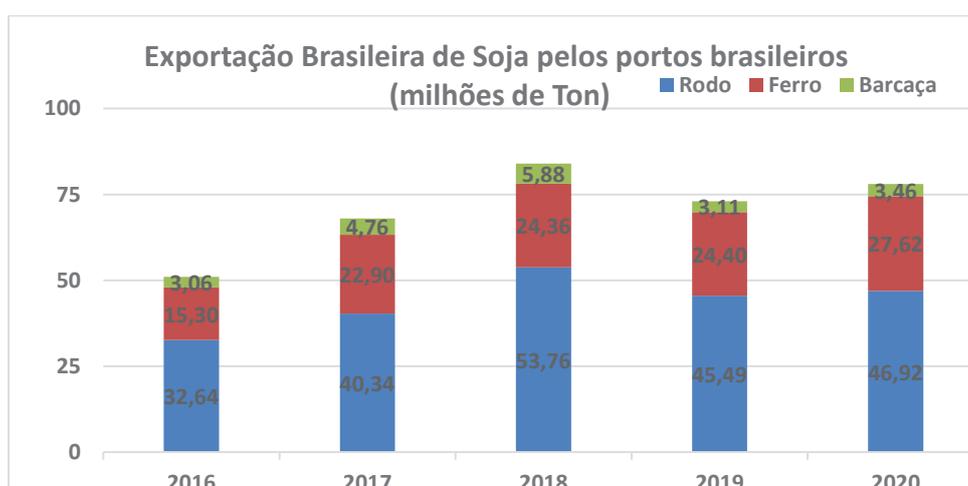


(fonte: o autor)

Segundo o trabalho de Fini, Alan et al. (2018), o desenvolvimento de ferramentas para otimizar o fluxo ferroviário traz ganhos expressivos para o preço do produto. Particularmente, para o porto de Paranaguá – segundo maior porto do Brasil – a operação ferroviária representa 24% do mercado de frete de commodities agrícolas. No ano de 2019 o Brasil exportou 73 milhões de toneladas e em 2020 a quantidade aumentou para 78 milhões de toneladas – 6,41% de crescimento.

O Gráfico 2 ilustra a evolução das exportações de soja do mercado brasileiro nos últimos 5 anos, demonstrando a evolução do transporte ferroviário, frente a dois outros modais utilizados no escoamento do produto até os portos.

Gráfico 2 Evolução da exportação de soja pelos portos brasileiros



(fonte: o autor)

O Paraná é o segundo maior produtor de soja do Brasil, gerando 16,133

milhões de toneladas na safra 18/19 e 20,782 milhões de toneladas na safra 19/20 segundo o Deral (Departamento de Economia Rural do Paraná), sendo que 5,6 milhões foram transportados via ferrovia. Essa produção indica a importância e a necessidade de maior capacidade ferroviária para o escoamento de produtos.

O melhor transporte da safra via ferrovia está atrelado diretamente a intenção da administração do porto de Paranaguá em dobrar a sua capacidade de recepção até 2025. Para isso, estão em andamento várias frentes de trabalho, tanto em terra quanto no mar. Uma delas está no aumento da capacidade de recebimento de cargas via ferrovia, com a construção de uma estrutura de descarga para 160 vagões descarregando em 3 moegas de descarga de forma simultâneas. Outra frente de trabalho está na dragagem do canal de acesso dos navios, assim como dos berços de atracação, a fim de proporcionar a atracação de navios com maiores capacidades.

Amigo e Lima (2011) descreveram como as políticas de custos dos transportes podem afetar a competitividade do negócio e influenciar os preços das commodities pagos aos produtores nos mais diversos países produtores agrícolas. Na formação do preço de custo da soja mostra-se que, em certos casos, os custos internos de transporte da soja no Brasil podem representar 230% a mais que nos Estados Unidos.

Diante do exposto, respostas para as perguntas a seguir podem trazer grandes contribuições para o agronegócio no Brasil:

O que pode ser realizado para melhorar a logística de transporte da soja até os portos?

Como melhorar o preço da *comoditie* para o produtor brasileiro?

Como reverter ou diminuir a desigualdade que temos com relação a preços do produto no mercado internacional?

As respostas para cada uma das perguntas não são únicas e existem casos em que a mesma solução pode auxiliar em todas elas. A otimização da utilização das ferrovias e das operações ferroviárias desempenha papel importante neste contexto. Entretanto, mais do que reconhecer a importância da otimização, é necessário também estabelecer de forma objetiva como fazer.

A Pesquisa Operacional tem sido utilizada com sucesso em diversos

setores nos últimos anos. Particularmente, em aplicações em ferrovia podem ser destacados os de Leal (2016), Riejos (2013), Camargo (2012) e Loch, Witiuk e Alves (2020). Entretanto, mesmo com todos os ganhos e potências de aplicações, ainda é escassa a utilização desses modelos na operação ferroviária brasileira.

Do ponto de vista econômico, ter um melhor transporte ferroviário é importante para a melhora de custo. Uma vez que não é viável a expansão das linhas em curto espaço de tempo e nem comprar mais vagões, pois os custos de Capex são muito elevados, a otimização do processo de carregamento é a melhor alternativa para aumentar a eficiência, tornar o agronegócio mais competitivo e os agricultores terem seus ganhos aumentados.

Helman (2011) descreve sobre a importância o uso das ferrovias na multimodalidade, buscando eficiência e produtividades melhores, otimizando os lucros dos produtores americanos. O autor examina os impactos do congestionamento da infraestrutura ferroviária na bacia de Puget Sound. A motivação do trabalho foi a necessidade de buscar melhorias das capacidades de escoamento de produtos pelos portos dessa bacia americana, pois o congestionamento do fluxo ferroviário afetava não somente o transporte, mas toda a economia agrícola da região.

A questão das chegadas no porto fora de uma programação de descarga, seja ela por atrasos, excesso ou faltas de oferta, geram um problema de congestionamento no ponto de descarga. A programação realizada utilizando a pesquisa operacional demonstra que é possível chegar a um ótimo de carregamento frente a uma demanda.

O trabalho afirmou: "... as estradas de ferro estão atendendo às demandas existentes de tráfego de longa distância, mas estão enfrentando limitações de capacidade durante os volumes de pico em algumas de suas rotas". Além disso, foram identificados mais de 100 projetos de melhoria de capital de vários tamanhos e custos, os quais seriam necessários para cumprir os objetivos de aumentar as capacidades e transportar o sistema ferroviário do estado atual para um estado mais otimizado aumentando suas capacidades.

Amorim (2018) mostrou em seu estudo que é possível melhorar a eficiência das ferrovias por meio de trabalhos de modelagem matemática e

simulações. No trabalho ele afirmou “A operação ferroviária de carga é de grande importância para o crescimento da economia do Brasil, demandando investimentos significativos para a manutenção de sua infraestrutura, equipamentos e mão de obra”. O mesmo autor ainda completa: “A análise operacional através de metodologias de simulação traz grande benefício, pois permite, como pode-se observar, avaliar rapidamente diferentes alternativas físicas e operacionais com vista a melhorar cada vez mais o sistema e reduzir os custos. ”

Diversos projetos de pesquisa de acadêmicos têm sido desenvolvidos para estudar modelos de simulação para sistemas de transporte ferroviário com a proposição de simulação e otimização das capacidades de transporte. Amorin (2018) argumenta ainda que podemos utilizar um modelo de simulação de Monte Carlo para resolver congestionamentos em pátios, pois segundo os estudos os vagões ficam 2/3 do tempo parados em pátios.

A importância da análise de simulações se deve às necessidades de otimizar os sistemas de transporte ferroviário. Modelos de simulação apresentam vantagens nas tomadas de decisões sem interferir no sistema, testando novos modelos de tamanhos e tempos de trens por exemplo.

O transporte ferroviário se torna mais eficiente quando temos um grande número de vagões sendo movimentados de uma única vez, o aumento do número de vagões em um mesmo trem distribui melhor os custos fixos em um único trem.

A falta de uma eficiência dentro dos pátios de manobras, que geram uma perda de tempo de trânsito e ou de capacidade de carregamento, são tempos que afetam a performance da operadora ferroviária, mas que podem ser minimizados se tivermos trens mais longos, que deslocam mais cargas em um mesmo tempo de trânsito.

Caixeta, Filho e Gameiro (2001) mostram que, durante o período da safra, os caminhões existentes no mercado não são suficientes para atender a toda movimentação de soja e de outras commodities, ve-se na Tabela 1 o volume produzido na safra brasileira de 2020.

Atualmente temos aproximadamente 2.800.000 caminhões emplacados no Brasil, dados do anuário da ANTT, 54% de aumento em relação à 2001, data

da pesquisa do trabalho de Caixeta, Filho e Gameiro (2001). Entretanto, o agronegócio cresceu mais de 330% no mesmo período, o que indica que a utilização apenas de caminhões ainda é insuficiente para transportar toda a safra agrícola brasileira.

Tabela 1 Evolução da safra brasileira no ano de 2020

SAFRA 2020						
Meses	Ton	Ton	Qtde Cms /dia	Qtde Cms /mês	Ciclo de viagem em dias	Necessidade de Cms/mês
	embarcada/mês	embarcada/dia				
Janeiro	887.142	28.617	773	23.977	4	95.907
Fevereiro	1.360.406	48.586	1.313	36.768	4	147.071
Março	2.473.924	79.804	2.157	66.863	4	267.451
Abril	2.474.705	82.490	2.229	66.884	4	267.536
Mai	2.452.622	79.117	2.138	66.287	4	265.148
Junho	1.456.099	48.537	1.312	39.354	4	157.416
Julho	1.819.851	58.705	1.587	49.185	4	196.741
Agosto	1.968.448	63.498	1.716	53.201	4	212.805
Setembro	1.777.693	59.256	1.602	48.046	4	192.183
Outubro	1.664.963	53.708	1.452	44.999	4	179.996
Novembro	1.122.779	37.426	1.012	30.345	4	121.381
Dezembro	667.082	21.519	582	18.029	4	72.117
Total	20.125.713		17.872	543.938		2.175.753

(do Autor)

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

No presente trabalho é apresentado um modelo matemático de Programação Inteira Mista (PIM), que dada a demanda de soja nos portos, os tempos de carregamento/descarregamento e de deslocamento entre os pontos na ferrovia, consiga gerar o planejamento operacional de forma a minimizar a quantidade total de vagões a serem utilizados. Os ganhos naturais são o tempo necessário para o planejamento – dispensando reuniões longas – e a redução de recursos utilizados, gerando capacidades extras para ser alocada em fluxos com maior rentabilidade financeira.

1.1 Objetivo Geral

Propor uma nova metodologia para o planejamento otimizado da operação de exportação de graneis agrícolas do estado do Paraná, via o transporte ferroviário.

1.2 Objetivos Específicos

- Modelar a circulação de trens em linhas singelas.

- Desenvolver um modelo matemático que possa ser também utilizado para simulação dos cenários de carregamento x descarga de vagões.
- Implementar o modelo matemático em ambiente de fácil utilização para os diferentes interessados
- Descrever como serão aplicados os modelos e seus ganhos

1.3 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. Dentre os ganhos destacam-se a diminuição da emissão de CO₂ na atmosfera e redução 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. Além disso, tem-se a redução do custo de transporte no escoamento da safra agrícola e, conseqüentemente, ganhos para a economia brasileira.

O estado do Paraná está entre os maiores produtores de grãos do País e apresenta 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.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho trata da proposição de uma metodologia de PIM para otimizar o uso das linhas singelas de uma empresa ferroviária. A otimização do uso das linhas é realizada pela minimização da quantidade de vagões necessária para atender demandas pré-estabelecidas. Destaca-se que os valores das demandas podem ser alterados a fim de definir capacidades.

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 1 mostra o desenho da malha estudada.

Figura 1 Desenho malha ferroviária

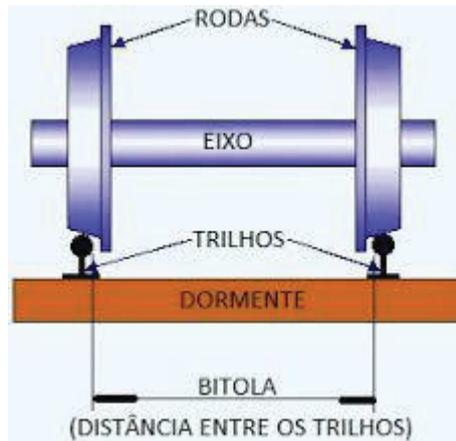


(cedido pela operadora ferroviária)

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. A malha ferroviária utilizada como base para o presente é de bitola estreita. Isso significa que temos uma distância de 1 metro entre os trilhos (Figura 2). Esse tipo de bitola tem como característica uma menor capacidade de peso nos vagões, o que ratifica a

necessidade de termos uma melhor utilização dos ativos da empresa.

Figura 2 Desenho de um rodeiro bitola métrica



(cedido pela operadora ferroviária)

2.1 Operação Portuária

Os navios para exportação de grãos chegam ao porto de Paranaguá durante todo o ano e ocupam lugares em uma fila de espera (chamada de *line up*), de acordo com dados de data e hora de chegada do navio no porto. A figura 3 mostra um exemplo de um *line up* do corredor de exportação de grãos do porto de Paranaguá.

Figura 3 Line up

ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ 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	TRANS-PACIFIC	9597226	229,02	GRANEL SOLIDO	MILHO	BB	CARGONAVE TIBAGI	19/12/2020	11/12/2020	19/12/2020	16:05	06:00	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	09/12/2020	17/12/2020	12:30	01:30	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	CHEGADA	ETB	ETS	TONS PREV	TONS	POSICÃO			
1	63406	0455522020	213	DARYABAR	9369710	225,00	GRANEL SOLIDO	MILHO	-	WORLD SHIPPING PARANA	18/12/2020	10/12/2020	17:18	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	11/12/2020	17:46	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	Consignação			
1	63394	0449382020	213	ALKIMOS	9603001	229,13	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	-	CARGILL AGRICOLA	15/12/2020	15/12/2020	22:50	21:30	57.971,000	16/12/2020 00:00	57.971,000	Prioritário		
2	63416	0466152020	213	KT BIRDIE	9597343	225,00	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	-	ALPHAMAR AGENCIA MARITIMA	13/12/2020	14/12/2020	14:12	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	17/12/2020	22:42	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	Consignação			
1	63491	0463602020	212	NEA ELPIS	9527518	228,99	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	-	CARGILL AGRICOLA	20/12/2020	19/12/2020	02:30	15:00	30.000,000		-	-		
2	63513		213	GOLAFRUZ	9323833	225,00	GRANEL SOLIDO	MILHO	-	WORLD SHIPPING PARANA	20/12/2020	20/12/2020	09:12	09:12	47.000,000		-	-		
ANUNCIADOS																				
PN	DUV	BERÇO	EMBARCAÇÃO	IMO	LOA	ESPECIALIDADE	PRODUTOS	BORDO	AGÊNCIA	OPERADOR	CHEGADA	ETA	ETS	TONS PREV	TONS	CAL. CHEG.	CAL. SAÍDA			
1	63534		213	DEM FIVE	9261011	176,85	GRANEL SOLIDO	FARELO DE SOJA	-	WILLIAMS TIBAGI	24/12/2020	16:00	27/12/2020	15:00	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	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	19:00	64.000,000	7,10	12,50		

(Administração dos portos do Paraná)

Esses navios ocupam uma fila determinada do *line up* de Paranaguá, o qual é revisitado de segunda a sexta feira, para que se possa ter a programação

dos navios para atracação.

O porto possui 17 berços de atracação, sendo que 3 deles 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 4 mostra *ship loaders* operando no carregamento de grãos.

Figura 4 Figura embarque navio graneleiro



(Google pesquisa 22/12/2020)

A Figura 5 mostra um berço de atracação de navios em Paranaguá do corredor de exportação de grãos.

Figura 5 Navio atracado com operação do ship loader



(Google, pesquisa 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 Figura 6 mostra o complexo do corredor de exportação (berços 212, 213 e 214).

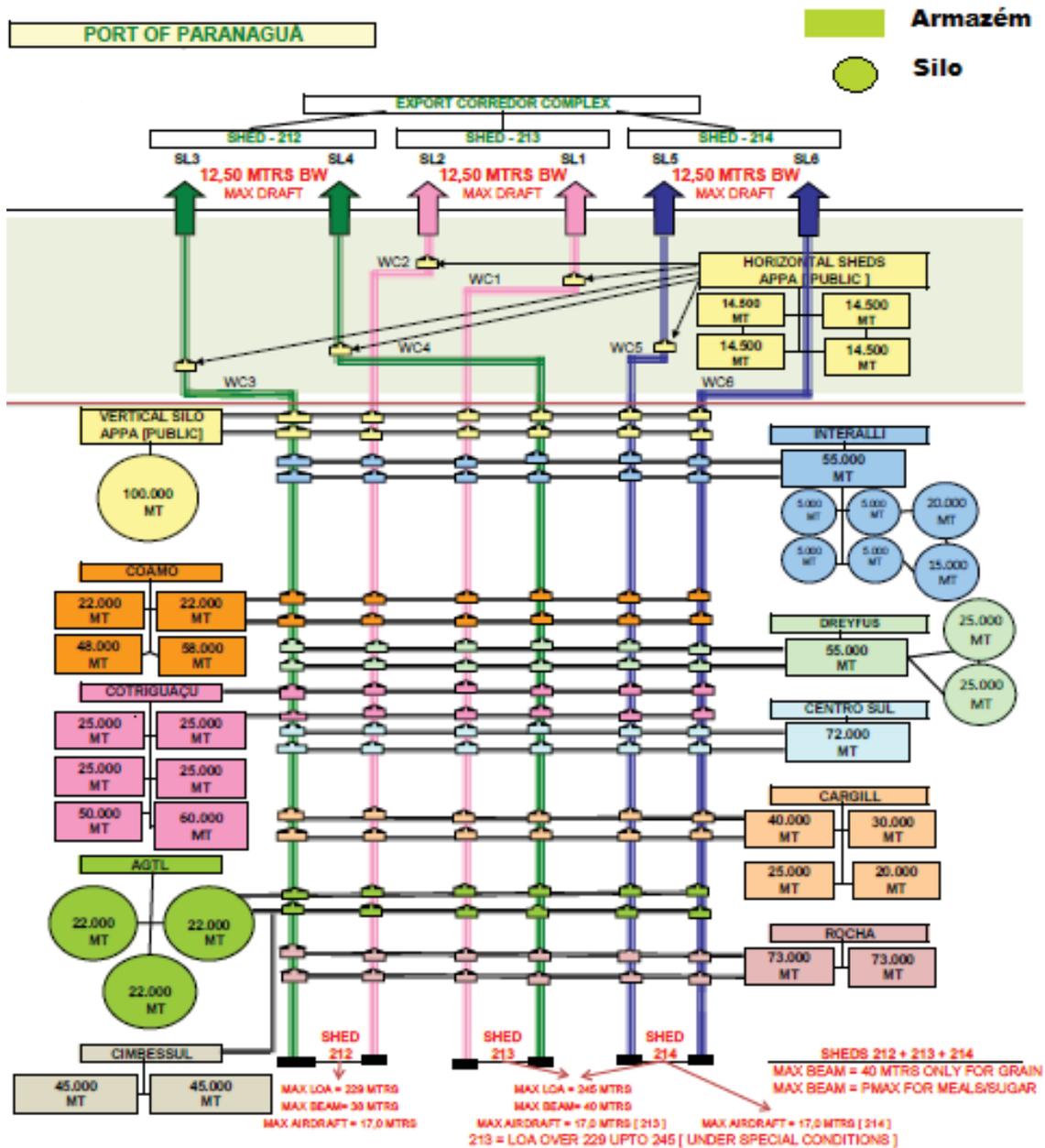
Figura 6 Desenho dos terminais portuários



(arquivo do autor)

A Figura 7 mostra o desenho da interligação dos terminais com os berços de embarque, com a representação do tipo de armazenamento (silo ou armazém) com suas capacidades e as linhas de interligação com cada berço. As representações em forma de círculo são de silos verticais e as em forma de retângulo são armazenagens horizontais. Dentro de cada figura tem-se a indicação da capacidade de armazenagem de cada instalação.

Figura 7 Desenho esquemático da interligação entre terminais



(arquivo do autor)

O *line up* total de Paranaguá é formado pelos navios que já estão em porto mais os navios esperados com chegada nas próximas 72 horas. O *line up* dos navios em porto tem mais uma divisão, navios atracados, navios programados, navios do *line up* 18 e o restante dos navios em porto não programados. O *line up* 18 que é aquele que forma a fila dos navios aptos para serem programados, assim que abram vagas para atracações. Esse procedimento é necessário para tornar possível uma melhor condição de programação de chegada de cargas. A cada navio que é programado para

atracação, tem-se a abertura de uma vaga no *line up* 18. A Figura 8 mostra o esquema detalhado do *line up* de Paranaguá.

Figura 8 Formatação do Line up Paranaguá

LINE UP TOTAL DE PARANAGUÁ				
Total de navios em Porto			Total de navios esperados nas próximas 72 horas	
3 Navios atracados	Navios programados	Line Up 18	Restante dos Navios em porto	Navios esperados nas próximas 72 horas

(Administração dos portos do Paraná)

A sequência de atracação em Paranaguá considera a chegada do navio em porto, tipos de carga e quantidade, que determinam o tipo de atracação. Uma atracação normal é aquela em que o navio tem menos de 50.000 toneladas a ser embarcada, enquanto uma atracação prioritária é aquela em que o navio tem mais de 50.000 toneladas a ser embarcada e pelo menos duas consignações de 17.500 toneladas. Por fim, tem-se a programação de navio super berço, essa modalidade tem como pré-requisitos para a sua tipificação, um navio com mais de 50.000 toneladas a ser embarcada, 3 terminais com consignação de 17.500 t, uma consignação representa um volume nomeado para embarque no navio. O fato de termos 3 terminais com a maioria da carga de embarque é para que possamos ter minimizadas as paralizações para troca de terminais de embarque.

O tempo total de operação desse navio é de 36 horas, caso o navio ultrapasse esse tempo, a autoridade portuária determina a desatracação do navio e sua inclusão no final da fila do *line up*.

2.2 Programação de Carregamento Ferroviário

A demanda gerada pela chegada e prontidão dos navios é enviada toda quarta-feira ao setor comercial da empresa de transporte ferroviário pelos clientes contratantes do transporte. Os clientes informam a empresa ferroviária o volume a ser transportado na semana da programação (Figura 9), o terminal de origem e terminal de descarga, com uma possível cadência de carregamento e descarga, que deve ser avaliada pela área de planejamento da empresa ferroviária.

Figura 9 Programação de carregamento

ORIGEM	ERM. CARG.	CLIENTE	MERCADORIA	DESTINO	TERM. DESCARGA	26/11	27/11	28/11	29/11	30/11	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12
MARINGÁ	CARGILL	CARGILL	MILHO	PARANAGUÁ	CARGILL	60	55	60	35	40	40	40	50	50	50
MARINGÁ	COCAMAR	GAVILON	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	0	19	0	0	0	20	0	10	0	0
MARINGÁ	COCAMAR	GAVILON	MILHO	PARANAGUÁ	COTRIGUAÇU	0	20	20	0	0	20	0	20	0	20
MARINGÁ	COCAMAR	GAVILON	MILHO	PARANAGUÁ	CENTRO SUL	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0
MARINGÁ	COCAMAR	CARGILL	MILHO	PARANAGUÁ	CARGILL	20	0	20	20	20	0	20	0	0	0
MARINGÁ	COCAMAR	CJ	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	0	20	0	0	0	0	20	0	0	20
MARINGÁ	RHALL	C.VALE	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	20	0	20	0	0	0	0	0	0	0
MARINGÁ	RHALL	COAMO	MILHO	PARANAGUÁ	ROCHA	20	59	0	0	0	0	0	0	0	0
MARINGÁ	RHALL	COAMO	MILHO	PARANAGUÁ	COTRIGUAÇU	20	0	40	20	0	28	20	20	0	0
MARINGÁ	RHALL	COAMO	MILHO	PARANAGUÁ	CENTRO SUL	0	0	0	0	25	30	36	0	0	0
MARINGÁ	RHALL	LAR	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	0	0	0	0	0	0	0	25	20	0
MARINGÁ	CPA	CHS	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0
MARINGÁ	CPA	COAMO	MILHO	PARANAGUÁ	COTRIGUAÇU	20	35	20	20	0	0	20	20	27	30
MARINGÁ	CPA	COAMO	MILHO	PARANAGUÁ	CENTRO SUL	0	20	0	0	20	20	0	0	0	0
MARINGÁ	CPA	COAMO	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	40	24	40	60	20	0	0	0	0	0
MARINGÁ	SEARA	JUIS DREYFU	MILHO	PARANAGUÁ	LOUIS DREYFUS	0	0	80	0	40	40	0	0	0	75
LONDRINA	ATT	CHS	MILHO	PARANAGUÁ	CENTRO SUL	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
LONDRINA	ATT	CHS	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0
LONDRINA	ATT	CARGILL	MILHO	PARANAGUÁ	CARGILL	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LONDRINA	RICOLOG	LAR	MILHO	PARANAGUÁ	INTERALLI	0	20	0	0	0	0	25	8	0	0
						220	292	300	175	185	223	181	153	97	195

(arquivo do autor)

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, o planejamento é realizado com os dados de todas as carteiras de transporte da malha sul da empresa ferroviária. 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.

O resultado desse planejamento gera um documento que vai dirigir todos os carregamentos e descargas da semana S+1.

O documento gerado pelo planejamento ainda tem de ser validado pela área comercial da empresa ferroviária, pois tem-se a necessidade de verificar se está sendo atendido também os contratos feitos com os clientes. A ferrovia faz contratos *take or pay* – contratos que tem obrigações de atendimento de volume dos dois lados, existindo uma compensação financeira para o lado que não teve seu contrato atendido. A figura 11 mostra um exemplo de contratos *take or pay*. Exemplo de termos de *take or pay*:

As empresas acordam na assinatura dos contratos os volumes e as tarifas, que serão executados no contrato, esses valores são base para o cálculo de *take or pay*.

Temos um exemplo de volumes e tarifas :

2021	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Total
Volume	50.000	50.000	40.000	35.000	35.000	210.000
Preço(R\$/T)	50,00	45,00	40,00	35,00	40,00	

Fórmula de cálculo Take or pay (TOP)

TOP = (Volume Realizado – Tolerância Contratual) x Tarifa x % Cobrado x Culpabilidade (Figura 10)

Figura 10 – exemplo de calculo de TOP

Cliente	Tarifa	Contrato	% Tolerancia	Tolerancia	Realiz.	Real vs Tolerancia	Culpa Ferro	Culpa Cliente	% Cobrado	Ferro Paga	Cliente paga	TOP
A	R\$ 80,00	20.000	90%	18.000	19.000	1.000	0%	0%	40%	R\$ -	R\$ -	R\$ -
B	R\$ 80,00	20.000	90%	18.000	15.500	- 2.500	35%	65%	40%	R\$ 35.000,00	R\$ 65.000,00	R\$ 30.000,00

O contrato realizado entre a operadora e o cliente tem como clausulas acordadas os valores de volume, percentuais de tolerância, valor da multa por não cumprimento e os cálculos.

Somente depois dessas checagens terem sido realizadas é que se tem a efetiva programação da semana S+1. Caso algum contrato ou necessidade de algum cliente não seja contemplado, isso poderá ser revisitado durante a semana, caso exista alguma sobra de capacidade.

Com o fechamento das negociações o planejamento emite a programação da semana seguinte, que inicia com os carregamentos no domingo, a Figura 11.

Figura 11 Programação de carregamento

UN	BITOLA	ORG	DST	CONFIRMADO SISTEMA	150	250	170	250	190	240	165	1.415	202
					DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB	TOTAL	MÉDIA
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	50	50	50	50	50	50	50	350	50
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	0	0	0	0	20	10	0	30	4
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	40	0	0	0	0	0	0	40	6
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	0	20	20	20	0	0	0	60	9
UNPR	ESTREITA	LSD	LDP	CONFIRMADO	20	20	20	20	20	10	0	110	16
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	0	0	0	0	0	20	35	55	8
UNPR	ESTREITA	LLD	LDP	CONFIRMADO	20	0	0	20	0	20	0	60	9
UNPR	ESTREITA	LRL	LDP	CONFIRMADO	0	0	20	0	20	0	0	40	6
UNPR	ESTREITA	LLD	LDP	CONFIRMADO	0	20	0	0	20	0	0	40	6
UNPR	ESTREITA	LMA	LDP	CONFIRMADO	0	80	0	80	0	80	0	240	34
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	20	20	20	20	20	20	20	140	20
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	0	20	0	20	0	20	20	80	11
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	0	0	20	0	20	10	20	70	10
UNPR	ESTREITA	LMG	LDP	CONFIRMADO	0	20	20	20	20	0	20	100	14

(arquivo do autor)

O planejamento semanal é emitido para todos os clientes e terminais, para que possa ser realizado o planejamento dos terminais de origem e destino,

pois como já relatado temos dois modais descarregando simultaneamente nos terminais de destino.

Os terminais de descarga no porto, recebem carga pelo modal ferroviário e pelo rodoviário em locais distintos dentro do terminal de recepção, porém a armazenagem dessa carga é dividida pelos dois modais, isso é um indicador da importância das programações de descarga nos terminais, a empresa ferroviária envia para os terminais as programações de descarga da semana. Que são ratificadas diariamente pelo pessoal da programação, a Figura 12 exemplifica esse tipo de informação recebida pelo terminal.

Figura 102 Programação de descarga

SISTEMA CONFIRMAÇÃO		RESUMO CARGA													
Validação (Tudo)		29/nov 30/nov 01/dez 02/dez 03/dez 04/dez 05/dez													
UN	Segmento	ORG	TERM. CARGA	CLIENTE	MERCADORIA	DST	TERM. DESCARGA	DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB	TOTAL
UNPR	Grãos	LMG	CARGILL	CARGILL	MILHO	LDP	CARGILL	40	40	40	40	40	40	40	280
Grãos Total								40	40	40	40	40	40	40	280
UNPR Total								40	40	40	40	40	40	40	280
Total Geral								40	40	40	40	40	40	40	280

(arquivo do autor)

O planejamento semanal que foi dividido em sete dias de execução é diariamente refinado, podendo gerar um novo número de carregamento, pois temos a variável de oferta de vagões vazios do porto como um item importante nessa programação, o vagão descarregado hoje no porto será a oferta de 48 horas após na origem.

A programação de vagões pode sofrer a influência de vendas spot, feitas pelo comercial. Esses volumes são inseridos no processo durante as revisões diárias, caso exista espaço para que isso ocorra, caso contrário eles devem entrar na programação de semana seguinte.

2.3 Processo de Recepção de Trens no Porto

O processo de recebimento dos vagões carregados no porto se inicia com 4 horas de antecedência da chegada de vagões na estação chamada de KM5, a qual é a responsável por receber e triar os vagões carregados.

Os vagões são recebidos pelas linhas laterais do pátio, para que seja possível a passagem pelas classificações das cargas (Figura 13).

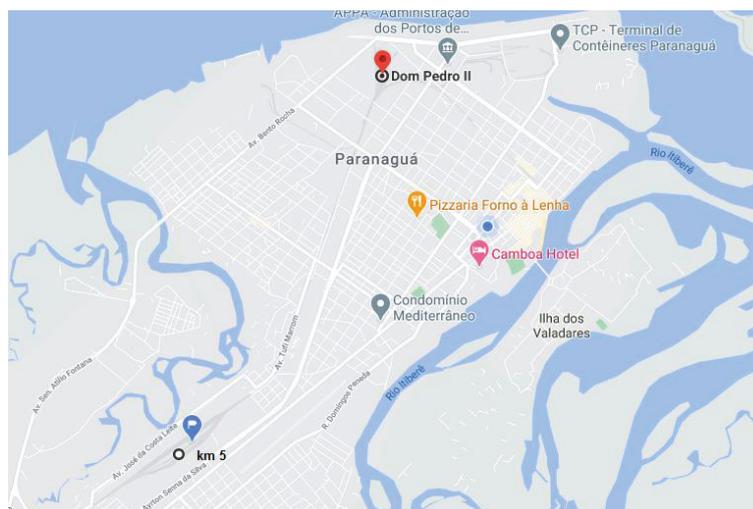
Figura 113 Foto da estação do Km 5



(arquivo do autor)

As locomotivas que chegam com o trem da origem são desanexadas do trem, para que as locomotivas de pátio possam assumir o trabalho de encostes. A primeira manobra a ser realizada é a separação dos vagões nas linhas para formação de manobras de deslocamento da estação do KM5 para a estação de D. Pedro II, essas manobras podem ser de 30 a 80 vagões cada uma e a montagem depende da capacidade da locomotiva que irá realizar o deslocamento para o segundo pátio de manobras (Figura 14).

Figura 124 Foto do patio de D. Pedro II

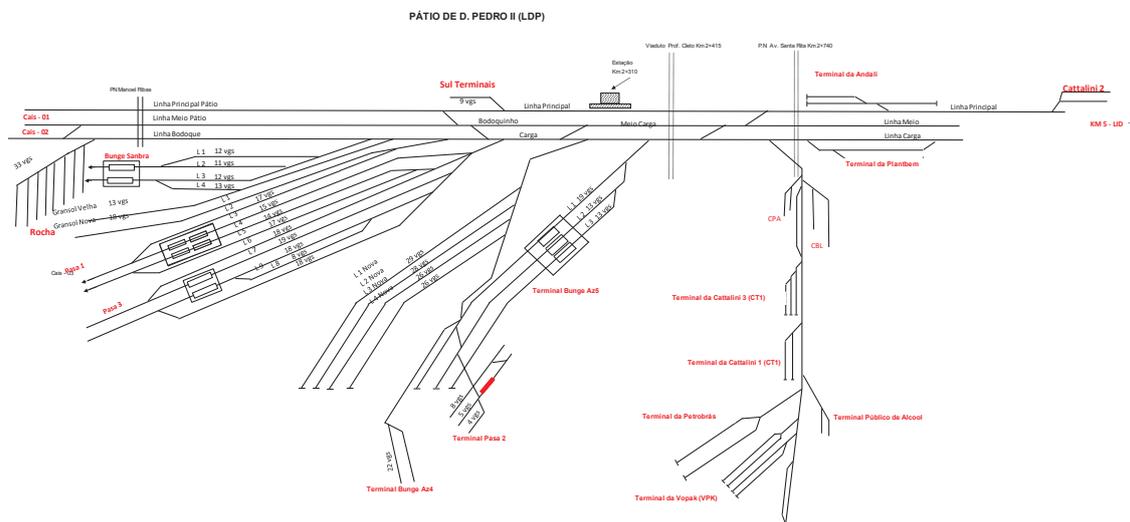


(Google 22/12/2020)

A estação de D. Pedro é o pátio formador das manobras para os

terminais de destino. Todas as manobras são programadas no dia anterior a chegada dos vagões e podem ter que sofrer algum ajuste devido a atrasos ou antecipações de chegadas. O esquemático da Figura 15 mostra o pátio de D. Pedro II.

Figura 135 Esquemático Patio D Pedro II



(arquivo do autor)

Todo esse processo é pré-ajustado diariamente, sempre levando em consideração as chegadas, tipos de produtos e capacidades de recepção dos terminais envolvidos. Caso se tenha alguma anomalia na via ou em algum terminal, pode haver algum ajuste a ser realizado na programação de encoste.

A Figura 16 exemplifica uma programação de encostes de um terminal do sistema do corredor de exportação, com o horário e quantidades de encostes e retiradas de vagões

Figura 146 Programa de encoste e retiradas

OFERTA D+1 - 06/12/2020																		
Backing Plano	Local	Out	Mens	Conta	Chegada	Chegada	Tram	Out	Mens	Conta	Chegada	Operações						
							K22	24	MILHO		06/12 17:00							
							K26	43	MILHO	LAR	07/12 12:00							
Mentoria	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00
ENCOSTES																		
RETIRADAS			21 VE															
Programação	Oferta	Descarga	Oferta	Descarga	Oferta	Descarga	Oferta	Descarga	Oferta	Descarga	Oferta	Descarga						
	23 x 07	23 x 07	07 x 15	07 x 15	15 x 23	15 x 23	D+1	D+1										
AÇÚCAR	0	0	0	0	0	0	0	0										
SOJA	0	0	0	0	0	0	0	0										
MILHO	24	0	24	24	43	18	67	42										
FARFEL	0	0	0	0	0	0	0	0										
GERAL	24	0	24	24	43	18	67	42										

(arquivo do autor)

As operações de encostes nos terminais ocorrem de acordo com a

capacidade interna de estacionamento de vagões, o tamanho de encoste pode ser maior do que a capacidade efetiva de descarga do terminal por turno de trabalho, o que pode deixar uma sobra para o início do turno subsequente. Além disso que deve se levar sempre em consideração quais produtos o terminal está recebendo, pois são características que podem interferir nas performances de descarga.

A Figura 17 mostra a programação de ofertas e descargas de todos os terminais do porto de Paranaguá, essa programação é realizada diariamente.

Figura 157 Programação de descarga total

Abrir	D	D+1	PROGRAMAÇÃO DE DESCARGA										26/10/2020			
TERMINAL	MERCADORIA	Δ D-1	PREV. D	CACOS	BAIXA 07H	DESC. 23 X 07	SOBRA 23 X 07	DESC. 07 X 15	SOBRA 07 X 15	CHEG 07 X 15	DESC. 15 X 23	OFERTA TOTAL D	DESC. TOTAL D	SOBRA D	Δ D-1/D	
PASA 1	AÇÚCAR	-15	163	0	38	42	91	59	32	111	60	244	161	83	-17	
PASA 3	AÇÚCAR		51	0	0	0	29	20	9	20	20	49	40	9	-11	
SOCEPPAR AZ5	AÇÚCAR	-14	45	0	0	11	43	22	21	0	17	54	50	4	-9	
SOCEPPAR AZ4	FARELO	-5	0	0	0	0	4	4	0	0	0	4	4	0	-1	
CARGILL	FARELO	-7	42	0	0	24	21	0	21	22	0	67	24	43	-25	
CARGILL	MILHO		59	0	0	0	77	25	52	2	30	79	55	24	-4	
CARGILL	SOJA		5	0	0	5	0	0	0	2	0	7	5	2	0	
CENTRO SUL	FARELO		11	0	0	0	37	0	37	8	6	45	6	39	-5	
CENTRO SUL	MILHO	5	53	0	10	10	38	25	13	20	13	68	48	20	0	
CORREDOR	FARELO		34	0	0	0	19	14	5	40	20	59	34	25	0	
CORREDOR	SOJA		0	0	0	0	3	0	3	0	0	3	0	3	0	
ROCHA	MILHO	38	160	0	25	39	45	27	18	50	42	134	108	26	-14	
ROCHA	SOJA		13	0	0	0	20	13	7	0	0	20	13	7	0	
CACOS			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	GRANEL	2	636	0	73	131	427	209	218	275	208	833	548	285	-86	

(arquivo do autor)

Na figura 17 temos as colunas que identificam os terminais e produtos recebidos por eles, a coluna do Δ D-1 que é o desvio da programação do dia anterior, Prev. D, que é o número previsto hoje de oferta por terminal e produto, cacos são vagões com problemas a serem resolvidos, por exemplo sem documentação, Baixa &H, são vagões dados baixa atrasado no sistemas 7 da manhã, prévias nos períodos de 23x7, 7x15 e 15x 23, as sobras da descarga do período anterior as chegadas naquele período e as descargas previstas para o período, as duas últimas colunas são as sobras das descargas do dia e o desvio de D-1 e D das programações.

Os vagões são pesados e movimentados dentro dos terminais com máquinas próprias de cada terminal, e são devolvidos em linhas externas específicas para vagões vazios, ficando à disposição da retirada da empresa ferroviária. Essas retiradas fazem parte da grade de manobras do dia de operação e qualquer atraso ou antecipação pode interferir no número de descarga do dia. Manobras de encoste e retiradas são muitas vezes casadas

nos terminais, com a intensão de maximizar o uso das locomotivas.

As programações de quantidades de descarga de cada um dos terminais são realizadas com a utilização de um estudo anterior de capacidade de cada terminal de descarga por hora (Figura 18)

Figura 16 Capacidades de descarga dos terminais

Produtividade Terminal Descarga							
Terminal	Produto	Vagão/dia	Vagão/hora	Turno 1 23x7h	Turno 2 7x15h	Turno 3 [☐] 15x23h	
CARGILL	FARELO	90	4	30	30	30	O terminal possui 3 linhas com capacidade de encoste de 40 vagões. Alívio de vazios a cada 25 vagões
	SOJA / MILHO						
CORREDOR	FARELO	45	2	15	15	15	O terminal possui 2 linhas com capacidade de 24 vagões. Alívio de vazios a cada 35 vagões
COTRIGUAÇU	FARELO	60	4	30	30	30	O terminal possui 3 linhas com capacidade de 45 vagões. Alívio de vazios a cada 25 a 30 vagões
	SOJA / MILHO						
DREYFUS	FARELO	45	2	15	15	15	O terminal possui 3 linhas com capacidade de 20 vagões. Alívio de vazios a cada 20 vagões
	SOJA / MILHO						
INTERALLI	SOJA	60	3	20	20	20	O terminal possui 3 linhas com capacidade de 25 vagões. Alívio de vazios a cada 20 vagões
CENTRO SUL	SOJA / MILHO	50	3	25	25	25	O terminal possui 2 linhas com capacidade de 25 vagões. Alívio de vazios a cada 25 vagões
ROCHA	SOJA/MILHO	120	5	40	40	40	O terminal possui 3 linhas com capacidade de 75 vagões. Alívio de vazios a cada 57 vagões

(arquivo do autor)

2.4 Processo de Preparação de Vagões Vazios

Todas as retiradas de vagões vazios dos terminais têm como destino o pátio de manobras da estação de D. Pedro, que é o estacionamento de vagões vazios e carregados com origem ou destino aos terminais de descarga, nesse local são acumulados até 80 vagões, para que seja possível formar trens que se deslocarão para o pátio do KM5.

No pátio do km5 os vagões passam por revisões e fechamentos antes de seguir viagem para o interior do estado para novos carregamentos.

Do total de vagões descarregados no dia, parte seguem para o interior para novos carregamentos de grãos e parte permanecem no porto para que sejam ofertados para o carregamento de fertilizantes.

As janelas de subida de trens são determinadas pela manhã na programação de descarga, levando em conta, espaços disponíveis na grade de subida da serra, assim como tipos de vagões disponíveis.

É importante que a realização das descargas pelos terminais dentro da programação, de forma que se tenha os veículos disponíveis para a formação de trens em momento correto da janela de subida. Os trens que sobem a serra são de tamanho diversos dos trens de descida, pois pode se ter trens mistos de vazios e carregados. Por exemplo temos os trens do Norte chegando com 120

vagões carregados e trens subindo a serra com destino ao interior com 80 vagões vazios e ou 60 vazios e 20 carregados de fertilizantes ou combustíveis.

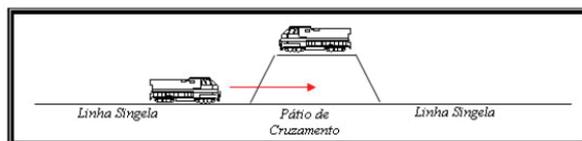
Essas formações devem ser feitas com 6 horas de antecedência da partida do trem.

O fato de se ter trens de tamanho diverso na subida contra a descida, pode gerar problemas no pátio de Paranaguá, com o acumulo de vagões, ocasionando um congestionamento e atrasos de manobras. Normalmente temos trens de 120 vagões chegando e de 80 vagões saindo e isso faz com que se tenha mais trens partindo do porto do que chegando no porto.

Os trens de subida são normalmente mais curtos, 80 vagões, para que possa ser feito o cruzamento entre trens, em pátios determinados para isso.

Pátio de cruzamento é um trecho da malha com duas ou mais linhas de tamanho fixo, que permite que, em linhas singelas, os trens estacionem em uma das linhas, liberando a outra para passagem do outro trem de sentido oposto, para isso é necessário que o comprimento do desvio seja suficiente para estacionar o trem inteiro, de forma que não interfira na passagem do outro, representado na Figura 19.

Figura 179 Exemplo de pátio de cruzamento



(arquivo do autor)

As formações dos trens no porto de Paranaguá para o envio de vagões com destino ao interior, para novos carregamentos, são planejadas com base no planejamento da descarga. Os programadores têm uma quantidade de vagões esperados das descargas e com essa informação vão formando os trens conforme grades de partidas de composições.

Os trens são formados no porto já com destino estabelecido, seja destino Maringá ou Londrina. A empresa ferroviária possui outros destinos que não serão tratados no estudo.

A estação da região de Curitiba é a responsável por receber todos os trens com origem no porto de Paranaguá e origem no interior do estado.

Nessa estação é feita a inversão de locomotivas, saem as locomotivas da serra e entram no trem as locomotivas que fazem o transporte no trecho chamado como central do Paraná, trecho de ligação de Curitiba as estações de Apucarana, Londrina e Maringá. A estação de Curitiba é a responsável pelo intercambio de vagões carregados oriundos das origens com os trens vazios com origem no porto, basicamente essa estação é apenas de passagem e troca de locomotivas.

A estação posterior a Curitiba é a estação de Apucarana, grande entroncamento já na região norte do estado, onde temos a divisão dos trens que seguem a Maringá ou a Londrina. A Figura 20 mostra o fluxo de transporte que está sendo estudado nesse trabalho.

Figura 20 Representação da malha estudada



(arquivo do autor)

2.4 Recepção e Carregamentos nas Origens

Temos dois pontos de carregamento no norte do Paraná, o lado Maringá e o lado Londrina.

No lado Maringá, o processo de carregamento se inicia com duas horas de antecedência, com a verificação da quantidade de vagões que chegam dentro do dia e planeja o recebimento e as manobras desses trens distribuindo entre os diversos terminais de carregamento.

Os trens podem vir com vagões vazios ou carregados. Além disso, cada tipo de vagão tem uma característica específica de encoste e tratamento.

Temos um planejamento de encostes de vagões vazios e retirada de vagões carregados, realizados de forma semelhante ao planejamento do porto. Sempre em D-1 é feito um plano que é revisitado em D, considerando as ofertas de vagões vazios para carregamento. Esse planejamento pode sofrer alguma alteração devido a desvios de chegadas de trens nas origens.

Esses encostes de vagões vazios e retiradas de vagões carregados devem determinar se o pátio corre um risco de congestionamento de vagões vazios e carregados. Sendo esse congestionamento prejudicial para o bom desenvolvimento das manobras de encostes e retiradas de vagões nos terminais.

A estação realiza os encostes dos vagões vazios com visão das descargas no porto. Isso é importante para que tenhamos blocos de vagões por clientes e destinos, o que otimiza as descargas e posterior retorno dos vagões as origens.

O programador informa ao cliente com antecedência a programação dos encostes e retiradas, confirmando a liberação do terminal para manobras e condição dos vagões a ser encostados e ou retirados. Os encostes e retiradas são calculados conforme a performance previamente estipulada por terminal e esses números são elaborados sempre calculando quantos vagões o terminal tem como capacidade de recepção, equipamentos de carregamento e performance de carregamento por hora. A Figura 21 mostra as quantidades de vagões por terminais de carregamento.

Figura 18 Capacidade de carregamento por terminais

Produtividade Terminal Carga						
Terminal	Origem	Produto	Vagão/hora	Vagão/dia	Capacidade Encoste	Obs
ATT	LLD	Grão	5	90	90	Produtividade sofre variação se for carregamento só do armazém diminuindo 50%
		Farelo	4			
Ricolog	LLD	Farelo	3	60	84	Não perde produtividade na troca de turno
		Grão	6	120		
Seara	LLD	Grão	6	84	120	Não perde produtividade na troca de turno Almoço e jantar são flexíveis ao horário se tiver com oferta
Cargill	LMG	Grão	5	90	90	Equipe se reveza nos intervalos, carregamento continua.
						Não perde produtividade na troca de turno
Bunge	LMG	Grão	10	210	84	Das 17:00 às 23:00hs produtividade menor (3 vgs/hora)
CPA	LMG	Grão	6	84	18	
Cocamar	LMG	Farelo	2	25	25	Aos sábados encostar até meio-dia para não sobrar vgs
Seara	LMG	Grão	10	160	120	operar alinhando com antecedência. Carrega direto com o trem
Rhall	LMG	Grão	3	63	63	Domingo e Segunda das 08:00 às 18:00
Noble	LMG	Grão	3	28	28	Manutenção aos domingos

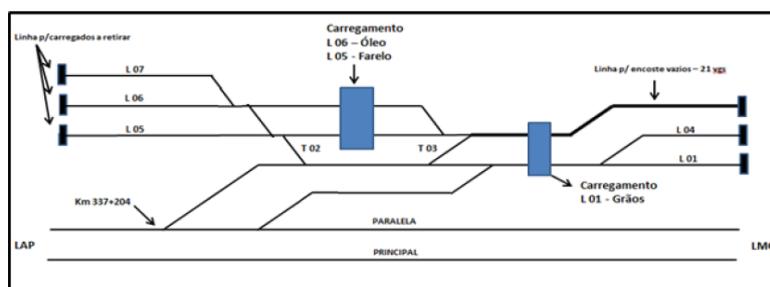
(arquivo do autor)

Quando algum vagão apresentar problema de avaria ou carga deslocada, atualizar a situação no sistema e informar ao líder para alinhamento da manobra de retirada, na formação e recebimento de trens, observar o peso bruto de cada vagão, retirando e retendo qualquer vagão com excesso de peso.

O programador planeja a formação do trem conforme ordem de serviço previstas nos planejamentos de D. Esse é o momento onde o programador verifica se a formação do trem está conforme a tabela de trens autorizados. Além disso, consultando desenhos de trens da engenharia de operações, o operador deve verificar se as locomotivas dos trens destinados ao trem têm o mínimo de combustível para chegar ao destino.

Os encostes nos terminais de carregamento tem tamanhos entre 25 a 100 vagões por encoste. A Figura 22 mostra um exemplo de um terminal de encoste do lado Maringá.

Figura 22 Esquema unifilar de um pátio de manobras



(arquivo do autor)

Os vagões são posicionados nos terminais e desse momento toda a movimentação até que os vagões sejam disponibilizados para a operadora ferroviária, são de responsabilidade do cliente. Depois de carregados os vagões são disponibilizados em linhas específicas para vagões carregados e o terminal informa a estação da disponibilidade dos vagões. A operadora ferroviária assim que recebe a informação de vagões prontos, procede a retirada dos vagões do terminal, procedendo a preparação do trem para ser despachado em direção ao porto.

As locomotivas são disponibilizadas para os trens, conforme especificações técnicas de cada trem, a Figura 23 representa exemplos de tipos de locomotivas utilizadas pela operadora ferroviária.

Figura 23 Exemplo de parque de locomotivas

Locomotiva	Ton Bruta	Tipo	Quantidade de vagões
U20	2590	DUPLA	31
G22UB	2100	DUPLA	25
SD40	4080	DUPLA	49
DASH9	5056	DUPLA	60
U20	1298	SIMPLES	15
G 22 UB	1050	SIMPLES	12
SD 40	2040	SIMPLES	24
DAS9	2528	SIMPLES	30

(arquivo do autor)

Caso tenhamos algum vagão que não foi carregado por algum motivo, ele deve ser manobrado e retirado da composição, antes que o trem seja formado para partir.

Com as manobras formadas nas linhas de partida dos vagões, podemos dar liberação para circulação do trem de acordo com o planejamento de trens realizados em D-1 e confirmados em D. O controle dos trens é todo realizado através da central de operações, localizada na sede da operadora em Curitiba.

A Figura 24 mostra o painel de controle de trens da operadora.

Figura 24 Painel de operações



(Google 22/12/2020)

No lado Londrina o procedimento de recepção de trens e programação é semelhante ao do lado de Maringá, o que se tem de diferente entre uma origem e outra será a quantidade de terminais a ser atendido e os tamanhos de encostes.

O trecho entre Londrina e Apucarana tem uma característica própria na formação de vagões, pois caso exista diferença de peso entre vagões maior que 68%, os mais pesados devem trafegar à frente na composição. Por exemplo; se um vagão pesa 30 toneladas, o peso máximo do vagão detrás é de 80 toneladas, conforme a Figura 25. As demais características são as mesmas de Maringá.

Figura 25 Exemplo de calculos de formação de trem



(arquivo do autor)

A quantidade de vagões carregados em um trem com origem no Norte do Paraná e destino porto de Paranaguá são de 120 vagões. Cada trecho tem um desenho específico para locomotivas, respeitando dados de capacidade das locomotivas. O tipo de tração pode ser com locomotivas na cabeça do trem ou trações distribuídas, que são a que uma locomotiva está posicionada no meio do trem, para que possa ter um fluxo contínuo de ar nos encanamentos dos freios do trem, pois o ar nos encanamentos é um fator importante na frenagem de uma composição. A Figura 26 mostra os tipos de trens possíveis de montagem, a primeira imagem é com uma locomotiva na cabeça e outra no meio e a segunda as locomotivas estão nas extremidades, desenhos diferentes para que a composição tenha segurança de frenagem.

Figura 26 Exemplo de formação de trens



(arquivo do autor)

3 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica 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 deve 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 trabalho destaca que a partir da análise dos problemas modelados é possível obter conhecimento valioso a respeito dos problemas reais.

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 2021. 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, modelo de capacidade ferroviária.

Com o termino das aplicações dos filtros e de acordo com os métodos aplicados, selecionamos 48 artigos listados como referência.

A precariedade do transporte de grãos das áreas produtoras até os portos representa uma grande perda monetária, assim as melhorias nas ferrovias é importante para aumentar a rentabilidade dos produtores segundo Ometo(2006) e Friend e Lima (2011). Os obstáculos logísticos do País têm que ser vencidos para que o Brasil possa crescer e assumir patamares melhores na logística internacional do agronegócio. Salin (2015) mostra em seu trabalho que os custos de transporte representam 27% do preço do soja no destino final e 20 % para o transporte interno, em comparação com os Estados Unidos, que tem 8 % do seu PIB em custos logísticos contra 15,4 % do Brasil segundo World Bank (2010).

Almeida (2013) desenvolveu um modelo matemático e uma simulação computacional otimizando a movimentação do soja em direção aos portos, buscando minimizar os custos de transporte. Outros pesquisadores propõem modelos diferentes para otimizar o escoamento das safras agrícolas, como Reis e Leal (2015) e Silva e D'Agosto (2013). Assis et al (2014) fez uma análise da movimentação de soja de Rondonópolis ao porto de Santos abordando em seu trabalho aspectos econômicos e ambientais. Vera-Diaz et al (2009) em seu trabalho demonstram que as redes de transporte tem importância fundamental no crescimento da produção de grãos no Brasil.

Segundo os trabalhos de Chopra e Meindl, (2010); Gupta e Maranas (2003); Shobrys e White (2000), os modelos de planejamento são classificados em três categorias: estratégico, tático e operacional

O planejamento estratégico está focado no mais alto nível de gestão para grandes investimentos voltados para objetivos de longo prazo.

O planejamento operacional geralmente é realizado pela gestão local, em um ambiente altamente dinâmico, no qual o fator tempo e a capacidade de construir representações detalhadas são essenciais conforme Crainic e Laporte (1997) evidenciam em seu trabalho.

Segundo Chopra e Meindl (2010), para cadeias de abastecimento,

modelos de planejamento podem ser usados para integrar e satisfazer os desejos dos membros de uma rede em escalas de tempo de curto, médio e longo prazo.

No que diz respeito aos níveis de planejamento, no estudo realizado por Ahumada e Villalobos (2009), o planejamento tático foi encontrado para ser o mais amplamente estudado. O nível estratégico foi o segundo mais discutido, e o nível operacional foi o mínimo.

Silva e D'Agosto (2013) construíram um modelo para estimar a matriz origem e destino da exportação de soja no Brasil, que pode auxiliar no planejamento estratégico de transporte para a exportação de produtos de soja do Brasil.

Junqueira e Morabito (2006) desenvolveram um modelo de otimização linear determinístico para apoiar decisões para o planejamento tático da produção, armazenamento e transporte de sementes de milho, para minimizar custos de produção, custos de logística, impostos, certas restrições na programação da colheita, capacidade da planta e demanda do cliente.

No que diz respeito ao planejamento operacional, Higgins (2002) desenvolveu modelo de programação linear inteira mista para planejamento operacional da cultura da cana-de-açúcar, com o intuito de minimizar os custos de transporte e processamento.

A soja é a principal commodity do agronegócio brasileiro segundo Dall'agnol, Roessing, Lazzarotto (2007). A cadeia de abastecimento da soja cria uma situação em que o Brasil pode atuar como ator geopolítico e geoeconômico, com capacidade de influenciar os mercados globais de commodities conforme citado por Hirakuri & Lazzarotto (2014).

Em termos de custos de produção, o produto brasileiro tem vantagens aos seus concorrentes com relação à produção de soja, essas vantagens são de natureza territorial, climática e tecnológica, demonstradas nos trabalhos de Lopes, Lima, & Ferreira (2016) e Salin (2016). No entanto, essas vantagens são reduzidas quando os produtos entram no setor de logística brasileira ineficiente explicam em seus trabalhos Dubke & Pizzolato (2011) e Friend & Lima (2011).

As ineficiências de transporte e armazenamento representam os principais problemas para o agronegócio, que afetam significativamente a

competitividade internacional do Brasil, conforme está exemplificado nos trabalhos de Branco & Caixeta-Filho (2011), Enomoto & Lima (2007), Fioroni et al. (2015) e Kussano & Batalha (2012).

Por ser a soja uma commodity precificada no mercado internacional, não é possível controlar seu preço de venda, sendo os únicos controles disponíveis os custos operacionais e de gestão esclarecem em seus trabalhos Fioroni et al. (2015) e Lopes et al. (2016).

Assim, a construção de um modelo computacional possibilita uma visão estratégica na busca por alternativas eficazes para melhorar a eficiência deste sistema logístico, o Discrete Event Simulation (DES) apresenta-se como uma alternativa viável para realizar este trabalho. Estudos recentes em pesquisa de logística de grãos geralmente usam modelos estáticos ou de otimização, as inter-relações entre as variáveis não são modeladas nestes casos e a natureza dinâmica de mudanças ao longo do tempo no sistema não são contempladas, conforme explica em seu trabalho Sargent (2013)

Os trabalhos de Aisha et al, (2020) e Aditjandra et al. (2016) relatam que a intermodalidade é vantajosa na redução de emissões de gases de efeito estufa especialmente no que diz respeito ao uso da integração ferroviária, no caso da maioria dos produtos agrícolas, sistemas ferroviários são os mais adequados, como ele têm características operacionais para o transporte de alto volume e produtos de baixo valor agregado, segundo Souza et al. (2016) reduz a emissão de poluentes na atmosfera.

Os critérios usados para determinar as políticas de transporte e orientar os investimentos em infraestrutura diferem entre as regiões, mas dois objetivos gerais ganharam importância: a necessidade de melhorar a eficiência do transporte e a redução da poluição causada pelo transporte segundo Abraham et al. (2012).

O aumento da participação das ferrovias na matriz de transporte atende a esses dois objetivos, pois esse modo de transporte é mais energeticamente eficiente e menos poluente do que o modo rodoviário, principalmente devido a sua maior capacidade de carga por viagem.

No Brasil, o transporte de cargas é altamente dependente de rodovias. Esse modal responde por cerca de 61,1% do total de cargas transportadas,

enquanto em outros países de tamanho geográfico semelhante, essa participação é menor do que 30% (CNT, 2018). Com foco no transporte interno das principais exportações agrícolas, milho e soja, quase 50% são transportados pelo rodoviário, 40% ferroviário e 10% hidroviário (BRASIL, 2019).

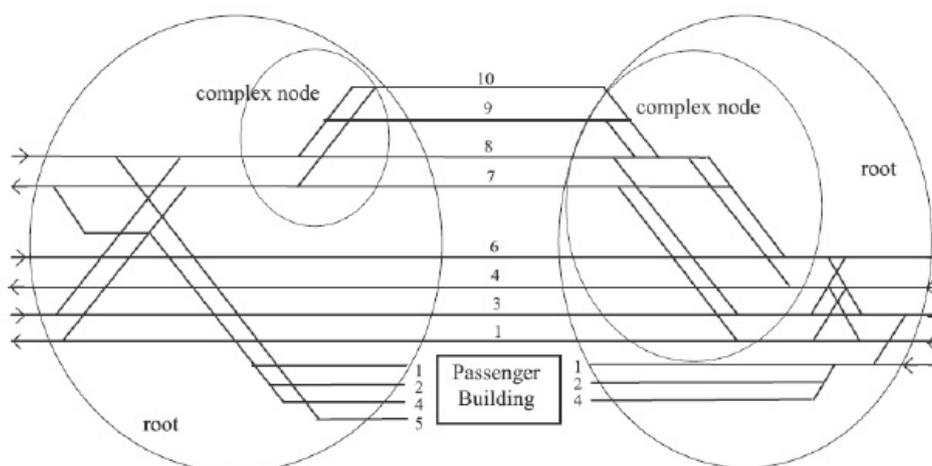
O investimento público total em infraestrutura rodoviária, ferroviária, portuária, aérea e hidroviária caiu 37% entre 2010 e 2017 (BRASIL, 2019), no mesmo período, a quantidade de soja e milho produzida no país aumentou 61%. A região de plantio vem de regiões que estão localizadas muito longe dos portos existentes, isso faz com que o desempenho do transporte no Brasil diminua, enquanto o consumo de combustível fóssil e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) atinjam um nível mais alto, devido ao fato de que o modal rodoviário é o mais utilizado. O setor de transportes é responsável por cerca de 35% do consumo de combustíveis fósseis e por mais de 48% das emissões de GEE do país (BRASIL, 2019). A baixa produtividade do transporte no Brasil tem aumentado o custo de frete e afeta negativamente a competitividade de alguns setores, em especial a exportação de grãos.

Abraham et al. (2012) discutem outras iniciativas tomadas por vários governos nacionais para combater as mudanças climáticas, especialmente ao investir em alternativas mais eficientes em termos de energia para as práticas atuais, incluindo aqueles empregados no setor de transporte.

O Governo Federal anunciou um programa público-privado de parceria para aumentar o investimento em novas ferrovias. Espera-se que a implantação dessas novas ferrovias, melhore a competitividade das principais exportações agrícolas brasileiras e promova efeitos positivos sociais e ambientais, melhorando a eficiência em todos os principais corredores de exportação do país, frete mais baixo e menor emissão de CO₂ pelo setor de transporte, e redução do número de veículos pesados circulando nas estradas brasileiras.

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 27 exemplifica uma linha férrea complexa com esses conceitos. Os autores estudaram um problema de uma ferrovia da Suíça.

Figura 27 Linhas Ferreas complexas por Calvo e Mussone (2013)



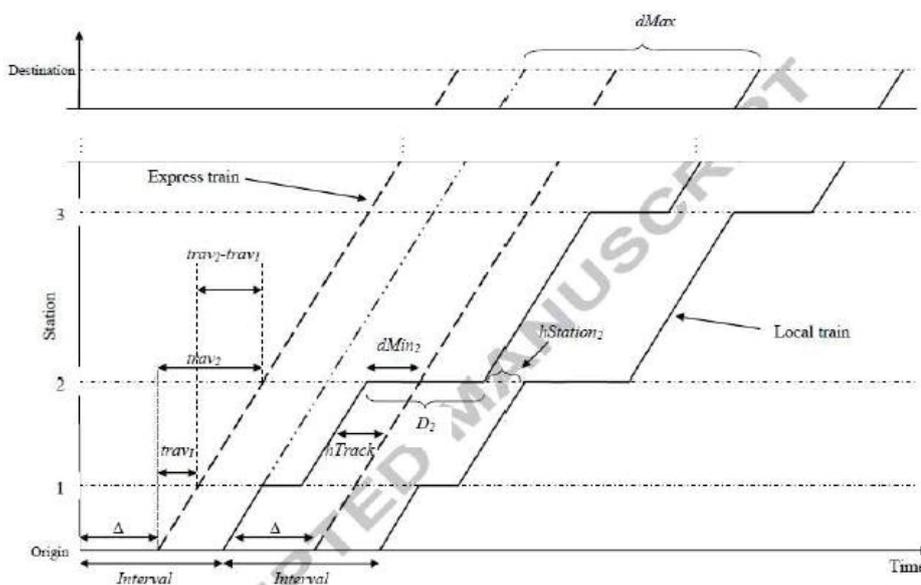
A Figura 26 representa um trecho de uma linha singla que demonstra vários entroncamentos entre as linhas principais e os pátios de estacionamento e cruzamento de trens. Temos 6 linhas principais que se interligam através de linhas que são secundárias.

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 28

Figura 28 Esquema unifilar de um gráfico de controle por Heydar, Petering e Bergman (2013)



A figura 27 representa o gráfico da circulação de trens entre uma origem e um destino com os momentos entre estações intermediárias.

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.

Marinov e Viegas (2010) em seu artigo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de modelagem de simulação mesoscópica para análise e avaliação de operações de trens de carga em uma malha ferroviária com 3 pátios de manobra, 5 terminais de carga, 7 ferrovias de linha dupla e 8 estações de passageiros, usando o software de simulação baseado em evento SIMUL 8. A metodologia foi aplicada na malha ferroviária em Portugal e as principais conclusões são: quanto mais estruturada é a operação com os trens de carga, menores se tornam as filas de espera na malha ferroviária; e quanto mais caótica e desorganizada se torna a operação com os trens de carga, cresce o tamanho das filas de espera na malha ferroviária.

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.

Concluíram também que a abordagem híbrida otimização e simulação possibilitou representar o sistema real de maneira mais realista.

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.

4 PROPOSTA DO MODELO PARA OTIMIZAÇÃO DE CARREGAMENTOS DE VAGÕES.

No presente capítulo é descrito o modelo matemático de programação inteira mista para determinar a quantidade mínima de vagões necessários para atender as demandas dos navios com previsão de atracação no porto de Paranaguá. Como consequência da otimização, tem-se também a otimização do uso dos ativos da operadora ferroviária.

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

Conjuntos

L : conjunto dos Locais

I_i^+ : conjunto dos destinos a partir do local i com vagões carregados

I_i^- : conjunto dos destinos a partir do local i com vagões descarregados

J_i^+ : conjunto dos destinos a partir do local i com vagões carregados

J_i^- : conjunto dos destinos a partir do local i com vagões descarregado

H : conjunto de períodos de tempo

Para o estudo desenvolvido no presente trabalho tem-se que $L = \{\text{Maringá (M), Londrina (L), Apucarana (A), Curitiba (C), Paranaguá (P)}\}$, $I_M^+ = \{A\}$, $I_L^+ = \{A\}$, $I_A^+ = \{C\}$, $I_C^+ = \{P\}$, $I_P^+ = \{C\}$, $I_C^- = \{A\}$, $I_A^- = \{M, L\}$, $J_M^+ = \{A\}$, $J_L^+ = \{A\}$, $J_A^+ = \{C\}$, $J_C^+ = \{P\}$, $J_P^+ = \{C\}$, $J_C^- = \{A\}$ e $J_A^- = \{M, L\}$, conforme está na figura 30 apresentada no final do modelo matemático.

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

h_{min} : fração mínima de vagões de Apucarana para Maringá

h_{max} : fração máxima de vagões de Apucarana para Maringá

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

$$z_{ijp}^+ = \begin{cases} 1, & \text{se saiu trem carregado de } i \text{ para } j \text{ no período } p \\ 0, & \text{c. c} \end{cases}$$

$$z_{ijp}^- = \begin{cases} 1, & \text{se saiu trem descarregado de } i \text{ para } j \text{ no período } p \\ 0, & \text{c. c} \end{cases}$$

Função objetivo

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

Restrições

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$E_{C0}^+ = 480 \quad (13)$$

$$E_{A0}^+ = 480 \quad (14)$$

$$\sum_{u=p-t_{ij}+1}^p x_{iju} \leq 360, \forall p \in H, ij \in Z \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} E_{Mp}^+ \leq 360, p = 2, \dots, |H| \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} E_{Lp}^+ \leq 360, p = 2, \dots, |H| \quad (17)$$

$$x_{ijp}^+ \leq 120z_{ijp}^+, \forall p \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} E_{i0}^+ + \sum_{i \in I} E_{i0}^- \leq 3000 \quad (19)$$

$$(1 - h_{max}) \sum_{p \in H} x_{AMp}^- - \sum_{p \in H} x_{ALp}^- \leq 0 \quad (20)$$

$$(1 - h_{min}) \sum_{p \in H} x_{AMp}^- - \sum_{p \in H} x_{ALp}^- \geq 0$$

$$z_{ijp}^+ \in \{0,1\}, \forall i \in L, j \in J_i^+, p \in H \quad (21)$$

$$z_{ijp}^- \in \{0,1\}, \forall i \in L, j \in J_i^-, p \in H \quad (22)$$

$$E_{ip}^+, E_{ip}^- \in Z_+, i \in L, p \in H \quad (23)$$

$$x_{ijp}^- \in Z_+, i \in L, j \in I_i^-, p = 1, \dots, |H| \quad (24)$$

$$x_{ijp}^+ \in Z_+, i \in L, j \in I_i^+, p = 1, \dots, |H| \quad (25)$$

$$E_{ijp}^- \in \{0,1\}, p = 2, \dots, |H| \quad (26)$$

$$E_{ijp}^+ \in \{0,1\}, p = 2, \dots, |H| \quad (27)$$

A expressão (1) representa a minimização da quantidade total de vagões necessários para atender a demanda. Uma vez que não é considerada nem a entrada nem a saída de vagões do sistema durante o horizonte de planejamento, minimizar a quantidade inicial de vagões é equivalente a minimizar a quantidade total de vagões necessários para o sistema.

O conjunto de restrições (2) garante que toda a demanda no Porto é atendida a cada período. A movimentação de vagões entre os pontos é tratada como movimentação de estoque e os conjuntos de restrições de (3) a (12) representam essas relações. As restrições de (3), (5), (7), (9) e (11) referem-se à estoques de vagões carregados e as de (4), (6), (8), (10) e (12) de vagões descarregados.

De forma mais detalhada tem-se que (3) garante que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões carregados de Curitiba o 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; já e nos períodos seguintes tem-se que essas chegadas geram aumento no estoque. As restrições (4) garante que do período 1 até o período anterior aos que iniciam as primeiras descargas de Paranaguá 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 e nos períodos seguintes tem-se que essas descargas diminuem o estoque de vagões carregados.

As restrições (5) garantem que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões carregados em Maringá, 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 e nos períodos seguintes tem-se o aumento do estoque de vagões vazios em Maringá.

As restrições (6) garantem que do período 1 até o período anterior aos que partem os primeiros vagões vazios em Maringá, o estoque de vagões vazios em Maringá é igual ao estoque de vagões vazios do período anterior menos a

quantidade de vagões vazios que iniciam o carregamento e nos períodos seguintes tem-se a soma dos vagões vazios chegados de Apucarana, as restrições (7) garante que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões carregados em Londrina, 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 e no períodos seguintes tem-se o acréscimo dos vagões vazios disponíveis para carregamento, as restrições (8) garante que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões vazios em Londrina, 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 de Londrina e nos períodos seguintes temos a soma dos vagões vazios chegados de Apucarana, as restrições (9) garante que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões carregados em Apucarana, 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, as restrições (10) garante que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões vazios em Apucarana, o estoque de vagões vazios em Apucarana é igual ao estoque de vagões vazios que chegam de Curitiba, nos próximos períodos temos o acréscimo das saídas para Maringá e Londrina, as restrições (11) garante que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões carregados em Curitiba, 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 nos próximos períodos temos a subtração as saída de vagões carregados de Curitiba para Paranaguá, as restrições (12) garante que do período 1 até o período anterior aos que chegam os primeiros vagões vazios em Curitiba, 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, nos próximos períodos temos a subtração dos vagões vazios que partem para Apucarana, restrições (13)

garantem que o estoque inicial de vagões carregados no instante $t=0$ em Curitiba seja igual a 480 vagões, restrições (14) garantem que o estoque inicial de vagões carregados no instante $t=0$ em Apucarana seja igual a 480 vagões, restrições (15) garantem que o somatório dos vagões nos pontos de origem ou destino do conjunto L tem que ser menor ou igual a 360 para todo p pertencente a H e inteiro e positivo, (16) garante que a soma dos vagões carregados em Maringá sejam menores ou iguais a 360 vagões, (17) garante que a soma dos vagões carregados em Londrina sejam menores ou iguais a 360 vagões, (18) garante que a quantidade de vagões carregados em i com destino a j tem que ser menor ou igual a 120 no período t variando de 2 até H , (19) a somatória de todos os vagões carregados e vazios em i no período $t = 0$ tem que ser menor ou igual a 3.000, as restrições (20) garantem que tenhamos a oferta de vagões entre Maringá e Londrina dentro de um intervalo limitado por valores máximos e mínimos de ofertas, (21) garante que o estoque inicial de vagões carregados e vazios no ponto i no período de $p=2$ até H , seja sempre um número inteiro, (22) garante que de todo lugar que exista saída de vagões vazios para algum outro lugar seja de quantidades inteiras e não negativas, (23) garante que de todo lugar que exista saída de vagões carregados para algum outro lugar seja de quantidades inteiras e não negativas, (24) garante que a quantidade de vagões vazios que saem de i para j no período p seja de quantidades inteiras e não negativas, (25) garante que a quantidade de vagões carregados que saem de i para j no período p seja de quantidades inteiras e não negativas, (26) mostra que o estoque de vagões vazios entre a origem i e destino j são variáveis de decisão binárias e positivas, no período p variando de 2 a H , (27) mostra que o estoque de vagões carregados entre a origem i e destino p são variáveis de decisão binárias e positivas, no período de tempo variando de 2 a H

No presente estudo tem-se que os locais são definidos pelo conjunto

$L = \{Maringá, Londrina, Apucarana, Curitiba, Paranaguá\}$ e os lead times existentes estão na Tabela 2.

Tabela 2 Tabela Origem Destino

Situação	Origem	Destino	Quantidade de períodos de deslocamento
Vazio	Paranaguá	Curitiba	4
Vazio	Curitiba	Apucarana	8
Vazio	Apucarana	Londrina	6
Vazio	Apucarana	Maringá	4
Carregado	Maringá	Apucarana	4
Carregado	Londrina	Apucarana	6
Carregado	Apucarana	Curitiba	8
Carregado	Curitiba	Paranaguá	4

(do autor)

5 RESULTADOS

No trabalho foram utilizados os dados reais de demandas de um mês no porto e também os tempos reais de viagem e de ciclo. O modelo matemático retornou como resultado que seriam suficientes 2747 vagões para atender às demandas, apresentando uma redução de 8,43% em relação aos 3.000 que foram utilizados no mês base para o estudo.

Esses equipamentos que estão teoricamente sobrando para o atendimento da demanda podem ser utilizados para aumentar o atendimento dos clientes ou buscar novos clientes dentro do segmento de grãos. É importante destacar que a ferrovia teve capacidade de realizar a movimentação dos vagões, mas com o planejamento realizado eles foram subutilizados.

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 55 (t/vagão) x R\$/t 80,00.

Caso a operadora optasse por direcionar essa sobra de vagões para o segmento do açúcar esse ganho poderá ser ainda maior, pois tem-se uma ocupação maior 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, conforme análise apresentada na Figura 29

Figura 29 Custos de materiais rodantes



(do autor)

Isso demonstra que com o trabalho de otimização de apenas 1 fluxo de transporte pode-se 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.

Esse primeiro resultado indica e abre oportunidades para a expansão desse modelo para outros produtos e outros cenários na expectativa de atingir ainda melhores resultados para a operadora. Um ganho que parece bem importante é quando se realiza o comparativo de ganho utilizando diferentes produtos e fazendo mix entre eles.

Para um nível de detalhe maior nos resultados, 5 cenários possíveis foram analisados: o primeiro cenário é quando durante a safra existe um ganho de veículos e é aplicado no mesmo produto (soja), de imediato sem alterar os tempos de permanência dos veículos em porto. Isso já gera um ganho de mais de R\$ 500.000,00, porém com a diminuição do tempo de ciclo de vagões no porto esse ganho é muito maior do que o anterior, podendo chegara até a cifra de R\$ 4 Milhões de reais.

Quando se trabalha com cenários de entre safra e mix de produtos os ganhos podem ser muito mais expressivos, na tabela abaixo verifica-se que o uso dos veículos no açúcar gera um ganho maior que todos os outros cenários – em razão da melhor utilização em peso do veículo. Porém o mix de milho e açúcar na entre safra, gerando um atendimento de mais clientes da ferrovia, tem valores expressivos de aumento de receita bruta.

Por exemplo no cenário com apenas a soja, tem-se que podemos utilizar os ganhos de vagões com o mesmo produto na mesma safra, podendo assim atender mais clientes.

Durante a entre safra pode-se colocar os vagões em outros produtos, como por exemplo:

- Utilizar o ganho de veículos no milho
- Utilizar o ganho de veículos no açúcar
- Fazer um mix entre milho e açúcar meio ameiado nessa utilização
- Fazer um mix com mais açúcar, uma vez que ele dá uma maior rentabilidade para o mesmo ativo

Vê-se que se tem várias possibilidades de utilização desses ativos,

podendo ser feita a escolha de acordo com o que se tem de oferta de produto naquele momento.

Na Tabela 3, temos esses ganhos transformados em valores monetários, onde se vê bons ganhos, onde pode-se aliar a melhor utilização das ofertas de vagões com os tempos de giro do porto.

Tabela 3 Cenários de otimizações

Giro em Paranagua	Soja		Milho		Açúcar	Milho 50% +Açúcar 50%	Milho 40% +Açúcar 60%	
	Ganho Safra	Entre safra 1	Entre safra 2	Entre safra 3	Entre safra 4			
36 horas	R\$ 124.000,00	R\$ 3.232.000,00	R\$ 4.524.800,00	R\$ 3.878.400,00	R\$ 4.007.680,00			
30 horas	R\$ 1.012.000,00	R\$ 3.996.000,00	R\$ 5.331.200,00	R\$ 4.569.600,00	R\$ 4.721.920,00			
28 horas	R\$ 1.012.000,00	R\$ 3.996.000,00	R\$ 5.594.400,00	R\$ 4.795.200,00	R\$ 4.955.040,00			

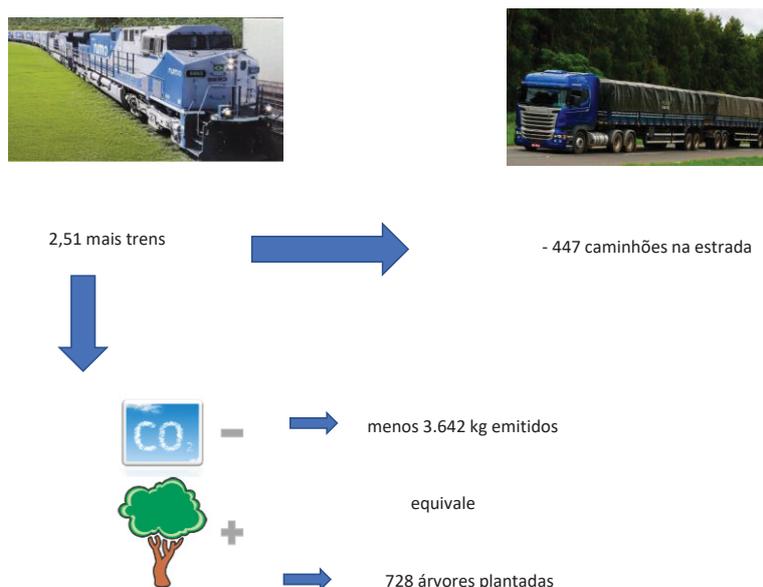
(do autor)

Como outro resultado do trabalho temos também a possibilidade da redução do número de caminhões rodando nas estradas. Com o número de 253 vagões a menor na primeira simulação, o modelo nos retorna um ganho na retirada de aproximadamente 340 caminhões das estradas, trazendo um ganho de segurança para o trânsito, proporcionando uma diminuição dos riscos de acidentes, uma vez que os motoristas se submetem a grandes jornadas de trabalho, para poder ganhar um pouco mais nas suas viagens.

Na dimensão ambiental tem-se ganhos significativos com trens otimizados, podendo atender a mesma demanda com menos trens circulando estarmos emitindo menos CO₂ na atmosfera, ou ainda retirar nas estradas veículos que emitem mais produtos na atmosfera em não dão o ganho de escala de uma ferrovia.

Essa relação está demonstrada na Figura 19.

Figura 19 Relação de emissão de CO2



(do autor)

Um outro resultado é o do valor do preço da commodity soja que é diretamente influenciada pelo custo do transporte e isso confirma a necessidade de transportes mais eficazes e menos poluentes. Um exemplo do custo do produto pode ser verificado nos cálculos abaixo demonstrados na Figura 31.

Figura 20 Cálculos de custos do produtos

	Fretes de Maringá ao Porto Paranaguá				
	Ferro R\$/Sc	Rodo R\$/Sc	Custo Americano R\$/Sc		
Preço Soja/saca	R\$ 160,00	R\$ 160,00	R\$ 160,00		
Elevação do Navio/saca	R\$ 2,63	R\$ 2,63	R\$ 0,99		
Transporte Solução Ferroviária/saca	R\$ 4,50	-	R\$ 5,94		
Transporte Rodoviário	-	R\$ 7,90	-		
Custo Total Logística	R\$ 7,13	R\$ 10,53	R\$ 6,93		
Custo Produção/saca	R\$ 80,00	R\$ 80,00	R\$ 65,00		
Custo Total	R\$ 87,13	R\$ 90,53	R\$ 71,93		
Saldo Produtor	R\$ 72,87	R\$ 69,47	R\$ 88,07		
	lote de sacas > 500.000,00				
preço Americano	R\$ 160,00	R\$ 80.000.000,00	custo produção R\$ 32.500.000,00	sobra R\$ 47.500.000,00	
preço brasileiro ferro	R\$ 132,39	R\$ 66.192.801,18	R\$ 40.000.000,00	R\$ 26.192.801,18	-45%
preço brasileiro rodo	R\$ 126,21	R\$ 63.104.348,81	R\$ 40.000.000,00	R\$ 23.104.348,81	-51%

Produtor Brasileiro ganha 45% a menos que o americano com o transporte Ferroviários e 51% com o Rodoviário.

(do autor)

Com esses cálculos verifica-se que, com a utilização da ferrovia como

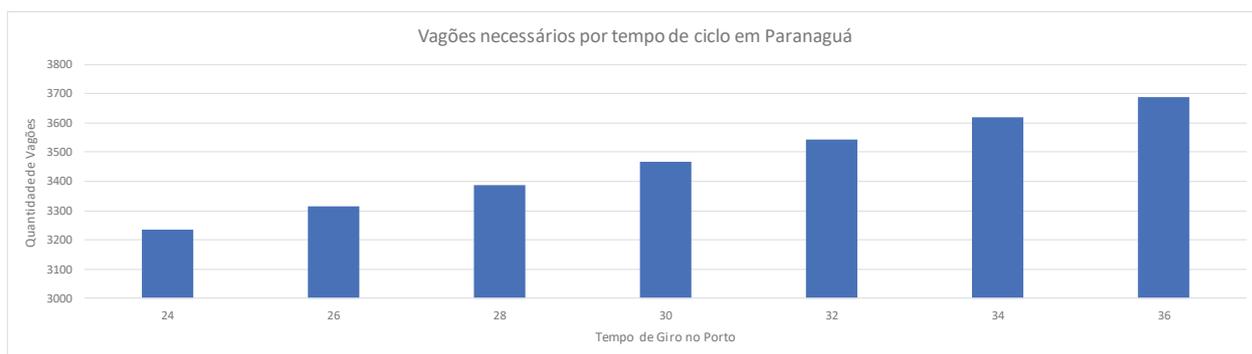
transporte da safra agrícola, o produtor brasileiro ganha R\$3,40/saca mais do que quando transporta pela rodovia (o preço do transporte da saca é de R\$ 4,50 no modal ferroviário contra R\$ 7,90 no rodoviário). Considerando o preço da saca como sendo R\$ 160,00, o ganho é de 2,125%.

O cálculo de ganho financeiro de uma propriedade que produza 500.000 sacas de soja, utilizando o modal ferroviário ao invés de usar o rodoviário, poderá chegar a valores de R\$ 1.700.000, 00 a maior, apenas com o uso do modal ferroviário, isso representa em valores por saca R\$ 3,40 a mais por saca transportada.

A ferrovia estudada busca uma maior eficiência em seu transito de vagões das origens ao destino. A sua meta é de reduzir o tempo de permanência dos vagões nos portos em 7%, buscando uma maior eficiência, quando reduzimos o número de vagões para o atendimento dos fluxos, pode-se proporcionar ao pátio de manobras mais espaço para poder realizar manobras de chega e partida com maior qualidade.

O Gráfico 3 abaixo mostra a evolução da necessidade maior de vagões quando temos uma maior ineficiência nas manobras de pátios do porto. Sendo esse um elemento de confirmação da necessidade de chegar com vagões otimizados no porto.

Gráfico 3 Evolução das quantidades de vagões



(do autor)

Pode-se com esses resultados adicionar as manobras portuárias uma flexibilidade em buscar novos produtos para os vagões, como por exemplo o fertilizante, o que faria com que os vagões tivessem viagens carregados nos dois

sentidos, novamente podendo maximizar os lucros da empresa.

6 CONCLUSÕES

A presente dissertação apresentou uma proposta, por meio de um modelo matemático de programação inteira mista, para aumento da capacidade de operação em ferrovia. Particularmente, isso foi tratado considerando um planejamento otimizado para atender as demandas dos navios no porto de Paranaguá com soja embarcada em Maringá e Londrina.

O fato da operação ser realizada 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. A consequência imediata é aumento de receitas e isso gera possibilidades de melhoria do parque de vagões e locomotivas, perpetuando o crescimento do transporte ferroviário no Brasil, assim como da diminuição do custo de transporte para o contratante.

O modelo proposto 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.

É importante ressaltar que sem a utilização do modelo e a ferramenta desenvolvida, as análises de cenários e decisões eram realizadas de forma manual, consumindo tempo de diversos colaboradores e sem qualquer garantia sobre a otimalidade do planejamento decidido.

De forma complementar, o dinamismo das operações ferroviárias ressalta a importância de ferramentas de apoio à decisão que forneçam respostas de alta qualidade em curto espaço de tempo.

O modelo desenvolvido tem ainda o potencial, sem precisar de qualquer alteração, de servir como simulador para diferentes cenários que demandam investimentos maiores, como redução do tempo no pátio de manobra, maior

velocidade dos trens e maior número de vagões por composição.

Considerando que os volumes financeiros envolvidos nas operações ferroviárias são grandes, mesmo economias de poucos pontos percentuais já representam montante financeiro relevante. O fato da melhoria financeira com o modelo proposto ser superior a 8% cria espaço e interesse para que novos modelos sejam desenvolvidos e aplicados para diferentes áreas da empresa.

Sugestões para trabalhos futuros

- Estudo de redes intermodais rodoferroviárias, otimizando demandas e fretes.
- Estudo de um modelo matemático para determinar as rotas ótimas de transporte rodoferroviário escolhendo o melhor ponto de transbordo.
- Estudo de um modelo matemático para determinar a rota ótima, dos fluxos casados de produtos exportação e importação a granel.
- Estudo do impacto do custo intermodal com base em rotas, tipos de produtos e preço do petróleo.
- Estudo de modelos matemáticos de programação linear das interferências entre os trens em fluxos de linhas singelas.

REFERÊNCIAS

Abraham, S., Ganesh, K., Kumar, A.S., Ducq, Y., 2012. Impacto na mudança climática devido ao prospecto de pesquisa do setor de transporte. *Procedia Eng* 38, 3869–3879. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.445>.

Aditjandra, P. T., et al. Transporte ferroviário verde: melhorando o frete ferroviário para apoiar corredores verdes. In: PSARAFTIS H. *Green Transportation Logistics*. Série Internacional em Pesquisa Operacional e Ciência de Gestão. Cham: Springer, 2016, pp.413-454. doi: 10.1007 / 978-3-319-17175-3_12.

Ahumada, O., Villalobos, R., 2009. Aplicação de modelos de planejamento na cadeia de abastecimento agroalimentar: uma revisão. *EUR. J. Oper. Res.* 196 (1), 1–20

Aisha, T. A .; et al. Otimização de layouts de terminais de contêineres no porto marítimo - caso do Porto de Montreal. *Sustentabilidade*, v.12, n.3, 2020. Disponível em:. Acesso em: 13 Set. 2021. doi: 10.3390 / su12031165.

Assis, T. F .; Gonçalves, D. N. S .; Silva, M. A. V .; Amorin, J.C.C). Análise de alternativas de rota de soja do estado de Mato Grosso para exportação sob o enfoque econômico e ambiental. *Anais do XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Curitiba-PR. 2014.

Banco Mundial. *Como diminuir os custos da logística de frete no Brasil*. (2010).

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.

Brasil - Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Estatísticas de Comércio Exterior, 2018. [Documento WWW] <http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior> acessado em 15/10/2019. Brasil, Política de Concessões ~ - EF170 Ferrogrão (PA),

Brasil - Ministério da Infraestrutura, EPL - Empresa de Planejamento e Logística, 2019. Anuário Estatístico de Transportes, 2010-2018, 2019.

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.

Caixeta Filho, J.V.; Gameiro, A.H. Transporte e logística em sistemas agroindustriais. São Paulo: Atlas, 2001. 218 p.

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.

CNT. Comissão Europeia, 2011. Redigir Documento: Roteiro para um Espaço Único de Transporte Europeu - Rumo a um Sistema de Transporte Competitivo e Eficiente em Recursos. Bruxelas.

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.

Crainic, T.G., Laporte, G., 1997. Modelos de planejamento para transporte de carga. *EUR. J. Oper. Res.* 97 (3), 409–438.

Dall'agnol, A., Roessing, A. C., Lazzarotto, J. J., Hirakuri, M. H., & Oliveira, A. B. (2007). O complexo agroindustrial da soja brasileira. Circular Tecniche. Embrapa Soja. Londrina (em português).

Dubke, A. F., & Pizzolato, N. D. (2011). Modelo de localização de terminais especializados para exportação de soja no Brasil. *Pesquisa Operacional*, 31 (1), 21–40. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-74382011000100003>.

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.

Engenharia, Seção de Fortificação e Construção, Rio de Janeiro, RJ, Brasil E-mail: gracianoamorim2014@gmail.com , laslopes@uol.com.br , orivalde@ime.eb.br

Enomoto, L. M., & Lima, R. S. (2007). Análise da distribuição física e roteirização em um atacadista. *Produção*, São Paulo, 17 (1), 94–108. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132007000100007> (abril).

ESTUDO DE NOVO TRECHO FERROVIÁRIO PARA O ESCOAMENTO DE SOJA DA REGIÃO OESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Alan Cristofer Silva ,Giovanni Fini, Verissimo Da Silva ,João Roberto Maiellaro .

Fioroni, M. M., Franceza, L. A. G., Santana, I. R.d., Lelis, P. E. P., Silva, C. B.d., Telles, G. D., ... Varani, R. (2015). Da fazenda ao porto: simulação da logística de grãos no Brasil. *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*<http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2015.7408310>.

Friend, J. D .; Lima, R. S. Do campo ao porto: o impacto das políticas de

transporte na competitividade da soja brasileira e americana. Registro de pesquisa de transporte: Journal of the Transportation Research Board, nº 2238, Transportation Research Board das Academias Nacionais. Washington, D.C., pp. 61-67. 2011

Gupta, A., Maranas, C.D., 2003. Gerenciando a incerteza da demanda no planejamento da cadeia de suprimentos. *Comput. Chem. Eng.* 27, 1219–1227
Shobrys, D., White, D., 2000. Sistemas de planejamento, programação e controle: por que eles não podem funcionar juntos. *Comput. Chem. Eng.* 24, 163–173.

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

Higgins, A.J., 2002. Usinas de açúcar australianas otimizam a escala de colheitadeiras para melhorar a produção. *Interfaces* 32 (3), 15–26.

Hirakuri, M. H., & Lazzarotto, J. J. (2014). O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. Londrina: Embrapa Soja (em português, 70 pp).

Impacto das políticas de transporte na competitividade da soja brasileira e americana: do campo ao porto Registro de pesquisa de transporte: Journal of the Transportation Research Board J. Daniel Amigo, Renato da Silva Lima
Artigo de pesquisa publicado pela primeira vez em 1 de janeiro de 2011
<https://doi.org/10.3141/2238-08>

Impactos do congestionamento ferroviário nas operações portuárias intermodais de Puget Sound Daniel Frederick Helman Uma tese submetido em cumprimento parcial do requisitos para o grau de Mestre de Assuntos Marítimos universidade de Washington

João Gilberto Mendes dos , Reis Valéria Rufino Maiellaro, Fatec Zona Leste
REVISTA FATEC SEBRAE EM DEBATE: Gestão, Tecnologias e Negócios
Volume 05 | Número 08 | JAN - JUN. 2018 | ISSN: 2358-9817

Junqueira, R.A.R., Morabito, R., 2006. Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho. *Produção* 16 (3), 510-525

Kussano, M. R., & Batalha, M. O. (2012). Custos logísticos do agronegócio: Avaliação da exportação de soja do estado de Mato Grosso. *Gestão da produção*, São Carlos, 19 (3), 619-632. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2012000300013>.

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

Lopes, H. S., Lima, R. S., & Ferreira, R. C. (2016). Um modelo de otimização de custos de rotas de transporte para exportação da soja brasileira. *Custos e agronegócio on-line*, 12 (4).

Marinov, M.; Viegas, J. A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2010. Disponível em: <<http://202.114.89.42/resource/pdf/4991.pdf>>. Acesso em: 28/01/2021.

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.

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.
Reis, S. A., e Leal, J. E. (2015). Um modelo matemático determinístico para apoiar decisões temporais e espaciais da cadeia produtiva da soja. *Journal of*

Transport Geography. Brasília, pag.48-58. 2015

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.

Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., Shapiro, A., 2005. Uma abordagem de programação estocástica para o projeto de rede da cadeia de suprimentos sob incerteza. EUR. J. Oper. Res. 167 (1), 96-115.

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.

Sargent, R. (2013). Uma introdução à verificação e validação de modelos de simulação. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (pp. 321–327). Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. <http://dx.doi.org/10.1057/jos.2012.20>.

Salin, D. Relatórios de Indicadores de Transporte de Soja no Brasil. Departamento de Agricultura dos EUA, Serviço de Marketing Agrícola. Janeiro de 2015 <http://dx.doi.org/10.9752/TS052.01-2015A>. Acesso: Maio, 2020

Silva, M.A.V., D'agosto, M.A., 2013. Um modelo para estimar a matriz origem-destino da exportação de soja no Brasil. J. Transp. Geogr. 26, 97–107.

Chopra, S., Meindl, P., 2010. Gestão da Cadeia de Suprimentos. Pearson Education, São Paulo, SP.

Simulação de Ferrovias discreta baseada em eventos modelo de avaliação de ecoeficiência Amorim, GA; Lopes, LAS e Silva Junior, OS Instituto Militar de

Ometto, J. G. S. Os gargalos da agroindústria. Jornal O Estado de São Paulo. Maio, (em português). 2006.

Vera-Diaz, M. D. C .; Kaufmann, R K .; Nepstad, D. C. Os impactos ambientais da expansão da soja e do desenvolvimento de infraestrutura na Bacia Amazônica do Brasil Global. Trabalho do Instituto de Desenvolvimento e Meio Ambiente, n.09-05. 2009

[http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1323121030855 / FreightLogistics.pdf? resourceurlname = FreightLogistics.pdf](http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1323121030855/FreightLogistics.pdf?resourceurlname=FreightLogistics.pdf). Acesso em: maio de 2020.

<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Rodoviario/1-4-2-1-1-/Frota>, consultado em 25/08/2021 as 17:30.